

RÉPUBLIQUE DU SÉNÉGAL  
MINISTÈRE DES FORCES ARMÉES  
ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE THIÈS  
DÉPARTEMENT DU GÉNIE CIVIL

ANNÉE ACADÉMIQUE 1984-1985



PROJET DE FIN D'ÉTUDES

GC.0308

TITRE : ÉTUDE DE LA STABILITÉ DU TERRIL EN PHOSPHOGYPSE DES  
INDUSTRIES CHIMIQUES DU SÉNÉGAL (I.C.S.)

SOUS DOSSIER : STABILITÉ DES TALUS

NUM

AUTEUR : BOUKARY R.S. PAKODTOGO, E. ING.

COLLABORATEUR : AMADOU W. GUISSÉ, E. ING.

DIRECTEUR : MR. VICTOR CIUBOTARIU, DR. ING.

CO-DIRECTEUR : MR ISMAÏLA GUEYE, M.Sc, ING.

Mai 1985

A -

- . GERMAINE S. OUEDRAOGO, MA MÈRE
- . THÉRÈSE T. OUEDRAOGO
- . THÉODORE P. NABA
- . LA FAMILLE NDOUR A FADIOUTH (SÉNÉGAL)

## REMERCIEMENTS

---

Je tiens à adresser mes très sincères remerciements à tous ceux qui ont contribué à la réalisation de cette étude. Notamment à :

- Mr. Victor CIUBOTARIU, Dr. ing., Professeur de Résistance des Matériaux et de Structures Hydrauliques à l'E.P.T., mon Directeur de Projet, pour l'éminent concours qu'il m'a prêté, pour la qualité et la pertinence de ses conseils ;
- Mr. Ismaïla GUEYE, ing. Msc., Professeur de Mécanique des Sols à l'E.P.T., mon co-directeur de Projet pour son aide très bien appréciée ;
- Mr. Michel BORNAT, technicien de Mécanique des Sols et de Topographie, pour toute la disponibilité dont il a fait montré, pour l'aide matérielle fournie, pour sa compétence en la matière - ce qui m'a énormément servi. Je lui rends un vibrant hommage ;
- Mr. Georges-Henri HUARD, Professeur de Topographie pour l'appui logistique apporté lors des relevés topographiques.

Mes sentiments de gratitude vont également à l'égard à mes collègues de 5e Année Génie Civil, pour le déplacement qu'ils ont effectué avec moi pour les relevés topographiques.

Je dis merci à tous les ouvriers, techniciens et ingénieurs des I.C.S., surtout à Mr. GAYE, chef de l'atelier phosphorique, pour leur accueil lors des visites des lieux.

Enfin je remercie Madame Suzanne Young TISSEIRA qui a patiemment dactylographié le manuscrit.

## SOMMAIRE

---

A la demande et pour le compte des Industries Chimiques du Sénégal (I.C.S.), nous avons procédé à l'étude de la stabilité générale (fondation et talus) du terril en phosphogypse de DAROU KHOUDOSS. Cette étude comporte deux (2) sous-dossiers :

- . Un premier intitulé "Tassements et stabilité des fondations" qui a été réalisé par Amadou W. GUISSÉ ;
- . le second "Stabilité des Talus" dont je suis l'auteur.

Bien que ce genre d'étude soit bien connu des Ingénieurs Civils et particulièrement de ceux de la Mécanique des Sols Appliquée, il nous appartient de tirer l'attention du lecteur que les résultats des essais réalisés permettent de dire que les propriétés géotechniques du phosphogypse en font un matériau qui ne s'apparente pas aux sols au sens classique du terme.

En ce qui concerne la stabilité des talus du terril, les calculs faits à l'aide du programme STABIL de l'Université de BERKELEY (U.S.A.) utilisant la méthode de BISHOP simplifiée montrent que dans son état actuel le terril est stable.

Des calculs d'extrapolation pour différentes hauteurs indiquent que des mesures particulières devraient être prises pour garantir la sécurité des Opérateurs, du système de transport du phosphogypse et des équipements installés près du terril.

## TABLE DES MATIERES

### Préliminaires

. Page titre	i
. Dédicace	ii
. Remerciements	iii
. Sommaire	iv
. Table de matières	vi
. Liste des figures et Tableaux	

### PAGE

1. INTRODUCTION	1
2. LE RESIDU PHOSPHOGYPSE	3
2.1. Obtention	3
2.2. Caractéristiques	3
2.3. Problématique	4
3. LA STABILITE DES TALUS	6
3.1. Importance	6
3.2. Les mouvements de terrain	7
3.2.1. Nature	7
3.2.2. Causes	7
3.3. Les paramètres	7
3.3.1. Les paramètres externes	8
3.3.2. Les paramètres internes	8
3.4. L'influence de l'eau	8
3.5. Les forces en jeu	8
3.6. Résistance au cisaillement - Facteur de sécurité	10
3.7. Les méthodes d'analyse de stabilité	13
3.7.1. Les méthodes d'équilibre	13
3.7.2. La méthode des éléments finis	17
3.7.3. Le calcul des probabilités	18
4. LE TERRIL DES I.C.S.	19
4.1. Observations générales	19
4.2. Sol de fondation	20
4.3. Incidents constatés	20
5. LE PHOSPHOGYPSE DES I.C.S.	22
5.1. Composition chimique	22
5.2. Identification géotechnique	23

5.2.1. Teneur en eau	23
5.2.2. Analyse granulométrique par tamisage	23
5.2.3. Analyse granulométrique par sédimentométrie	23
5.2.4. Poids spécifique des grains ( $G_s$ )	24
5.2.5. Limites d'ATTERBERG	24
5.2.6. Essais de compactage PROCTOR	24
5.2.7. Densités in situ	25
5.2.8. Degrés de compaction sur le terril	25
5.2.9. Indice des vides - Porosité	26
5.2.10. Coefficient de perméabilité (K)	26
5.2.11. Résistance au cisaillement	26
6. LE CALCUL DE LA STABILITE DU TERRIL	28
6.1. Description du programme	28
6.1.1. Caractéristiques et possibilités	29
6.1.2. Entrée des données	30
6.2. Calculs	30
6.2.1. Tests de validation	30
6.2.2. Hypothèses de calcul	31
7. RECOMMANDATIONS ET CONCLUSION	38
BIBLIOGRAPHIE	41
ANNEXES	42
- Résultats des essais de laboratoire	42
- Calculs des facteurs de sécurité	58
- Relevés topographiques	76
- Manuel d'utilisation du programme	81
- Essais de validation du programme	87

## LISTE DES FIGURES ET TABLEAUX

### FIGURES

- Fig. 2.1. : Procédé d'obtention du phosphogypse
- Fig. 3.1. : Schéma de glissement de terrain
- Fig. 3.2 : Schéma de JANBU
- Fig. 3.3 : Schéma de BISHOP
- Fig. 5.1 : Résistance au cisaillement en fonction de la teneur en eau
- Fig. 6.1 : Schéma d'orientation des axes
- Fig. 6.2 : Schéma de la géométrie du terril
- Fig. 6.3 : Influence de la cohésion sur le facteur de sécurité

### TABLEAUX

- Tableau 3.1 : Forces agissant sur une tranche d'un massif
- Tableau 5.1a: Composition chimique du phosphogypse de Taïba
- Tableau 5.1b: Teneurs maximales en sels solubles des éléments ayant un caractère toxique contenu dans le phosphogypse
- Tableau 5.2 : Résistance au cisaillement en fonction de la teneur en eau
- Tableau 6.1. : Tableau de synthèse des calculs raffinés

# I. INTRODUCTION

---

L'étude de la stabilité d'une structure en terre soumise à des efforts externes et/ou internes constitue un des problèmes majeurs qui se posent à l'Ingénieur de la Mécanique des Sols. La difficulté d'arriver à des résultats certains tient à ce que les méthodes de calculs employées sont basées sur des expériences faites sur des échantillons plus ou moins représentatifs. D'autre part, ces résultats "erronés" constituent ensuite des données de base pour l'emploi de relations et formules qui sont elles-mêmes modélisées par suite d'hypothèses simplificatrices pour une meilleure adaptation aux modèles mathématiques.

Or le sol d'une façon générale, et à fortiori le phosphogypse, - qui n'est pas un sol -, dont le comportement est aléatoire, ne pourraient avoir des caractéristiques physiques et mécaniques qui obéiraient à ces équations et formules parfaitement établies.

Conscients de tout cela, nos grands mécaniciens des sols - TERZAGHI, PECK, BISHOP... - ont pensé, pour raison de prudence, introduire dans leurs formules un facteur de sécurité ou comme le dirait le Professeur Recordon, "un coefficient d'ignorance":

Mais malgré l'introduction de ce facteur, les ingénieurs de sols ne sont pas au bout de leurs peines. En effet selon les méthodes de calculs utilisées, les valeurs du facteur de sécurité varient. En ce qui concerne les talus, problème qui nous intéresse présentement, les valeurs minimales nécessaires pour leur stabilité sont dictées par l'expérience. Des auteurs préconisent l'intervalle de 1.30 à 1.60.

Un facteur non moins important à intégrer dans ce genre d'étude est la hauteur du terril. Pour s'en convaincre, revenons à la définition même des terrils. Les terrils sont des accumulations de matériaux - généralement granulaires - dont on augmente constamment

la hauteur par apport de nouveaux matériaux. C'est donc dire que l'étude de la stabilité des talus des terrils se ramène à un problème d'extrapolation.

Dès lors on pourrait penser - et ceci paraît logique - que si la pente d'un terril reste constante, sa stabilité diminue au fur et à mesure qu'augmente sa hauteur. Il nous appartient donc de déterminer la hauteur critique à laquelle la stabilité du terril n'est plus assurée.

Les calculs qui consistent à déterminer le facteur de sécurité minimum et la hauteur critique sont extrêmement longs et fastidieux. Le traitement de ces calculs sur ordinateur nous permet de surmonter ces difficultés.

## 2. LE RESIDU PHOSPHOGYPSE

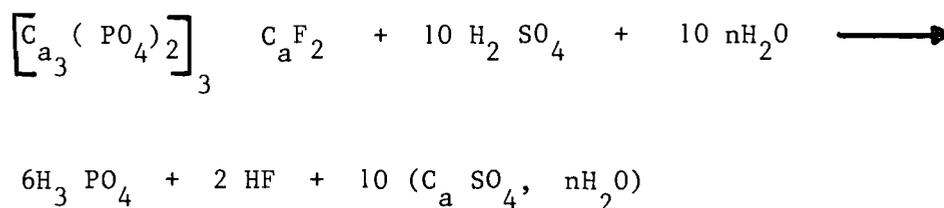
---

### 2.1 - OBTENTION

---

L'industrie des engrais par soucis d'obtenir des produits plus concentrés est amenée à produire de l'acide phosphorique ( $H_3PO_4$ ) en traitant le phosphate de calcium naturel ( $[Ca_3(PO_4)_2]_3CaF_2$ ) par l'acide sulfurique ( $H_2SO_4$ ). Dès lors on a vu apparaître un sous-produit, un résidu : le phosphogypse. C'est un sulfate de calcium hydraté de formule générale  $CaSO_4, nH_2O$ .

L'équation générale de la réaction chimique s'écrit :



Le nombre n varie suivant les trois principaux procédés d'obtention de l'acide phosphorique par traitement des phosphates par l'acide :

- n = 2 si procédé au dihydrate (cas des I.C.S.) ;
- n = 1/2 si procédé à l'hémidrate ;
- n = 0 si procédé à l'anhydrite.

### 2.2 - CARACTÉRISTIQUES

---

Après filtrage, le phosphogypse se présente sous la forme d'un sable humide très fin dont les caractéristiques dépendent essentiellement de l'origine du minerai utilisé et du procédé d'attaque.

## 2.2.1 - CARACTERISTIQUES PHYSICO-CHIMIQUES

---

- . Morphologie cristalline : On distingue quatre formes caractéristiques dépendant du minerai et du procédé :
  - . cristaux acidulaires ;
  - . cristaux tabulaires ;
  - . cristaux compacts ;
  - . agrégats polycristallins.
  
- . Acidité du phosphogypse, un pH de 2 à 3 environ

## 2.2.2 - FORMES DE REJET

---

Après filtration, le phosphogypse peut connaître trois destinations :

- rejet en mer ou en rivière
- réutilisation
- mise en terril.

## 2.3 - PROBLEMATIQUE :

---

La production d'une seule tonne d'acide phosphorique entraîne ipso facto l'obtention de cinq tonnes de phosphogypse. (voir figure 2.1)

Au regard des grandes quantités produites de phosphogypse à travers le monde (75 millions de tonnes en 1976) et des différentes formes de rejet, on peut, d'ores et déjà, dire que le problème du phosphogypse ne se pose pas seulement aux I.C.S. En effet les rejets en mer ou en rivière ne manquent pas de poser la question bien connue de la pollution entraînant la destruction de la faune et de la flore aquatiques. Concernant la réutilisation, d'importants programmes de recherche sont menés dans plusieurs laboratoires dont le Laboratoire Central des Ponts

et Chaussées de France, (L.C.P.C.). Toujours dans l'objectif de sa réutilisation, une session spéciale a été consacrée au phosphogypse lors du Colloque International sur l'utilisation des sous-produits et déchets industriels dans le génie civil (Paris, Nov. 1978). Le but principal de cette future réutilisation du phosphogypse est de minimiser les coûts de production de l'acide phosphorique.

Quant à la mise en terril, elle n'est pas sans poser le problème de la pollution environnementale vu les gros volumes de phosphogypse encombrant la nature. Il y a également le problème de la stabilité générale (fondations et talus) du terril qui n'est pas des moindres car la sécurité des hommes et des équipements environnants est menacée.

Il va sans dire que la réutilisation résoudrait tous ces problèmes de pollution et d'insécurité.

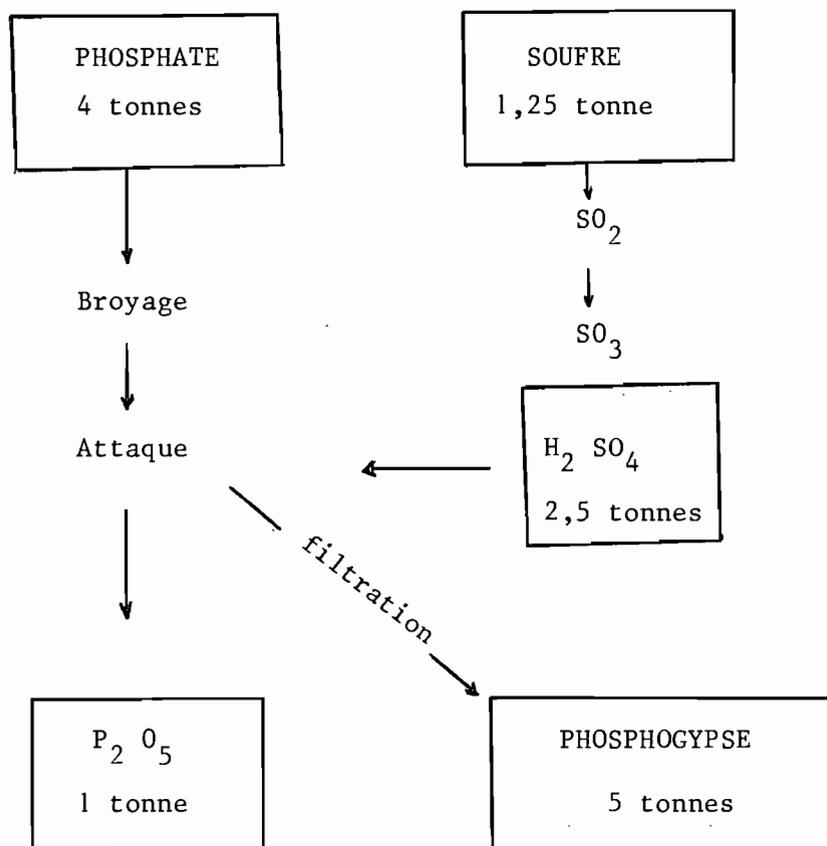


Fig. 2.1

### 3: LA STABILITE DES TALUS

---

#### 3.1 - IMPORTANCE

La question de la stabilité des pentes données aux terrains est d'importance capitale dans tous les travaux relevant de la construction des routes, de barrage en terre, de digues, de canaux, de terrils etc...

Ce problème, qui a l'origine n'intéressait que l'urbaniste lorsque celui-ci était amené à choisir un terrain pour but de construction, a pris une grande ampleur lorsque des incidents majeurs se sont produits à travers le monde pour cause d'instabilité de talus. Dès lors, il a de beaucoup dépassé le domaine d'activité de l'urbaniste.

C'est ainsi que des colloques se sont tenus à BOLKESJO (Norvège - 1969), à PURDUE UNIVERSITY (U.S.A. - 1972) pour discuter de ce problème. Une attention toute particulière en a été donnée au 8e Congrès International de Moscou (U.R.S.S.). En France le Groupe d'Etudes des Talus (G.E.T.) dont la création remonte à 1965 a fait appel à plusieurs disciplines, car les recherches menées dans le domaine de la stabilité des talus ont été marquées par la nécessité d'associer des sciences différentes (Mécanique des Sols, Géologie, Hydrogéologie, Informatique...).

La multiplicité des colloques et réunions à ce sujet, la diversité des disciplines dont il fait appel sont, à notre humble avis, une preuve que le problème de la stabilité des talus est d'importance vitale.

## 3.2 - LES MOUVEMENTS DE TERRAIN

### 3.2.1. - NATURE

Les mouvements de terrain sont soit effectifs, soit potentiels. Ce qui nous préoccupe dans cette étude évidemment, c'est sans nul doute les mouvements potentiels car, pour les premiers types de mouvements l'irréparable est déjà fait. C'est donc dire que cette étude doit nous conduire à trouver le mouvement le plus probable, celui correspondant à la sécurité au glissement la plus faible.

### 3.2.2. - CAUSES

On distingue :

- . Les ruptures dues à un déséquilibre entre les moments moteur et résistant ;
- . les ruptures entraînées par les modifications des caractéristiques géotechniques du matériau ;
- . les ruptures provoquées par les modifications des conditions hydrauliques ;
- . les ruptures dues à une géométrie inappropriée.

## 3.3 - LES PARAMÈTRES

Les paramètres à considérer lors d'une analyse de stabilité de pente sont de 2 catégories :

- les paramètres externes ;
- les paramètres internes.

### 3.3.1 - LES PARAMÈTRES EXTERNES

Il s'agit :

- de la géométrie du massif (hauteur, pente)
- des efforts s'exerçant sur le massif : constructions, machines, dépôt de matériaux...

### 3.3.2 - LES PARAMÈTRES INTERNES

Il s'agit :

- des efforts s'exerçant dans le massif dus à la masse des matériaux et aux écoulements souterrains ;
- de la résistance au cisaillement des différentes couches de matériaux rencontrés.

## 3.4 - L'INFLUENCE DE L'EAU

Un massif de sol pose un problème de stabilité lorsque les efforts extérieurs provoquent des contraintes de cisaillement plus grandes que la résistance au cisaillement du sol. Il y a alors risque de rupture suivant la surface de résistance minimale. Cette résistance au cisaillement est beaucoup affectée par la présence d'eau dans le massif. Il est vérifié expérimentalement que la résistance au cisaillement d'un sol diminue, pour une même compacité, lorsque sa teneur en eau augmente. Le cas très particulier du phosphogypse sera traité en page 26.

## 3.5 - LES FORCES EN JEU

Isolons une tranche verticale découpée dans un massif en glissement avec une surface de rupture quelconque. Les forces agissant sur cette tranche sont énumérées dans le tableau suivant :

## Forces agissant sur la tranche

	Genre	Calcul
P	Surcharge verticale <sup>1)</sup> sur la tranche	$P = p \cdot x$
W	Poids propre total	$W = x(\gamma_1 \cdot h_1 + \gamma_2 \cdot h_2 + \gamma_3 \cdot h_3)$
R'	Réaction du sol sur A-B (force de cohésion non comprise)  R' peut être décomposée en deux forces:  N' ⊥ à la surface de glissement (correspond aux contraintes normales effectives)  T ∥ à la surface de glissement (traduit la résistance par frottement seule, c'est-à-dire sans la cohésion)	A l'état d'équilibre limite, on a:  $N' = R' \cdot \cos \phi'$ $= (W + P) \cos \alpha - U_{A-B}$  $T = R' \cdot \sin \phi' = N' \cdot \operatorname{tg} \phi'$ $= [(W + P) \cos \alpha - U_{A-B}] \operatorname{tg} \phi'$
U <sub>A-B</sub>	Résultante des pressions interstitielles sur la surface de glissement	$U_{A-B} = b \cdot \gamma_w \cdot h_3 \cdot \cos^2 \alpha$ $= x \cdot \gamma_w \cdot h_3 \cdot \cos \alpha$
C	Forces de cohésion sur la surface de glissement	$C = c' \cdot b = c' \cdot x \cdot \frac{1}{\cos \alpha}$
E <sub>i</sub> , E <sub>i+1</sub>	Forces latérales agissant entre les tranches	E <sub>i</sub> , E <sub>i+1</sub> = sommes des poussées des terres et des poussées de l'eau sur les faces des tranches

1) La surcharge peut aussi être inclinée (exemple: ancrage).

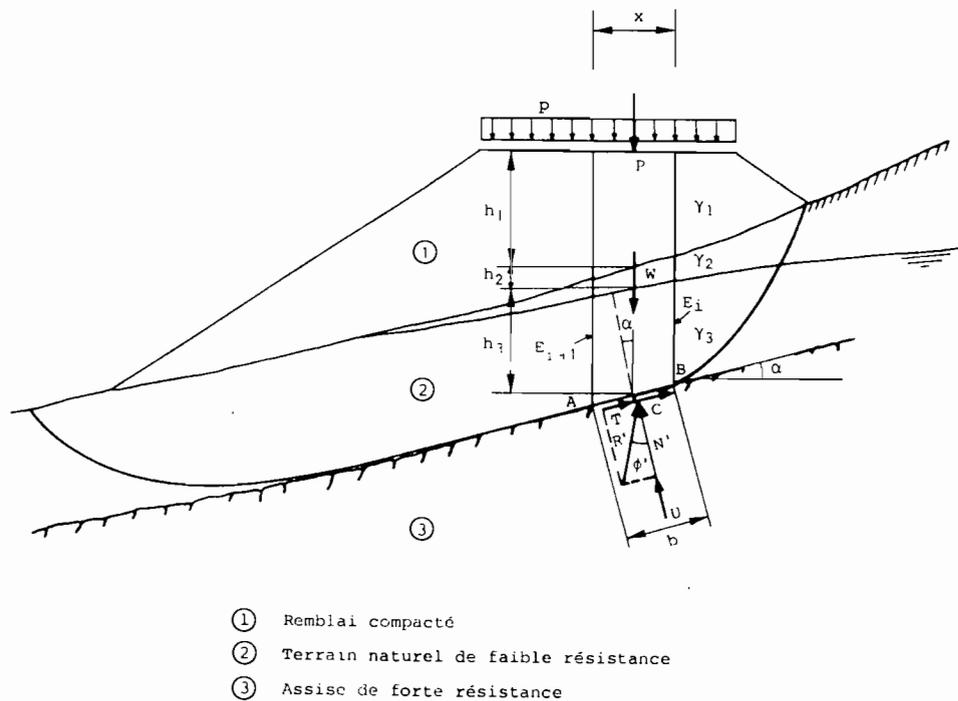


tableau 3.1 - (Réf. 3 Recordon)

### 3.6 - RÉSISTANCE AU CISAILLEMENT

#### - FACTEUR DE SÉCURITÉ

Dans le cadre de cette étude de stabilité, une attention toute particulière est portée à cette section. En effet c'est dans les phénomènes de stabilité (talus, fondation) que la détermination de la résistance au cisaillement des sols trouve sa principale raison d'être.

Pour s'en convaincre, regardons la figure ci-après montrant une structure construite sur un terrain présentant un angle  $\beta$  avec l'horizontale. S'il y a glissement du massif, il se fera suivant un arc de cercle de centre  $O$  et de rayon  $r$ . (hypothèses simplificatrices)

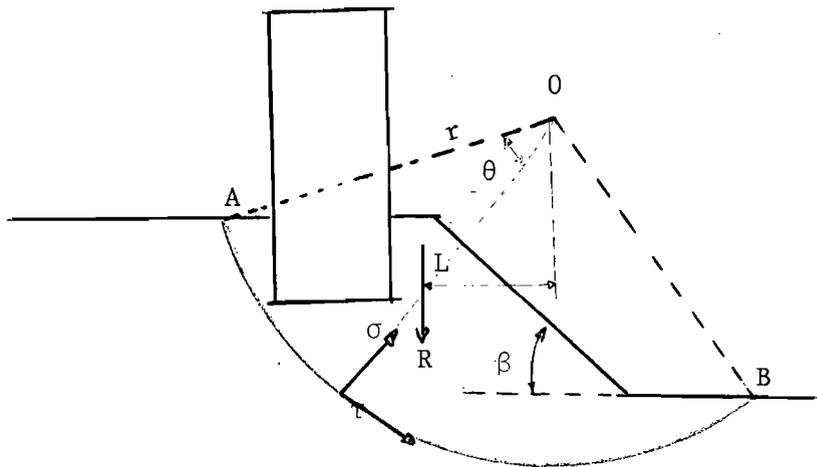


Fig. 3.1

Lorsque le glissement est sur le point de se produire, nous pouvons exprimer cet état d'équilibre par l'égalité des moments moteur et résistant par rapport au point  $O$ . Soit :

$$R L = \int_{\theta_A}^{\theta_B} \tau \cdot r^2 \, d\theta \quad (3.1)$$

où  $R$  = Résultante des poids de la structure et des matériaux sus-jacents ;

$\tau$  = Contrainte tangentielle de la réaction du sol en chaque point de l'arc AB.

Mais dans la pratique courante, eu égard aux difficultés inhérentes à la détermination des contraintes  $\tau$  régnant en tout point d'un massif susceptible de rompre, on fait une hypothèse selon laquelle la rupture est imminente. On introduit ainsi un coefficient dit de sécurité pour assurer la bonne tenue de l'ouvrage. Tout ceci pour but de calcul.

Ainsi on définit le facteur de sécurité comme étant le rapport du moment résistant au moment moteur. Soit :

$$\text{F.S.} = \frac{\int_{\theta_A}^{\theta_B} \tau \cdot r^2 \cdot d\theta}{R \cdot L} \quad (3.2)$$

Or  $ds = r \cdot d\theta$

et d'après la loi bien connue de Coulomb

$$\tau = C + \sigma \operatorname{tg} \phi$$

où  $C$  = cohésion du matériau ;

$\sigma$  = contrainte normale de la réaction du sol au point considéré ;

$\phi$  = angle de frottement interne du matériau.

L'expression du facteur de sécurité s'écrit donc :

$$F.S. = \frac{r}{R.L} \int_A^B (C + \sigma \operatorname{tg} \emptyset) ds \quad (3.3)$$

A chaque arc de cercle correspond évidemment un facteur de sécurité. On itère l'opération pour divers cercles, obtenant ainsi plusieurs facteurs de sécurité. Parmi ces valeurs, la plus faible indique le cercle de rupture le plus probable.

Une valeur du facteur de sécurité égale 1.0 définit l'équilibre limite du massif. La rupture est donc imminente.

Il va sans dire que dans la pratique, l'équation (3.3) n'est jamais utilisée sous sa forme ci-dessus indiquée. L'intégration est remplacé par une sommation finie.

#### Détermination des caractéristiques C et $\emptyset$ .

La détermination de la cohésion et de l'angle de frottement interne peut se faire soit en laboratoire, soit in situ.

Les essais les plus courants sont exécutés en laboratoire soit à l'aide de la boîte de Casagrande, soit avec l'appareil triaxial. Ainsi il existe 3 manières d'effectuer les essais :

1. Les essais lents consolidés : il y a consolidation préalable du matériau et variation de sa teneur en eau lors de l'essai ;
2. Les essais rapides consolidés : ce sont des essais à vitesse rapide avec consolidation préalable mais la teneur en eau reste pratiquement constante ;

3. Enfin les essais rapides non consolidés où la teneur en eau de l'échantillon reste également constante depuis l'application de la charge jusqu'à la fin de l'essai.

Pour conclure cette section relative à la résistance au cisaillement disons que la détermination des caractéristiques mécaniques  $C$  et  $\phi$  des matériaux est promordiale en Mécanique des Sols appliquée.

Ainsi une conférence s'est tenue à ce sujet en 1960 à l'Université de Colodaro (U.S.A.)

### 3.7 - LES MÉTHODES D'ANALYSE DE STABILITÉ

Nous n'avons nullement la prétention de donner une liste exhaustive de toutes les méthodes d'analyse de stabilité. Nous ne ferons que citer les méthodes les plus usuelles, d'une part, et les plus récentes, d'autre part, développées par les théoriciens et praticiens de la Mécanique des Sols appliquée.

De nombreuses méthodes ont été développées pour calculer le facteur de sécurité dont nous avons donné l'expression très générale en équation (3.3). Ces méthodes vont du coin de Coulomb (1776) jusqu'à la méthode plus récente des éléments finis de Clough (1960) en passant par celle des tranches devenue classique (Caquot - 1934 et Bishop - 1955).

Malgré la gamme très variée de ces méthodes, celle des tranches demeure en pratique plus accessible aux ingénieurs de Sol.

#### 3.7.1 - LES MÉTHODES D'ÉQUILIBRE OU CLASSIQUES

Ces méthodes sont basées sur une hypothèse fondamentale selon laquelle la rupture se produirait simultanément en tous les points de la surface de glissement. Dans les massifs homogènes, la directrice de cette surface est assimilée à un cercle. Quant aux massifs hétérogènes, la forme de la surface de glissement est intimement liée au degré d'hétérogénéité.

La méthode des tranches : La masse "instable" est divisée en tranches dont on étudie simultanément l'équilibre.

Les principales variantes de cette méthode sont celles de JANBU (1954) et de BISHOP (1955)

- JANBU : hypothèse
- . le massif est rigide-plastique ;
  - . le calcul est bidimensionnel ;
  - . le calcul de la stabilité est basée sur
 
$$\Sigma F_x = 0 \quad ; \quad \Sigma F_y = 0 .$$

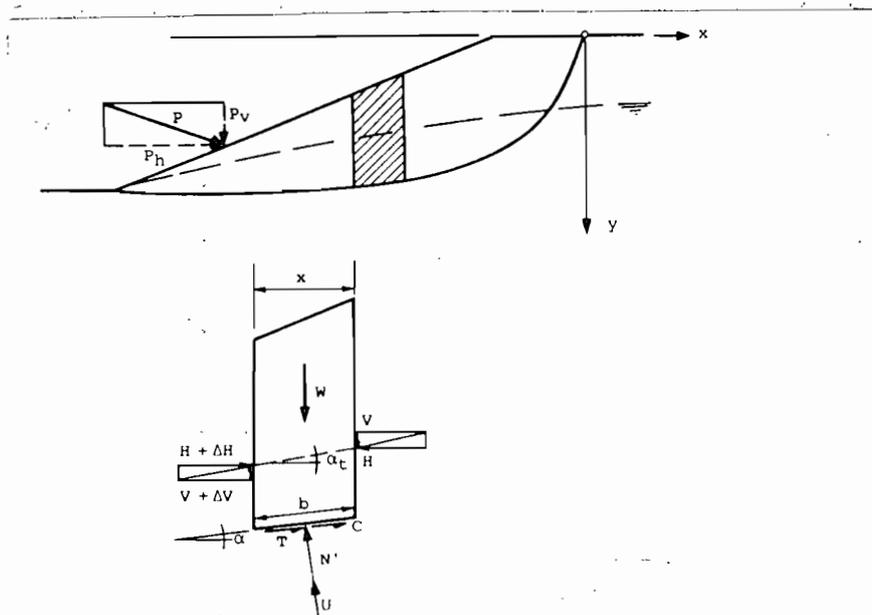


Fig. 3.2

(Réf. 3 : Recordon)

formule générale :

$$F.S = \frac{\Sigma(c' + (p + t - u) \operatorname{tg} \phi' \frac{1}{n_\alpha} \cdot x}{P_h + \Sigma(p + t) \operatorname{tg} \alpha \cdot x}$$

formule simplifiée :

$$F.S = \frac{\sum (c' + (p - u) \operatorname{tg} \phi') \frac{1}{n_{\alpha}} \cdot x}{P_h + p \cdot \operatorname{tg} \alpha \cdot x}$$

où

$$c' = \frac{W + P_v}{x} \quad \text{avec } W, P_v, x \text{ indiqués sur la figure}$$

$$t = - \frac{\Delta V}{x} \quad \text{et } x = b \cdot \cos \alpha$$

$\phi'$  = angle de frottement interne effectif ;

$u$  = pression interstitielle ;

$$n_{\alpha} = \cos^2 \alpha (1 + \operatorname{tg} \alpha \cdot \operatorname{tg} \phi' | F.S)$$

BISHOP : hypothèse . La surface de glissement est circulaire.

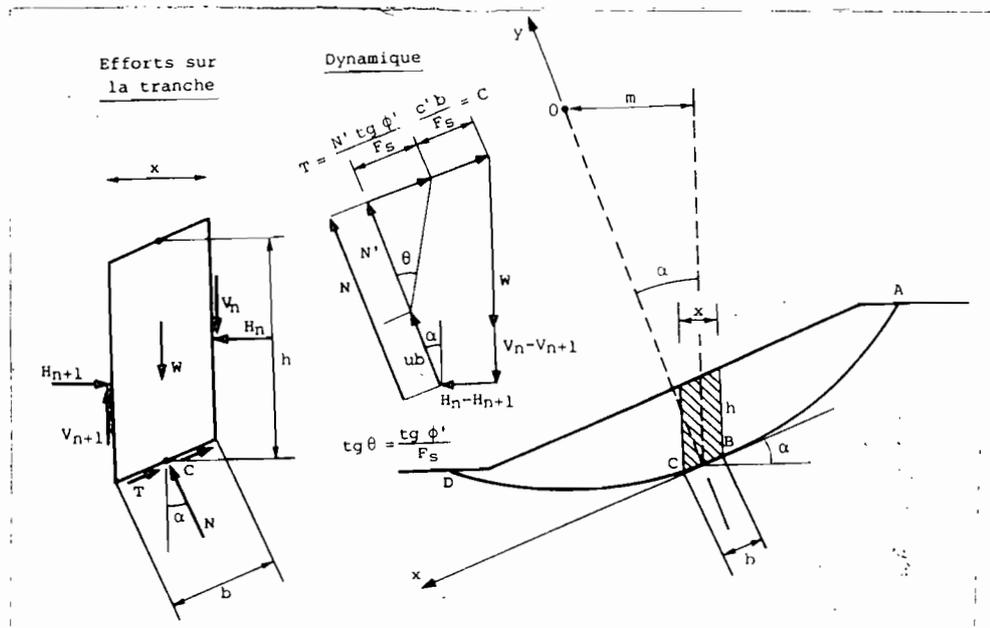


Fig. 3.3

(Réf. 3 : Recordon)

formule générale :

$$F.S. = \frac{\sum (C_i X_i + (W_i + (V_n - V_{n+1}) - U_i X_i) \operatorname{tg} \phi_i)}{\sum W_i \cdot \sin \alpha_i} \cdot \frac{1}{m_\alpha}$$

formule simplifiée :

$$F.S. = \frac{\sum C_i X_i + (W_i - U_i X_i) \operatorname{tg} \phi_i}{W_i \cdot \sin \alpha_i} \cdot \frac{1}{m_\alpha}$$

où  $C_i$  = cohésion effective dans la tranche  $i$  ;

$X_i, W_i, V_n, V_{n+1}, \alpha_i$  sont indiqués sur la figure;

$U_i$  = pression interstitielle dans la tranche  $i$  ;

$\phi_i$  = angle de frottement interne dans  $i$  ;

$m_\alpha = \cos \alpha_i (1 + \operatorname{tg} \alpha_i \cdot \operatorname{tg} \phi_i / F_S)$

Les formules de JANBU et de BISHOP étant implicites (F.S. dans les deux membres), la détermination du F.S. se fait par itération. On suppose une valeur initiale de F.S. ce qui permet de trouver une deuxième valeur. On réinstroduit cette nouvelle valeur dans l'équation et ainsi de suite.... jusqu'à la convergence des valeurs (n-1) et (n).

#### Autres méthodes des tranches

FELLENIOUS - PETERSON (1948) : Même hypothèse que Bishop mais la résultante des forces intertranches est parallèle à la ligne de glissement. Les facteurs de sécurité obtenus sont généralement légèrement inférieurs à ceux de Bishop.

MORGENSTERN-PRICE (1965) : Même hypothèse que Janbu mais la ligne d'action des forces intertranches peut-être quelconque. Les calculs sont laborieux, même sur ordinateur !

FRONTARD (1972) : Cette méthode considère le sol purement cohérent ( $\phi = 0$ ) et une rupture progressive du massif. Ainsi la hauteur limite  $H$ , d'un talus de pente  $\beta$  limitant un massif de cohésion  $C$  et de poids volumique  $\gamma$  vaut :

$$H = \frac{C}{\gamma} (2 + \pi - 2\beta)$$

C'est une méthode très limitative donc rarement utilisée.

Toujours dans la série des méthodes dites classiques, il y a celles développées par BIAREZ d'une part, et par TAYLOR et CAQUOT d'autre part. Ces méthodes ont donné lieu à de très nombreux abaques qui existent dans la littérature. Du reste, ces abaques n'ont pour but que de dégrossir les problèmes d'une certaine façon. Bien souvent les valeurs des paramètres à utiliser se situent entre ou hors des valeurs déjà tabulées. Dans ces cas il faut faire alors des interpolations ou extrapolations linéaires respectivement.

### 3.7.2 - LA MÉTHODE DES ÉLÉMENTS FINIS

Développée par CLOUGH (1960) dans le domaine des structures et de l'aérospatiale, cette méthode a fait ses preuves en Génie Civil d'une façon générale et se développe actuellement en Géotechnique.

Cette méthode permet de déterminer :

- les effets et les déformations au sein d'un massif quelconque ;
- le développement des zones à l'état de rupture ;
- le coefficient de sécurité moyen le long d'une surface arbitraire, par sommation de la forme :

$$F.S = \sum \frac{\tau_{\max i}}{\tau_i}$$

où  $\tau_{\max i}$ ,  $\tau_i$  étant respectivement la résistance au cisaillement et la contrainte de cisaillement le long de la surface considérée, dans l'élément d'ordre  $i$ , qu'elle traverse.

Le calcul par cette méthode considère une plastification progressive du sol ; en sus il faut une définition de la loi de comportement du sol (déformabilité, résistance au cisaillement etc.).

### 3.7.3 - LE CALCUL DES PROBABILITÉS

C'est une méthode qui à l'heure actuelle suit son petit bonhomme de chemin ; disons qu'elle a un avenir prometteur. Pour s'en convaincre, il se suffit de se rappeler qu'en Géotechnique, nous travaillons avec un matériau dont les caractéristiques ne sont que des variables aléatoires.

En guise de conclusion sur les méthodes d'analyse de stabilité, disons que les méthodes classiques donnent des facteurs de sécurité de même ordre de grandeur, mais encore plus rapidement que la méthode des éléments finis.

A ce propos,, DUCAN (1972) disait :

"Tandis que la méthode des éléments finis a prouvé son efficacité pour l'étude des structures locales, elle est moins utile pour l'étude des problèmes de stabilité des pentes. Les résultats obtenus par cette méthode appliquée à l'analyse de stabilité ne sont pas sensiblement meilleurs que ceux que donnent les méthodes précises d'équilibre limite, et les calculs par éléments finis sont consommateurs de temps".

## 4. LE TERRIL DES I.C.S.

---

### 4.1 - OBSERVATIONS GÉNÉRALES

---

**SITE :** Il s'agit d'un immense tas de phosphogypse implanté à proximité de l'usine, à quelques 200 m côté sud de celle-ci. Il est mis en oeuvre par voie sèche à l'aide d'un convoyeur au rythme de 3 000 tonnes par jour. Après dépôt du phosphogypse par le convoyeur, des bull-dozers sont chargés de l'étaler et permettant ainsi un léger compactage par leur mouvement de va et vien sur le terril.

**GÉOMÉTRIE :** La détermination de la géométrie s'est faite à l'aide de relevés topographiques et de prises photographiques. Les relevés topographiques ont permis de tracer des courbes hypométriques (voir annexe III) obtenues à partir des côtes d'altitude relevées sur le terril à l'aide des instruments de topométrie classiques.

Le cheminement s'effectue selon un polygone, en prenant des visées d'élévation, à partir des stations du polygone, sur des points identifiés par :

- un azimut ;
- une distance prise à la stadia ;
- un angle de visée vertical.

Les lectures à la stadia ainsi que les angles verticaux ont servi à calculer les distances horizontales et les différences d'élévation. L'élévation de chaque point est calculée à partir de la hauteur de la station d'observation et de la différence d'élévation.

Après le tracé des courbes hypométriques, différentes coupes ont été exécutées (voir annexe III) pour déterminer la pente longitudinale et les pentes transversales. Une pente longitudinale d'environ 1 : 10 est aménagée pour permettre la pose des rails où circule le convoyeur. Les pentes transversales, de l'ordre de 1 : 1,4, présentent

à certains endroits quelques irrégularités. La hauteur maximale et la longueur du terril sont de l'ordre de 32 m et 350 m respectivement (Janvier 1985). Selon les responsables du terril, cette hauteur devrait être portée à 70 m environ. A partir de cette hauteur la mise en oeuvre se poursuivrait sur une distance de 2 000 m.

#### 4.2 - SOL DE FONDATION

En l'absence de données relatives au sol de fondation du terril nous avons réalisé un échantillonnage à une profondeur de 1.5 m environ pour des essais d'identification.

De 0 à 0,40 m, on a constaté la présence d'un sable gris, couleur due probablement à la couverture végétale.

De 0,40 à 1,50 m, nous avons toujours un sable mais de couleur rougeâtre. Une étude faite en laboratoire montre que, malgré la différence de couleur, ces sables ont les mêmes propriétés géotechniques et mécaniques.

Il s'agit d'un sable silteux. Des essais de casaillement rectiligne à la boîte de Casagrande donnent les résultats ci-après :

- . cohésion  $C = 0$
- . angle de frottement interne  $\psi = 35^\circ$

#### 4.3 - INCIDENTS CONSTATÉS

- . Sur les pentes, il a été constaté des fissures pouvant atteindre quelques cm de largeur et quelques dizaines de cm de profondeur ;
- . à l'endroit où est implanté le "Stacker" des tassements différentiels très importants ont fait signe. Ils ont d'ailleurs provoqué la mise hors service <sup>du</sup> convoyeur pour quelques jours ;

- . Du côté ouest de la base du terril stagne une eau en provenance de l'usine, pouvant de ce fait affecter la stabilité générale (talus et fondations) du dit terril.

Ce sont ces incidents remarqués qui constituent, du reste, la raison fondamentale de cette étude.

## 5. - LE PHOSPHOGYPSE DES I.C.S.

### 5.1 - COMPOSITION CHIMIQUE

Le procédé de fabrication est au dihydrate. (n = 2).

Formule chimique :  $\text{Ca SO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$

Des analyses chimiques réalisées au Laboratoire Central des Ponts et Chaussées de PARIS sur le phosphogypse de Taïba ont donné lieu aux résultats ci-après.

Composition chimique du phosphogypse  
de Taïba (Sénégal) (%)

Échantillon	Sulfate	Calcium	Phosphate	Fluorure	Perte au feu*	Pureté en $\text{Ca SO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	pH
n° 1	45,0	33,1	0,19	0,7	15,2	98,8	5,5
n° 2	45,1	32,2	0,11	0,79	16,0	97,8	
n° 3	45,6	32,7	0,24	0,79	15,0	99,0	

\* Considérée comme eau de cristallisation (température > 60 °C)

Tableau - 5.1.a

**Teneurs maximales en sels solubles des éléments ayant un caractère toxique, contenus dans le phosphogypse (ppb ou µg/l)**

Éléments	Sénégal			Normes		Togo		
	pH = 3	pH = 5,5	pH = 7	Potabilité	Rejet	pH = 3	pH = 5,5	pH = 7
Co	-	-	-	1 000	-	200	100	10
V	abs.	abs.	abs.	10	-	230	200	abs.
As	-	-	-	50	-	6	5	9
Cu	59	19	24	50	-	55	30	25
Cr (total)	18	6	4	50	100	90	30	30
Pb	4	4	5	50	100	22	24	40
Ni	-	-	-	1 000	-	295	190	80
Hg	9	1,34	0,92	1	-	15	35	15
Cd	11	28	7	5	3 000	113	43	2
F	$17 \cdot 10^4$	$19 \cdot 10^3$	$17 \cdot 10^3$	$10^3$	$15 \cdot 10^3$	$261 \cdot 10^3$	$10^5$	$25 \cdot 10^3$
PO <sub>4</sub>	-	$37 \cdot 10^3$	$23 \cdot 10^3$	$5 \cdot 10^3$	-	-	$73 \cdot 10^3$	$79 \cdot 10^3$

Tableau - 5.1.b - (Réf. 1 : le Phosphogypse - L.C.P.C.)

## 5.2 - IDENTIFICATION GEOTECHNIQUE

---

### 5.2.1 - TENEUR EN EAU

---

Au regard du caractère hydraté de la molécule de phosphogypse ( $\text{Ca SO}_4, 2\text{H}_2\text{O}$ ), il est recommandé de soumettre les échantillons à un séchage de 72 Heures dans une étuve à  $40^\circ\text{C}$  seulement ; ceci pour éviter d'attaquer l'eau de constitution de la dite molécule.

Des essais réalisés par cette méthode sur des échantillons apportés par les I.C.S. donnent une moyenne de 23,5 % comme teneur en eau.

Cependant pour les essais subséquents où interviennent les déterminations de teneur en eau, il a été préférable de les réaliser par la méthode standard i.e  $105^\circ\text{C}$  à l'étude pendant 24 heures compte tenu du temps que la première façon de faire exige. Ainsi dans cette méthode standard il faudrait tenir en compte <sup>de</sup> la masse d'eau constitutionnelle dans les calculs. En fait il ne s'agit que d'une simple règle de trois !

### 5.2.2 - ANALYSE GRANULOMÉTRIQUE PAR TAMISAGE

---

Cette analyse s'est montrée irréalisable sur le phosphogypse à cause du caractère extrêmement fin de celui-ci. Le matériau passe au tamis N° 200 A.S.T.M.

### 5.2.3 - ANALYSE GRANULOMÉTRIQUE PAR SÉDIMENTOMÉTRIE :

---

La méthode sédimentométrique faite avec une solution saturée d'hexamétaphosphate de sodium n'a pas donné de résultats très probants. La vitesse de chute des particules est quasi identique. D'où on en tire que les particules ont pratiquement le même diamètre.

Cependant il faudrait dire que le L.C.P.C. suggère, pour cette analyse de sédimentométrie avec le phosphogypse en particulier, de

prendre la précaution d'utiliser une solution saturée de sulfate de calcium (stock épuisé à l'E.P.T. lors de l'exécution des essais).

#### 5.2.4 - POIDS SPÉCIFIQUE DES GRAINS ( $G_s$ )

La détermination du poids spécifique des grains a été réalisée à la fiole pycnométrique sur plusieurs échantillons. Les résultats des essais indiquent une moyenne de  $2,51 \text{ g/cm}^3$ .

A titre comparatif, celui du gypse naturel est d'environ  $2,30 \text{ g/cm}^3$ .

#### 5.2.5 - LIMITES D'ATTERBERG

La détermination de ces limites s'est avérée irréalisable sur ce matériau. L'absence de toute propriété colloïdale a par ailleurs été confirmée par des valeurs quasiment nulles des mesures d'absorption au bleu de méthylène dans certains laboratoires mieux équipés que le nôtre.

On peut donc en tirer que le phosphogypse ne présente aucun caractère argileux.

#### 5.2.6 - ESSAIS DE COMPACTAGE PROCTOR

PROCTOR normal : L'essai standard (A.S.T.M. D698 : 3 couches avec 25 coups par couche) donne les résultats suivants :

- . Densité sèche maximale  $\gamma_{d \text{ max}} = 14 \text{ kN/m}^3$  ;
- . Optimum Proctor normal  $w_{\text{opt}} (\%) = 18.0$

PROCTOR modifié : Les résultats de l'essai modifié (A.S.T.M (A.S.T.M D 1557 : 5 couches avec 55 coups par couche) sont les suivants :

- . Densité sèche maximale  $\gamma_{d \max} = 17,2 \text{ kN/m}^3$  ;
- . Optimum Proctor modifié  $w_{\text{opm}} (\%) = 7,0$

Le tracé des différentes courbes PROCTOR montre que le comportement au compactage du phosphogypse est entièrement différent de celui des sols.

Les courbes montrés en annexe ne sont que des résultats de plusieurs essais dont nous avons donné l'allure moyenne.

### 5.2.7 - DENSITÉS IN SITU

La réalisation de ces essais a été faite à l'aide de la méthode du sable calibré d'OTTAWA.

- . Densité humide en place sur le terril : elle est de l'ordre de  $16,6 \text{ kN/m}^3$  ;
- . Densité sèche : Le calcul donne une valeur de  $13,6 \text{ kN/m}^3$  ; les essais de teneur en eau réalisés sur place donnant une valeur moyenne de 22,5 %.

### 5.2.8 - DEGRÉ DE COMPACITÉ SUR LE TERRIL

Il se définit comme étant le rapport de la densité in situ sur la densité obtenue sur les essais en laboratoire ; les densités étant les densités sèches.

- . Degré de compacité par rapport au Proctor normal = 97 %
- . Degré de compacité par rapport au Proctor modifié = 79 %

Les résultats de ces essais de compactage laissent prévoir que la mise en oeuvre du phosphogypse dans les remblais routiers, par exemple, posera des problèmes de compactage très sérieux du fait de l'absence de références de compactage précises. Ainsi la caractérisation de l'état du matériau au moment de la mise en oeuvre et le contrôle du compactage ne sont pas aisés.

### 5.2.9 - INDICE DES VIDES-POROSITÉ

Des essais de compressibilité donnent comme valeur de l'indice des vides initial  $e_0 = 1,12$ .

Un calcul donne pour porosité la valeur

$$n = 52,8 \% \quad (n = \frac{e}{1 + e})$$

### 5.2.10 - COEFFICIENT DE PERMÉABILITÉ (K)

Pour des raisons logistiques, les essais de perméabilité n'ont pu être réalisés sur le phosphogypse des I.C.S. Mais la documentation sur ce domaine donne une valeur moyenne du coefficient de perméabilité du phosphogypse de l'ordre de  $4.10^{-3}$  cm | s.

### 5.2.11 - RÉSISTANCE AU CISAILLEMENT - CARACTÉRISTIQUES MÉCANIQUES C ET $\phi$

Les essais de résistance au cisaillement ont été réalisés en laboratoire à l'aide de la boîte de Casagrande. Les types d'essais réalisés sont les essais rapides non consolidés où la teneur en eau des échantillons reste pratiquement constante depuis l'application de la charge jusqu'à la fin des essais.

Sur l'ensemble d'une vingtaine d'essais réalisés, l'angle de frottement interne ( $\phi$ ) varie entre  $27^\circ$  et  $32^\circ$ , avec une moyenne d'environ  $29^\circ$ .

Par contre pour la détermination de la cohésion, il s'est avéré indispensable de réaliser des essais de résistance au cisaillement en fonction de la teneur en eau pour voir comment se comporte la cohésion. C'est ainsi que nous avons effectué les dits essais avec des teneurs en eau respectives de 0, 10, 18, 25, 30 %.

On constate dans un premier temps que lorsque la teneur en eau augmente, il s'ensuit aussi une augmentation de la cohésion. Cette constatation est valable quand les teneurs en eau restent inférieures à une valeur d'environ 25 %. Précisément à 25 % de teneur en eau, la cohésion est d'environ 16 kPa. Par contre à 30 %, elle est réduite à 8 kPa.

Les résultats de la résistance en cisaillement en fonction de la teneur en eau sont résumés dans le tableau ci-après.

Essai #	1		2		3		4		5	
w (%)	0		10		18		25		32	
	$\tau_r$	$\sigma_r$								
	214	361	213	361	208	352	260	352	242	362
	281	419	244	440	252	428	304	412	272	410
	336	476	262	480	260	469	335	464	339	483
C	0		5		12		16		8	
$\phi^\circ$	30.7		31.0		31.0		34.0		33.7	

$\tau_r$ ,  $\sigma_r$  sont les contraintes de rupture en kPa.

Tableau 5.1 2

En traçant les droites de Coulomb  $\tau_r = C + \sigma_r \text{tg } \phi$  (fig. 5.1), on détermine les caractéristiques mécaniques C et  $\phi$  pour les 5 teneurs en eau indiquées dans le tableau ci-dessus.

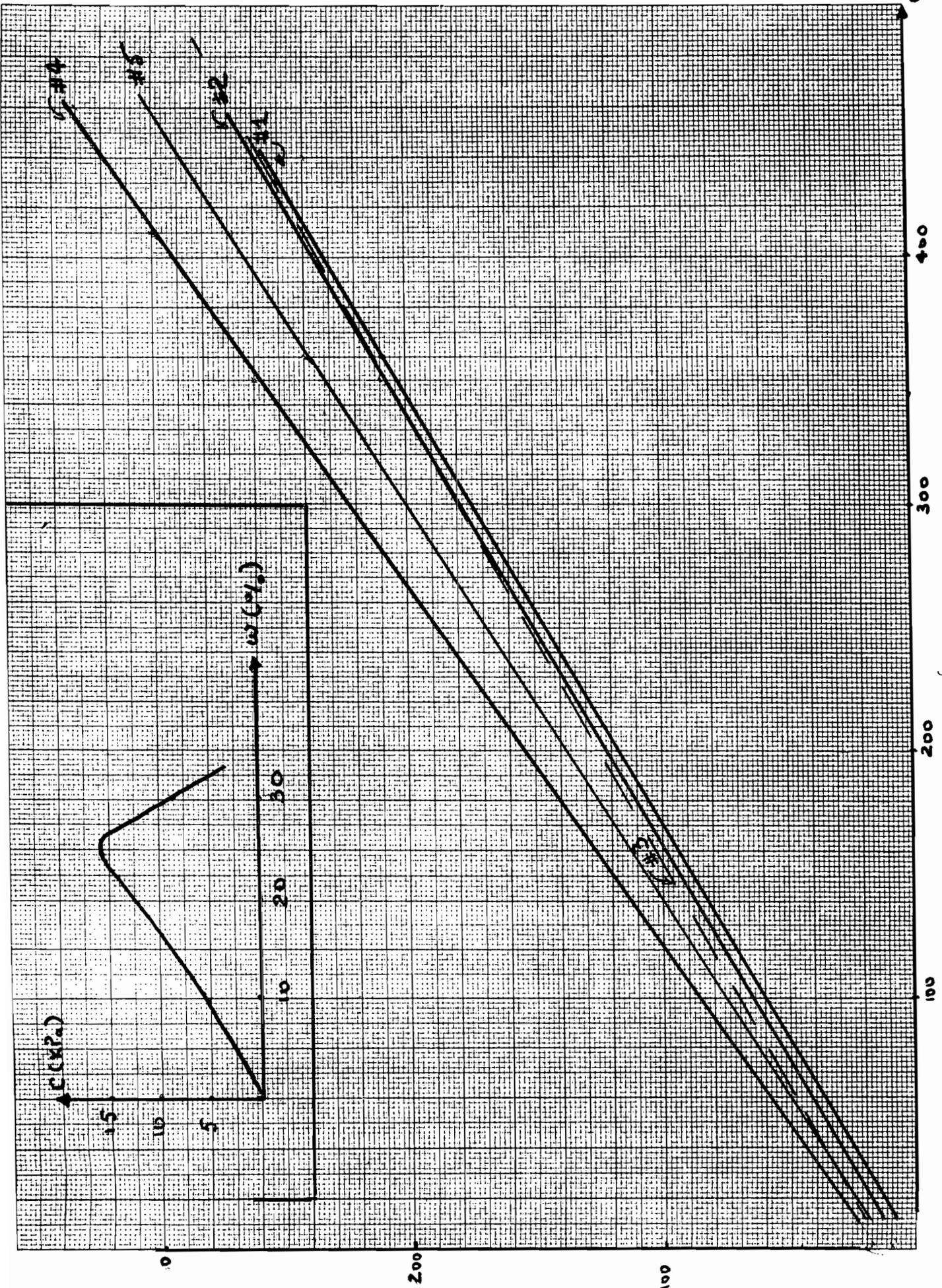


fig. 5.2

## 6. LE CALCUL DE LA STABILITE DU TERRIL

---

En introduction il a été souligné que le calcul de la stabilité des talus demeure un calcul long et fastidieux lorsqu'exécuté à la main.

C'est pour cette raison que des programmes sur ordinateur ont été écrits pour faciliter d'une certaine manière ce travail.

Cependant il faudrait noter, et nous le savons tous, que l'ordinateur n'est qu'un outil de travail pour l'ingénieur. Ainsi donc les résultats dépendent évidemment des hypothèses de départ. Citons à ce propos Cambéfort (1972) qui disait :

"Les calculs sont, bien sûr, toujours exacts. Quand aux hypothèses, on n'en parle pas beaucoup. Peu importe, l'essentiel est d'obtenir un coefficient de sécurité. Et si plusieurs couches compliquent la résolution du problème, on fait appel à la machine électronique qui, elle aussi, calcule juste. Malheureusement elle ne donne à la sortie que ce qu'on a mis à l'entrée !".

Après avoir pris connaissance de l'aspect philosophique du problème posé, revenons à la pratique.

### 6.1 - DESCRIPTION DU PROGRAMME

---

Le programme dont nous nous sommes servis dans la présente étude est dénommé "PROGRAMME STABIL". Le programme original est celui écrit par G. LEFEBRE à l'Université de Californie, Berkeley, en 1971. Ce programme a été modifié par S. CHIRAPUNTU en 1973 et remodifié par R. CHAPUIS en 1974. Il a fait ses preuves dans beaucoup de pays dont la France où le Bureau de Recherches Géologiques et Minières (B.R.G.M.) s'en est servi énormément.

Dans le cadre de notre projet de fin d'études nous avons été amené à transcrire ce programme sur le Microméga 32 de l'E.P.T. avec l'appui de monsieur Michel Bornat, technicien de Mécanique des Sols à l'Ecole. Dans un premier temps il s'agissait de réécrire en français

et ensuite faire les conversions nécessaires pour obtenir des unités en Système International.

### 6.1.1 - CARACTÉRISTIQUES ET POSSIBILITÉS

---

Les calculs de stabilité effectués par ce programme sont réalisés :

- pour des lignes de ruptures circulaires ;
- par la méthode modifiée de BISHOP ;
- et par la méthode ordinaire des tranches.

La géométrie de la pente est définie par des sections verticales.

L'axe des  $x$  est obligatoirement orienté de façon que la descente le long de la pente étudiée se fasse suivant les  $x$  croissants.

L'axe de  $y$  est orienté positivement vers le bas.

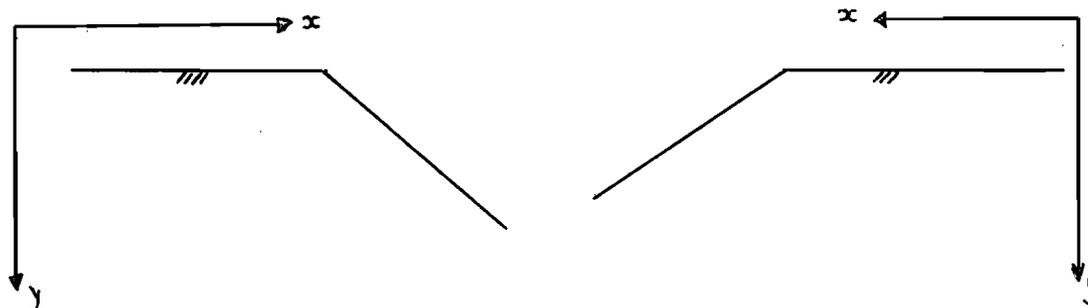


Fig. 6.1 - Schéma d'orientation des axes.

Le programme tient en compte :

- les profils irréguliers ;
- les fissures de traction ;
- les écoulements d'eau ;
- les forces sismiques.

## 6.1.2 - ENTRÉE DES DONNÉES

- Carte 1 : Identification du cas étudié ;
- carte 2 : nombre de cercles, de tangentes, de sections verticales, de sols et de données sismiques ;
- carte 3 : définition des cercles ;
- carte 4 : option concernant les cercles ;
- carte 5 : définition de la géométrie ;
- carte 6 : propriétés des sols ;
- carte 7 : pressions interstitielles
- carte 8 : variation de la cohésion non drainée.

Note : Les cartes (7) et (8) n'ont pas été utilisées pour nos  
====  
calculs.

Voir le manuel d'utilisation en annexe IV ainsi qu'un exemple de feuille de données avec le croquis de la géométrie correspondante.

## 6.2 - CALCULS

### 6.2.1 - TESTS DE VALIDATION DU PROGRAMME

Compte tenu des modifications faites sur le programme STABIL lors de son transfert sur le Microméga 32 de l'Ecole, des tests de validation se sont avérés indispensables surtout que c'est pour la première fois que le dit programme est utilisé à l'E.P.T.

Quatre cas de calculs exécutés par le Bureau de Recherches Géologiques et Minières (France) ont été repris afin de confirmer la validité du programme que nous aurons à utiliser par la suite. Il s'agit :

1. du calcul proposé par les auteurs du programme STABR ;
2. du glissement de terrain de LOGADEN (Suède) ;
3. de la stabilité de talus aval du barrage de SHERARD ;

4. d'un essai tiré de l'ouvrage de PILOT et MOREAU.

Le "listing" de ces 4 essais est montré en annexe V.

## 6.2.2 - HYPOTHÈSES DE CALCULS

Cette section constitue la partie la plus délicate de notre étude, car les résultats dépendront évidemment des hypothèses de base. Comme nous le disions en introduction, la difficulté d'arriver à des résultats certains dans ce genre d'étude tient du fait que les hypothèses de calculs sont difficiles à définir.

A la section (3.3), il est indiqué les paramètres à considérer lors d'une analyse de stabilité de pente. Mais ces paramètres, dans le cas précis du terril, sont difficilement contrôlables, d'abord la résistance au cisaillement du matériau et partant sa cohésion (C) et son angle de frottement interne ( $\phi$ ).

Pour l'angle de frottement, la dispersion des valeurs obtenues est admissible, ce qui nous permet d'obtenir une valeur moyenne unique de 29°.

Par contre pour la cohésion, elle est fonction de la teneur en eau. Or sur le terril, la valeur de la teneur en eau ne peut être considérée uniforme dans le temps et dans l'espace.

Le problème de la géométrie à considérer pour le calcul est aussi complexe que celui de la cohésion, puisque la hauteur augmente d'un jour à l'autre.

C'est pour toutes ces raisons que nous avons décidé d'exécuter les calculs de la façon suivante :

à partir de la géométrie constatée lors de la visite de Janvier 1985, en gardant l'angle de frottement interne constant, nous faisons prendre à la cohésion les valeurs 0, 3, 6, 10 kPa respectivement.

Cette façon de faire nous permet, pour une géométrie donnée, de voir l'influence de la cohésion sur le facteur de sécurité.

### Choix de la cohésion de calcul

Les courbes de la figure 6.3., indiquant l'influence de la cohésion sur le facteur de sécurité pour une géométrie donnée, montrent une très légère augmentation du facteur de sécurité lorsque la cohésion passe du simple au triple, et même plus.

Ainsi donc pour le choix de la cohésion de calcul, nous nous baserons sur les résultats des essais de résistance au cisaillement en fonction de la teneur en eau. Cette teneur en eau étant de l'ordre de 23 % sur le terril, nous avons préféré choisir une cohésion de 15 kPa pour nos calculs puisque toute variation de la teneur en eau - et par suite de la cohésion - influencerait de très peu les valeurs du facteur de sécurité.

### Détermination des pertes caractéristiques du terril

Les relevés topographiques ont permis d'avoir une idée très grossière des pentes du terril. Pour une détermination beaucoup plus exacte de ces pentes, nous avons procédé par photographies du terril à divers endroits. Ces photos nous ont permis d'évaluer le changement de pente sur les profils transversaux. Des mesures sur photos ont montré que cette cassure se trouve à environ  $\frac{2}{5}$  de la hauteur totale du terril à partir du sommet .

Ces mêmes mesures ont indiqué que la pente du sommet au point de cassure vaut approximativement 1:1.2 et que celle du point de cassure à la base vaut : 1.:1.6

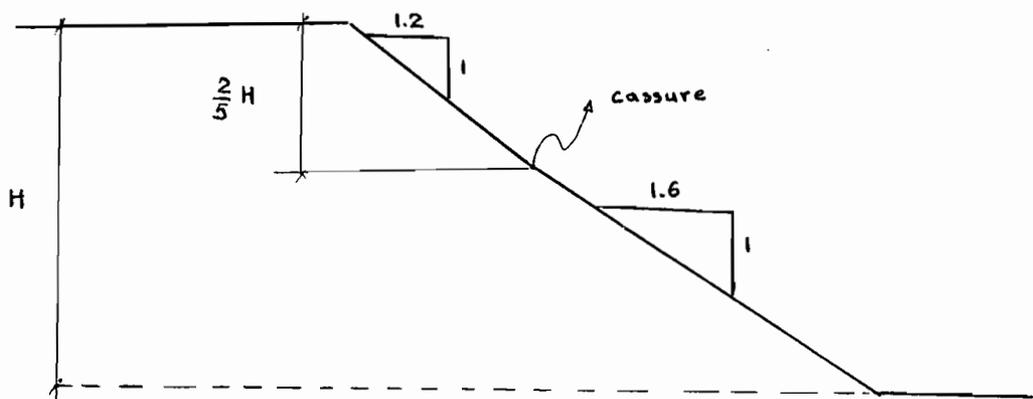
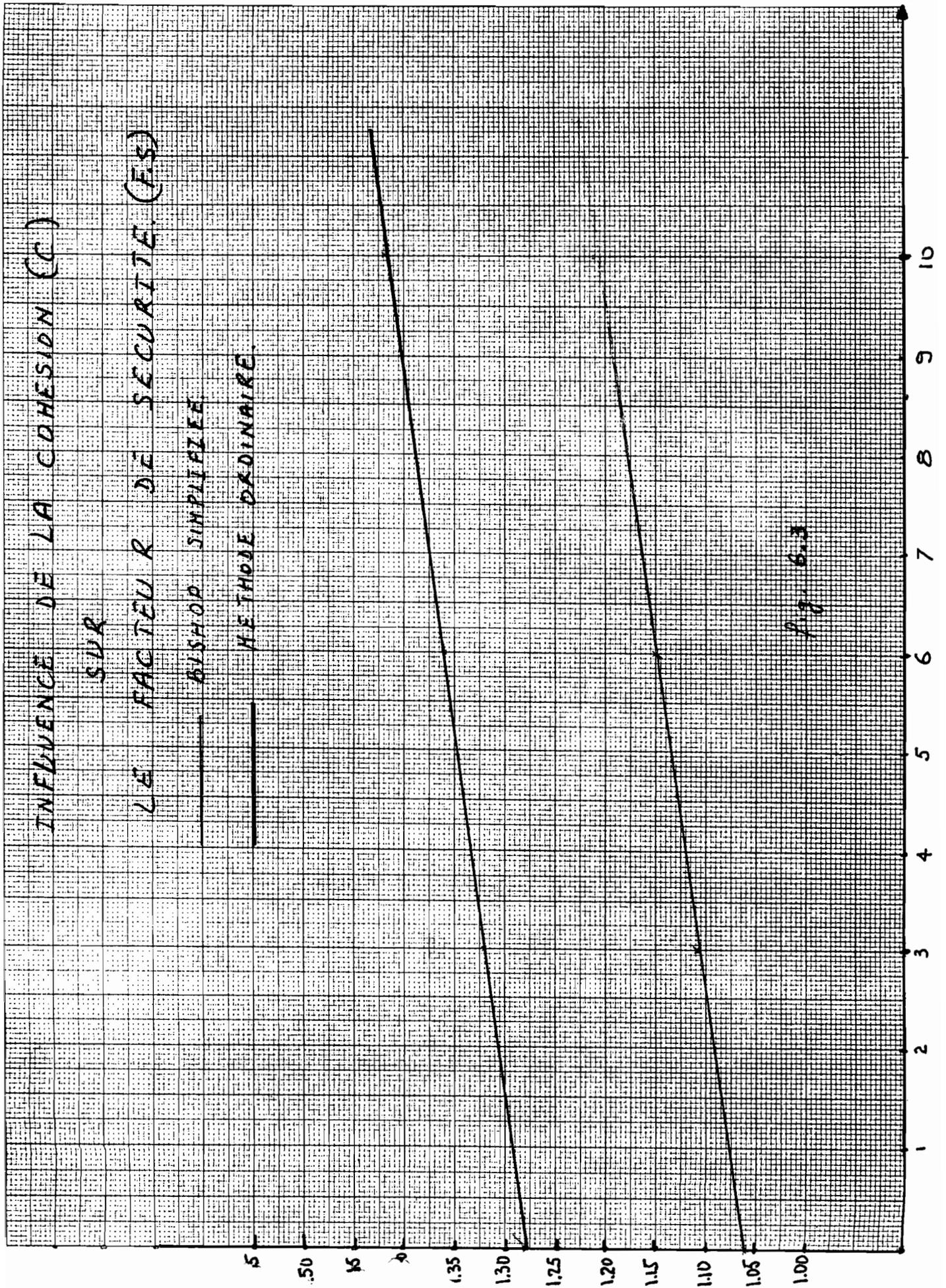


FIG. 6.4



Maintenant le problème reste à déterminer quelle sera la géométrie des pentes lorsque la hauteur totale du terril augmentera. La mise en terril se faisant sans précaution toute particulière, lorsque le phosphogypse est déversé, il "cherchera à se tenir" dans la position qui lui assurera le plus de stabilité. C'est la nature des choses ! C'est donc dire que la position du changement de pente va bouger en fonction de la hauteur du terril. Cette nouvelle position restera à  $2/5 H$  du sommet où  $H$  est la hauteur constatée lors des photographies soit 30 m.

On va donc admettre que la géométrie des pentes du remblai ne changera pas en fonction de la hauteur du terril. Les pentes demeureront à 1:1.2 pour la partie supérieure et à 1:1.6 dans la partie inférieure avec un point de changement situé à 12 mètres du sommet (tel qu'évalué pour un terril de 30 m de hauteur).

#### Calcul de la stabilité du terril pour une hauteur de 30 m

Avec la géométrie ci-dessus mentionnée, nous avons considéré pour un premier calcul 20 cercles de rupture possibles où ceux-ci sont tous tangents à l'horizontale passant par la base du terril ; le nombre de sections verticales étant 8.

Les résultats de ce premier calcul sont les suivants :

- BISHOP :
- . F.S. minimum = 1.282.
  - . Rayon du cercle de rupture = 88 m
  - . Coordonnées du centre du cercle = (330 ; 22)

#### Méthode ordinaire des tranches:

- . F.S minimum = 1.227
- . Rayon du cercle de rupture = 72.0 m
- . Coordonnées du centre du cercle = (320.0 , 38.0)

A partir de ces résultats, on redéfinit d'autres cercles de ruptures pour raffiner le calcul. Ainsi avec le même nombre de tangentes et de sections verticales, on a considéré 25 cercles de rupture dont les centres respectifs sont beaucoup rapprochés (à tous les mètres sur l'axe

de x, et sur l'axe de y).

Les résultats obtenus sont les suivants :

BISHOP :

- . F.S. minimum = 1.282
- . Rayon du cercle de rupture = 88.0 m
- . Coordonnées du centre du cercle = (330.0 , 22.0)

Méthode ordinaire des tranches :

- . F.S. minimum = 1.238
- . Rayon du cercle de rupture = 88.0 m
- . Coordonnées du centre du cercle = (330.0 , 22.0)

Tous les résultats des calculs vont indiqué en annexe II, et une représentation de la masse instable.

Calcul d'extrapolation pour les hauteurs de 50 m et de 70 m

Les calculs d'extrapolation seront faits en laissant les pentes sans changement.

Hauteurs de 50 m

Toujours avec une seule tangente, nous avons considéré 9 cercles de rupture possibles et 5 sections verticales. Le premier calcul donne les résultats ci-après :

BISHOP :

- . F.S. minimum = 1.247
- . Rayon du cercle de rupture = 85.0 m
- . Coordonnées du centre du rayon = (180.0 ; 25.0)

Méthode ordinaire des tranches :

- . F.S. minimum = 1.151
- . Rayon du cercle de rupture = 85.0 m
- . Coordonnées du centre du cercle = (180.0 ; 25.0)

Le raffinement du même calcul donne :

BISHOP :

- . F.S. minimum = 1.203
- . Rayon du cercle de rupture = 115.0 m
- . Coordonnées du centre du cercle = (197.0 ; -5.0)

Méthode ordinaire des tranches :

- . F.S. minimum = 1.153
- . Rayon du cercle de rupture = 115.0 m
- . Coordonnées du centre du cercle = (197.0 ; -5.0)

Hauteur de 70 m

On a les mêmes hypothèses que précédemment.

Le premier calcul donne :

BISHOP :

- . F.S. minimum = 1.064
- . Rayon du cercle de rupture = 124.0 m
- . Coordonnées du centre = (320.0 ; -14.0)

Méthode ordinaire des tranches :

- . F.S. minimum = 0,996
- . Rayon du cercle de rupture 124.0 m
- . Coordonnées du centre = (320.0 ; - 14.0)

Le raffinement donne :

BISHOP :

- . F.S. minimum = 1.042
- . Rayon du cercle de rupture = 144.0 m
- . Coordonnées du centre = (334.0, -34.0)

Méthode ordinaire des tranches

- . F.S. minimum = 0.996
- . Rayon du cercle de rupture = 144.0 m
- . Coordonnées du centre = (332.0 ; -34.0)

Les résultats sont indiqués en annexe II avec la représentation des cercles de rupture respectifs.

TABLEAU DE SYNTHÈSE DES CALCULS RAFFINÉS

hauteur (m)	BISHOP			FELLENIIUS			$\Delta$ (%)
	F.S. minimum	cercle de rupture		F.S. minimum	Rayon (m)	Centre (x, y) (m)	
		Rayon (m)	Centre (x,y) (m)				
30	1.282	88	(33.0, 22.0)	1.238	88	(330.0, 2.20)	4.4
50	1.203	115	(197.0, -5.0)	1.153	115	(197.0, -5.0)	5.0
70	1.042	144	(334.0, -34)	0.995	144	(332,0, - 34)	4.7

$$\Delta = \text{F.S.B} - \text{F.S.F.}$$

Tableau 6.1

Note : La méthode ordinaire des tranches due à Fellenius est similaire à celle de Bishop simplifiée avec une simplification supplémentaire : les forces entre tranches ne sont pas prise en compte. D'où la différence entre les valeurs obtenues par les 2 méthodes.

Dans sa thèse à l'Université de Grenoble, MOUGIN a indiqué que les coefficients de sécurité déterminés par la méthode de Bishop modifiée (F.S.B.) et par la méthode de Fellenius (F.S.F.) sont liés par la relation :

$$\text{F.S.B} = \text{F.S.F} + 13 \%$$

Dans notre étude, cette différence est de l'ordre de 5 %. Par ailleurs, une analyse de talus instables l'a conduit à penser que la méthode de Fellenius pourrait être plus proche de la réalité que la méthode de Bishop simplifiée.

## 7. RECOMMANDATIONS ET CONCLUSION

---

- A. Dans un premier temps, il s'agirait d'arrêter la propension des fissures sur les talus - au regard de leurs dimensions (profondeur et largeur) importantes ; cela pour deux (2) raisons fondamentales :
- la circulation des bulldozers dont le poids est important peut accélérer d'autres fissures ;
  - dans le même ordre d'idée, vu l'approche de la saison de pluies, l'eau pénétrera dans les fissures et s'y accumulera d'où une réduction très importante de la résistance au cisaillement en certains endroits du terril.

Ainsi nous suggérons que les fissures existantes soient bourrées de phosphogypse avec un léger sompactage à la dame. Aussi des dispositions devraient être prises pour éviter toute stagnation d'eau sur le terril pendant l'hivernage.

- B. D'après les calculs, la cohésion du matériau influence la géométrie du terril. Cette géométrie à son tour influence la stabilité générale. Or les essais de résistance au cisaillement en fonction de la teneur en eau indiquent que la cohésion dépend de celle-là. A partir de ces constatations, il serait préférable que la mise en terril fût effectuée de façon à ne pas permettre à l'eau de s'évaporer d'une manière continuelle en un seul endroit. Il serait judicieux de changer chaque fois d'emplacement de dépôt pour permettre une conservation optimale de l'eau dans le massif.

- C. L'évaluation du facteur de sécurité correspondant au mouvement le plus probable du terril pour différentes hauteurs (30 m, 50 m, 70 m) indique une probabilité de glissement plus grande au fur et à mesure que croît la hauteur. Dans son état actuel, le terril présente une stabilité relativement satisfaisante - le facteur de sécurité minimum est d'environ 1.30. Mais lorsque la hauteur dépassera les 60 m, des dispositions particulières devraient être prises. Ainsi nous recommandons qu'à cette hauteur la mise en terril ne se fasse plus à partir du sommet. Mais, à partir du deuxième "Stacker" placé au sol, que le matériau soit transporté par des bulldozers pour être déposé à la base du terril. Cette façon de faire constituera une manière de construire des bermes qui assureraient une plus grande stabilité.
- D. Les calculs d'extrapolation étant basés sur l'hypothèse fondamentale selon laquelle les pentes du terril garderont leur valeur respective pour des hauteurs plus importantes, les résultats obtenus seront considérés avec discernement. En effet rien ne nous dit, a priori, que les pentes resteront identiques. Pour cela nous recommandons une autre évaluation des pentes pour différentes hauteurs, pour s'assurer de la géométrie réelle en fonction de la hauteur.
- E. Enfin, nous voudrions souhaiter suggérer au I.C.S. de mener un programme de recherches en collaboration avec des institutions spécialisées telle l'E.P.T. en vue de trouver les voies et moyens pour valoriser le phosphogypse ; par exemple dans le domaine du plâtre, du ciment, du génie civil, le phosphogypse pourrait être utilisé.

En guise de conclusion, disons que le phosphogypse n'a nullement les propriétés géotechniques que possèdent les sols habituellement utilisés.

Les essais de limites d'ATTERBERG sont irréalisables sur ce matériau ; il ne présente donc aucun caractère argileux. Du point de vue granulométrique, le phosphogypse a les caractéristiques d'un silt (limon). Cependant son comportement mécanique s'apparente beaucoup à celui d'un "sable" très fin.

Les essais de compactage PROCTOR laissent prévoir que l'utilisation du phosphogypse dans les remblais poserait des problèmes inhérentes à la difficulté du contrôle de la teneur en eau.

Cette étude montre que nous avons bel et bien travaillé avec un sous-produit industriel et non avec un sol. Cependant nous demeurons des adeptes de la Mécanique des Sols Appliquée.

A ce titre citons TERZAGHI et PECK qui disent dans la deuxième partie de leur ouvrage "Mécanique des Sols Appliquée" (édition française 1961) :

" Les constantes du sol qui apparaissent dans les équations définitives sont évaluées empiriquement ou représentent les valeurs moyennes obtenues par des essais en laboratoire pratiqués sur des échantillons considérés représentatifs.....

En raison des incertitudes inévitables que comportent les hypothèses fondamentales des théories et les valeurs numériques des constantes de sol, la simplicité importe beaucoup plus que la précision".

## BIBLIOGRAPHIE

---

1. LE PHOSPHOGYPSE, Laboratoire Central des Ponts et Chaussées,  
Nov. 1978
2. COSTET ET SANGLERAT, Cours Pratique de Mécanique des Sols -  
Calcul des Ouvrages, 2e Edition, 19776
3. RECORDON, Mécanique des Sols, Ed. de l'E.P.F.L., 1980
4. JOSEPH E. BOWLES, Engineering Properties of Soils and their  
measurement, 6e Edition, 1978
5. B. BONCOMPAIN, R. PASQUET ET J-P. SAUTY,  
Description et Notice d'emploi des programmes  
STABIL et STABLT, Août 1976
6. LES MÉTHODES D'ANALYSE DE STABILITÉ DES TALUS,  
F. BLONDEAU, L.C.P.C., Mars 1976
7. INFLUENCE DE L'EAU DANS LES PROBLÈMES DE STABILITÉ,  
E. Recordon, Août 1974
8. SHEAR STRENGTH OF COHESIVE SOILS,  
American Society of Civil Engineers, juin 1960

## ANNEXE I

---

### RÉSULTATS DES ÉSSAIS DE LABORATOIRE

# école polytechnique de thès

## POIDS SPÉCIFIQUE DES CONSTITUANTS SOLIDES

Mécanique des sols

PROJET : <i>de fin d'études</i>	LOCALISATION : <i>E.P.T</i>
SONDAGE :	ÉCHANTILLON NO. :
Profondeur de : / à /	ÉTAT DE L'ÉCH. : <i>Remanie'</i>
DESCRIPTION : <i>PHOSPHO.GYPSE - I.C.S</i>	
ESSAI PAR <i>Pakodégo</i> le <i>12.84</i>	VÉRIFIÉ PAR <i>GUISSE</i> le <i>12.84</i>
PRÉPARATION DE L'ÉCHANTILLON (à sec, humide, trempage, % passant tamis de réf., etc...)	

ESSAI NO.			1	2	3	4
PYCNOMÈTRE NO.			1	2	3	1
VOLUME DU PYCNOMÈTRE	ml		250	250	250	250
Méthode de désaération (vide, ébullition)						
P <sub>pic</sub> + P <sub>eau</sub> + P <sub>sol</sub>	P <sub>pes</sub>	g	383.13	388.38	385.38	384.82
TEMPÉRATURE	T	°C	27	27	27	30
P <sub>pic</sub> + P <sub>eau</sub> (à T°C)	P <sub>pe</sub>	g	358.08	362.60	360.90	359.17
Récipient d'évaporation n°						
Précipiant + sol sec		g	289.66	285.30	284.13	287.37
Précipiant (Tare)		g	248.16	242.10	243.33	245.17
P <sub>sol</sub> sec	P <sub>s</sub>	g	41.50	43.20	40.80	42.20
V = P <sub>s</sub> + P <sub>pe</sub> - P <sub>pes</sub>			16.45	17.42	16.32	16.55
G <sub>s</sub> à T°C = P <sub>s</sub> / V			2.52	2.48	2.50	2.55
Facteur de correction α à T°C (table)						
G <sub>s</sub> à 20°C = G <sub>s</sub> à T°C × α			2.52	2.48	2.50	2.54

Faire la moyenne d'au moins 3 essais

 G<sub>s</sub> moyen = 2.51 g/cm<sup>3</sup>

REMARQUES

### DENSITÉ RELATIVE DE L'EAU DISTILLÉE ET FACTEUR DE CORRECTION α

$$\alpha = \frac{\text{DENSITÉ RELATIVE DE L'EAU DISTILLÉE À T°C}}{\text{DENSITÉ RELATIVE DE L'EAU DISTILLÉE À 20°C}}$$

T°C	DR	α	T°C	DR	α	T°C	DR	α
4	1,00000	1,00177	22	0,99780	0,99957	30	0,99568	0,99745
5			23	0,99757	0,99934	31	0,99537	0,99713
16	0,99897	1,00074	24	0,99733	0,99910	32	0,99505	0,99681
17	0,99880	1,00057	25	0,99708	0,99885	33	0,99472	0,99648
18	0,99862	1,00039	26	0,99682	0,99853	34	0,99438	0,99614
19	0,99844	1,00021	27	0,99655	0,99822	35	0,99403	0,99579
20	0,99823	1,00000	28	0,99627	0,99804			
21	0,99802	0,99979	29	0,99598	0,99775			

M.B. Avr. 1985

# école polytechnique de thès

## DETERMINATION AU LABORATOIRE DE LA TENEUR EN EAU DU SOL

Désignation : ASTM : D2216-66

Grosseur maximum des particules

Poids minimum de l'échantillon, g.

Tamis No. 40 (420- $\mu$ ).....	10
Tamis No. 4 (4.76-mm).....	100
1/2 po..... (13 mm).....	300
1 po..... (25 mm).....	500
2 po..... (50 mm).....	1000

Echantillon no.: <b>1</b> Prélevé à: <b>TAIBA</b>				
Sondage: / Profondeur: / m; Elev. / m				
Description: <b>PHOSPHOGYPSE - I.C.S.</b>				
Séchage <input type="checkbox"/> Air <input checked="" type="checkbox"/> Four à T°C: <b>40</b> Durant: <b>72</b> h *				
Essais par: la:				
ESSAI no.	1	2	3	4
Récipient no.	1	2	3	4
Poids récip. + Sol hum Ph g	230.92	266.69	295.17	49.60
Poids récip. + Sol sec Ps g	197.98	224.18	249.79	44.31
Poids récip. = Tara Pt g	53.54	54.15	53.85	21.95
Poids de l'eau Ph - Ps = Pe g	32.94	42.51	45.38	5.27
Poids du sol sec Ps - Pt = Pss g	144.44	170.03	195.94	22.36
Teneur en eau (Pe/Pss) x 100 = W%.	22.80	25.00	23.16	23.57
MOYENNE W% =				

Echantillon no.: <b>2</b> Prélevé à: <b>TAIBA</b>				
Sondage: / Profondeur: / m; Elev. / m				
Description: <b>PHOSPHOGYPSE - I.C.S.</b>				
Séchage <input type="checkbox"/> Air <input checked="" type="checkbox"/> Four à T°C: <b>40</b> Durant: <b>72</b> h *				
Essais par: la:				
ESSAI no.	1	2	3	4
Récipient no.	5	6	7	8
Poids récip. + Sol hum Ph g	51.57	269.11	42.15	48.38
Poids récip. + Sol sec Ps g	45.83	230.08	38.26	43.40
Poids récip. = Tara Pt g	22.03	55.56	22.00	22.61
Poids de l'eau Ph - Ps = Pe g	5.68	39.03	3.89	4.98
Poids du sol sec Ps - Pt = Pss g	23.80	174.52	16.26	20.79
Teneur en eau (Pe/Pss) x 100 = W%.	23.86	22.36	23.92	23.95
MOYENNE W% =				

Remarques :

*Ces résultats ne constituent qu'un échantillon des mesures faites au laboratoire.*

\* Pour le séchage au four ASTM recommande 15 à 16 heures à 110 $\pm$ 5 $^{\circ}$ C (60 $^{\circ}$ C pour les sels hydratés)

# école polytechnique de thiers

## ESSAI DE COMPACTAGE

PROJET: DE FIN D'ETUDES  
 EMPLACEMENT: E.P.T.      ESSAI No: /

CARACTÉRISTIQUES DU MATÉRIAU      DESCRIPTION: PHOPHOGYPSE  
 PROVENANCE: IGS  
 REMARQUES: /

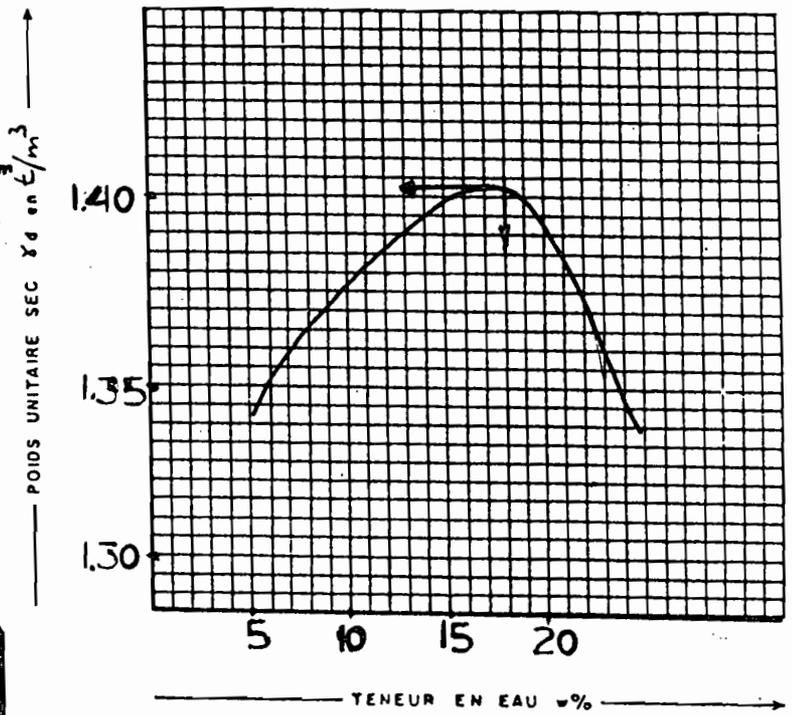
ESSAI PAR: Pakadega      LE: 01.85      CALCULÉ PAR: Pakadega      LE: 01.85      VÉRIFIÉ PAR: GUISSÉ      LE: 01.85

NORMES A.S.T.M. POUR ESSAI PROCTOR	METHODE	MOULE			Y <sub>T</sub> = WT × pari $\frac{1000}{V}$	ESSAI STANDARD (A.S.T.M. D 698) MARTEAU DE 2.5 kg - CHUTTE DE 30.5 cm			ESSAI MODIFIÉ (A.S.T.M. D 1557) MARTEAU DE 4.5 kg - CHUTTE DE 45.7 cm		
		Ø cm	VOLUME cm <sup>3</sup>	POIDS MINIMUM DE MATÉRIAU		NOMBRE DE COUCHES	NB DE COUPS PAR COUCHE	POIDS MINIMUM DE MATÉRIAU	NOMBRE DE COUCHES	NB DE COUPS PAR COUCHE	
											NO 4
A	NO 4	10.2	943,89	1,059 442	2,5 kg	3	25	3,0 kg	5	25	
B	NO 4	15.2	2123,76	0,470 876	6,5 kg	3	56	7,5 kg	5	56	
C	3/4"	10.2	943,89	1,059 442	4,5 kg	3	25	5,5 kg	5	25	
D	3/4"	15.2	2123,76	0,470 876	10,0 kg	3	56	11,5 kg	5	56	

### CARACTÉRISTIQUES DE L'ESSAI

EFFORTS DYNAMIQUES (VOIR NORMES A.S.T.M.)  
 ESSAI STD.  MOD.  METHODE: \_\_\_\_\_  
 % RETENU SUR TAMIS  $\frac{19}{(3/4)}$  NO 4: \_\_\_\_\_  
 MOULE: DIAMÈTRE = 10.2 - VOLUME = 943.89 cm<sup>3</sup>  
 POIDS DU MARTEAU: 2.5 kg - HAUTEUR DE CHUTTE = 30.5 cm  
 NB DE COUCHES: 3 NB DE COUPS / COUCHE: 25  
 OBSERVATIONS: \_\_\_\_\_

PRESSIONS STATIQUES (SUIVANT NORMES)  
 TYPE D'ESSAI: \_\_\_\_\_  
 TAMIS DE RÉFÉRENCE: \_\_\_\_\_ % RETENU: \_\_\_\_\_  
 MOULE: DIAMÈTRE: \_\_\_\_\_ VOLUME: \_\_\_\_\_  
 PISTON: DIAMÈTRE: \_\_\_\_\_ PRESSION: \_\_\_\_\_  
 NB DE COUCHES: \_\_\_\_\_ NB DE COUPS / COUCHE: \_\_\_\_\_  
 OBSERVATIONS: \_\_\_\_\_



### RÉSULTATS DE L'ESSAI

$\gamma_d$  maximum = 1.40 t/m<sup>3</sup> - w% optimum = 18.0

POIDS UNITAIRES	ESSAI NO	% approximatif d'eau ajoutée	1	2	3	4	5	6
	POIDS DU SOL HUMIDE + MOULE	W <sub>1</sub> (kg)	5801	5799	5730	5665	5615	5836
	POIDS DU MOULE	TARE (kg)	4269	4269	4269	4269	4269	4269
	POIDS DU SOL HUMIDE	W <sub>1</sub> - TARE = WT (kg)	1532	1530	1461	1361	1396	1567
	POIDS UNITAIRE TOTAL	$WT \times (\frac{1000}{V}) = \gamma_T$ (t/m <sup>3</sup> )	1.62	1.62	1.55	1.48	1.43	1.66
POIDS UNITAIRE SEC	$\gamma_T / (1.0 + (w\% / 100)) = \gamma_d$ (t/m <sup>3</sup> )	1.40	1.32	1.38	1.37	1.35	1.39	

TENEURS EN EAU	RÉCIPIENT NO	1	2	3	4	5	6	
	POIDS DU RÉCIPIENT	TARE (g)	22.40	21.67	21.62	21.20	21.68	22.58
	POIDS DU SOL HUMIDE + RÉCIPIENT	W <sub>1</sub> (g)	50.39	93.70	47.50	46.71	46.36	47.04
	POIDS DU SOL SEC + RÉCIPIENT	W <sub>2</sub> (g)	46.61	80.53	49.70	44.84	45.03	43.03
	POIDS DE L'EAU	W <sub>1</sub> - W <sub>2</sub> = W <sub>w</sub> (g)	3.78	13.17	2.80	1.87	1.33	4.01
	POIDS DU SOL SEC	W <sub>2</sub> - TARE = W <sub>s</sub> (g)	24.21	58.86	23.08	23.64	23.35	20.45
TENEUR EN EAU	$(W_w / W_s) \times 100 = w\%$	15.6	22.4	12.1	7.9	5.7	19.6	

M.B. AVRIL 85

ÉCRIRE BIEN LISIÈLEMENT À L'AIDE D'UN CRAYON À MINE DE PLOMB "HB" OU "B" TOUTES LES INFORMATIONS DIRECTEMENT SUR CETTE FEUILLE.

# école polytechnique de thïes

## ESSAI DE COMPACTAGE

PROJET : DE FIN D'ETUDES

EMPLACEMENT : EPT ESSAI No: /

CARACTÉRISTIQUES DU MATÉRIAU DESCRIPTION: **PHOSPHOGYPSE**  
 PROVENANCE: **ICS**  
 REMARQUES: /

ESSAI PAR: *Pakidtege* LE: *01.85* CALCULÉ PAR: *Pakidtege* LE: *01.85* VÉRIFIÉ PAR: *GUISSE* LE: *01.85*

NORMES A.S.T.M. POUR ESSAI PROCTOR	MÉTHODE	MOULE			Y <sub>T</sub> = WT x $\frac{1000}{V}$	ESSAI STANDARD (A.S.T.M. D 698) MARTEAU DE 2.5 kg - CHUTTE DE 30.5 cm			ESSAI MODIFIÉ (A.S.T.M. D 1557) MARTEAU DE 4.5 kg - CHUTTE DE 45.7 cm		
		NO	D	VOLUME		POIDS MINIMUM DE MATÉRIAU	NOMBRE DE COUCHES	NB DE COUPS PAR COUCHE	POIDS MINIMUM DE MATÉRIAU	NOMBRE DE COUCHES	NB DE COUPS PAR COUCHE
A	NO 4	10.2	943,89	1,059 442	2,5 kg	3	25	3,0 kg	5	25	
B	NO 4	15.2	2123,76	0,470 876	6,5 kg	3	56	7,5 kg	5	56	
C	3/4"	10.2	943,89	1,059 442	4,5 kg	3	25	5,5 kg	5	25	
D	3/4"	15.2	2123,76	0,470 876	10,0 kg	3	56	11,5 kg	5	56	

### CARACTÉRISTIQUES DE L'ESSAI

ESSAI. STD.  MOD.  MÉHODE: /

% RETENU SUR TAMIS  $\frac{19 \text{ mm}}{(3/4")}$  NO 4: /

MOULE: DIAMÈTRE = 15.2 - VOLUME = 2123.76 cm<sup>3</sup>

POIDS DU MARTEAU: 4.5 kg - HAUTEUR DE CHUTTE: 45.7 cm

NB DE COUCHES: 5 NB DE COUPS / COUCHE: 56

OBSERVATIONS: /

TYPE D'ESSAI: /

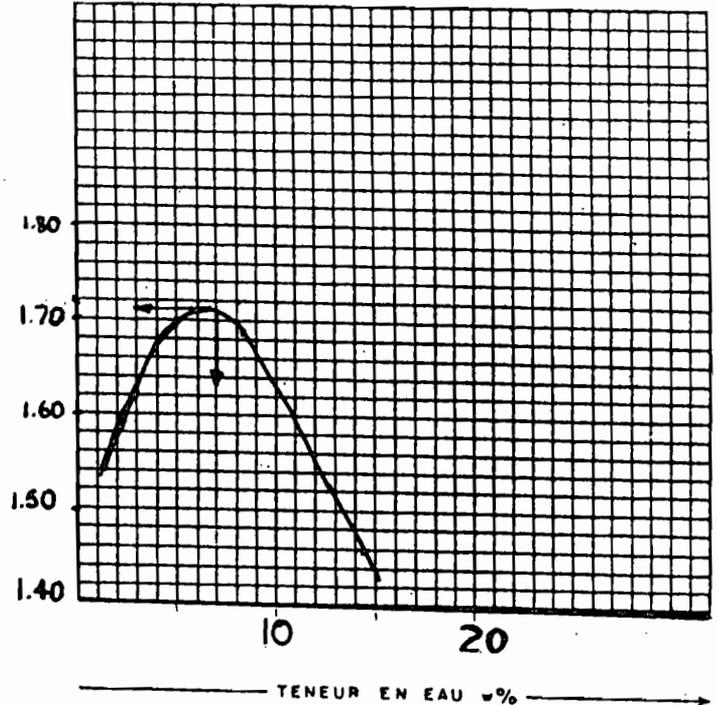
TAMIS DE RÉFÉRENCE: / % RETENU: /

MOULE: DIAMÈTRE: / VOLUME: /

PISTON: DIAMÈTRE: / PRESSION: /

NB DE COUCHES: / NB DE COUPS / COUCHE: /

OBSERVATIONS: /



### RÉSULTATS DE L'ESSAI

$\gamma_d$  maximum = 1.72 t/m<sup>3</sup> - w% optimum = 7.0

POIDS UNITAIRES	ESSAI NO	% approximatif d'eau ajoutée					
	1	2	3	4	5	6	
	POIDS DU SOL HUMIDE + MOULE	W1 (kg)	9072	9399	9314	9066	9239
	POIDS DU MOULE	TARE (kg)	5519	5519	5519	5519	5519
	POIDS DU SOL HUMIDE	W1 - TARE = WT (kg)	3553	3880	3795	3547	3720
	POIDS UNITAIRE TOTAL	$WT \times \frac{1000}{V} = \gamma_T$ (t/m <sup>3</sup> )	1.67	1.83	1.79	1.67	1.75
POIDS UNITAIRE SEC	$\gamma_T / (1.0 + (w\% / 100)) = \gamma_d$ (t/m <sup>3</sup> )	1.46	1.69	1.70	1.62	1.41	

TENEURS EN EAU	RÉCIPIENT NO	1	2	3	4	5	
	POIDS DU RÉCIPIENT	TARE (g)	22.15	21.96	22.53	21.86	21.96
	POIDS DU SOL HUMIDE + RÉCIPIENT	W1 (g)	45.62	49.17	77.10	54.83	68.65
	POIDS DU SOL SEC + RÉCIPIENT	W2 (g)	42.64	41.09	74.50	53.87	59.51
	POIDS DE L'EAU	W1 - W2 = Ww (g)	2.98	2.08	2.60	0.96	9.14
	POIDS DU SOL SEC	W2 - TARE = Ws (g)	20.49	25.13	51.97	32.01	37.55
	TENEUR EN EAU	$(Ww / Ws) \times 100 = w\%$	14.5	8.3	5.0	3.0	24.3

18. AVRIL 85

ÉCRIRE BIEN LISIBLEMENT À L'AIDE D'UN CRAYON À MINE DE PLOMB "HB" TOUTES LES INFORMATIONS DIRECTEMENT SUR CETTE FEUILLE.

## ECOLE POLYTECHNIQUE DE THIES

PROJET DE FIN D'ETUDES : Essai de densité in situ sur  
le terril en phosphogypse des I.C.S. (DAROU KHOUDOSS)

ESSAI NO	1	2	3
Poids initial de l'appareil : a	7987	6812	7671
Poids final de l'appareil : b	3705	2515	3393
Poids du sable dans trou + cône : a-b : c	4282	4297	4278
Poids du sable dans le cône d	1713	1713	1713
Poids du sable dans le trou c-d : e	2569	2584	2565
Poids unitaire apparent du sable : f (g/cm <sup>3</sup> )	1.523	1.523	1.523
volume du trou cm <sup>3</sup> e/f : g	1686.8	1696.7	1684.2
Poids total humide h	3130	3194	3133
Poids du récipient i	335	253	335
Poids net humide h-i. j	2795	2841	2798
densité humide $\gamma_n$ j/h k	1.66	1.67	1.66
Teneur en eau (w) l	22.5	21.8	23.1
densité sèche en place m	1.36	1.37	1.35

Densité in situ moyenne = 1.36 g/cm<sup>3</sup>

Densité "normale" maximale = 1.40 g/cm<sup>3</sup>

Densité "modifiée" maximale = 1.72 g/cm<sup>3</sup>

Degré de compaction

97%

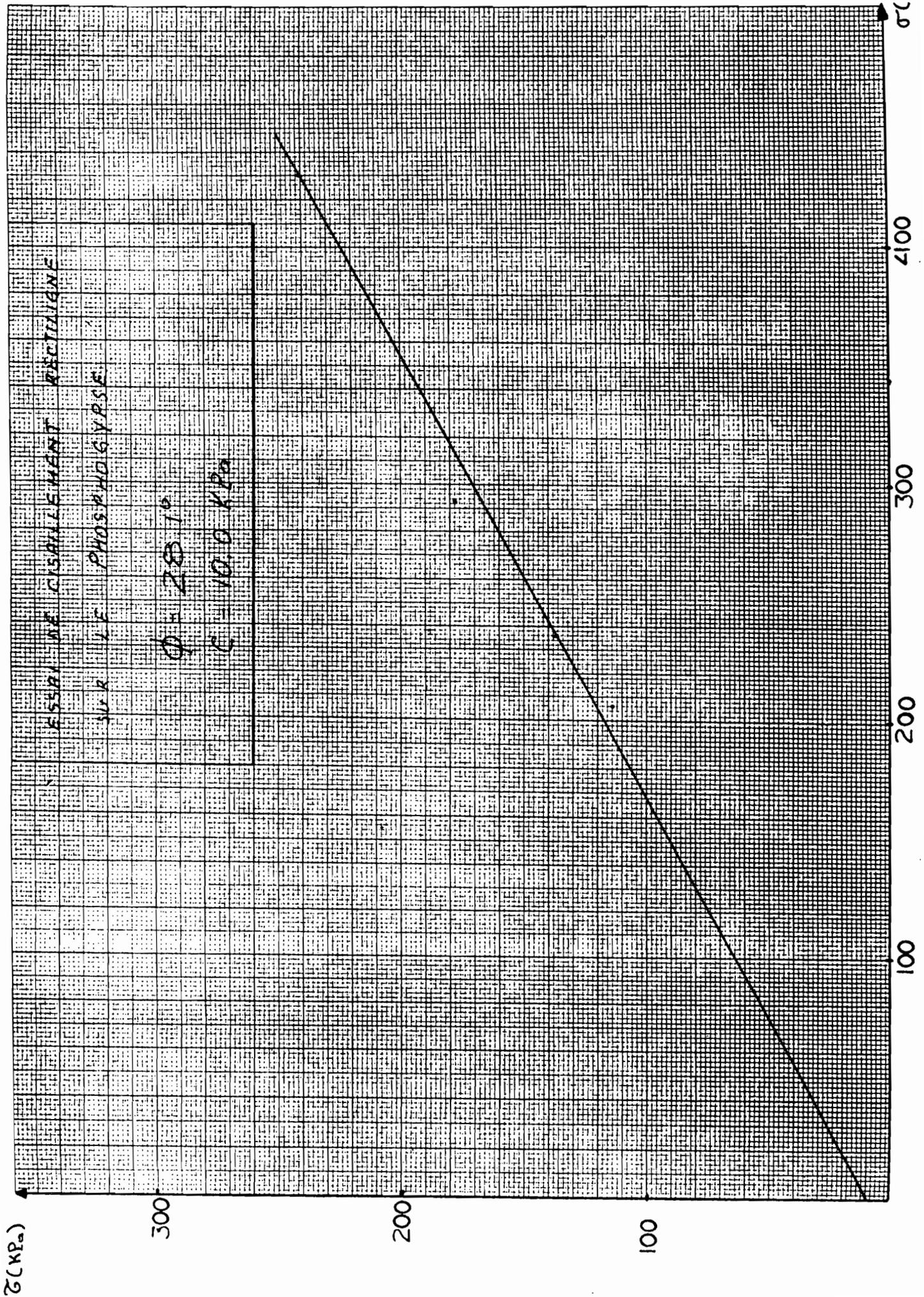
79%









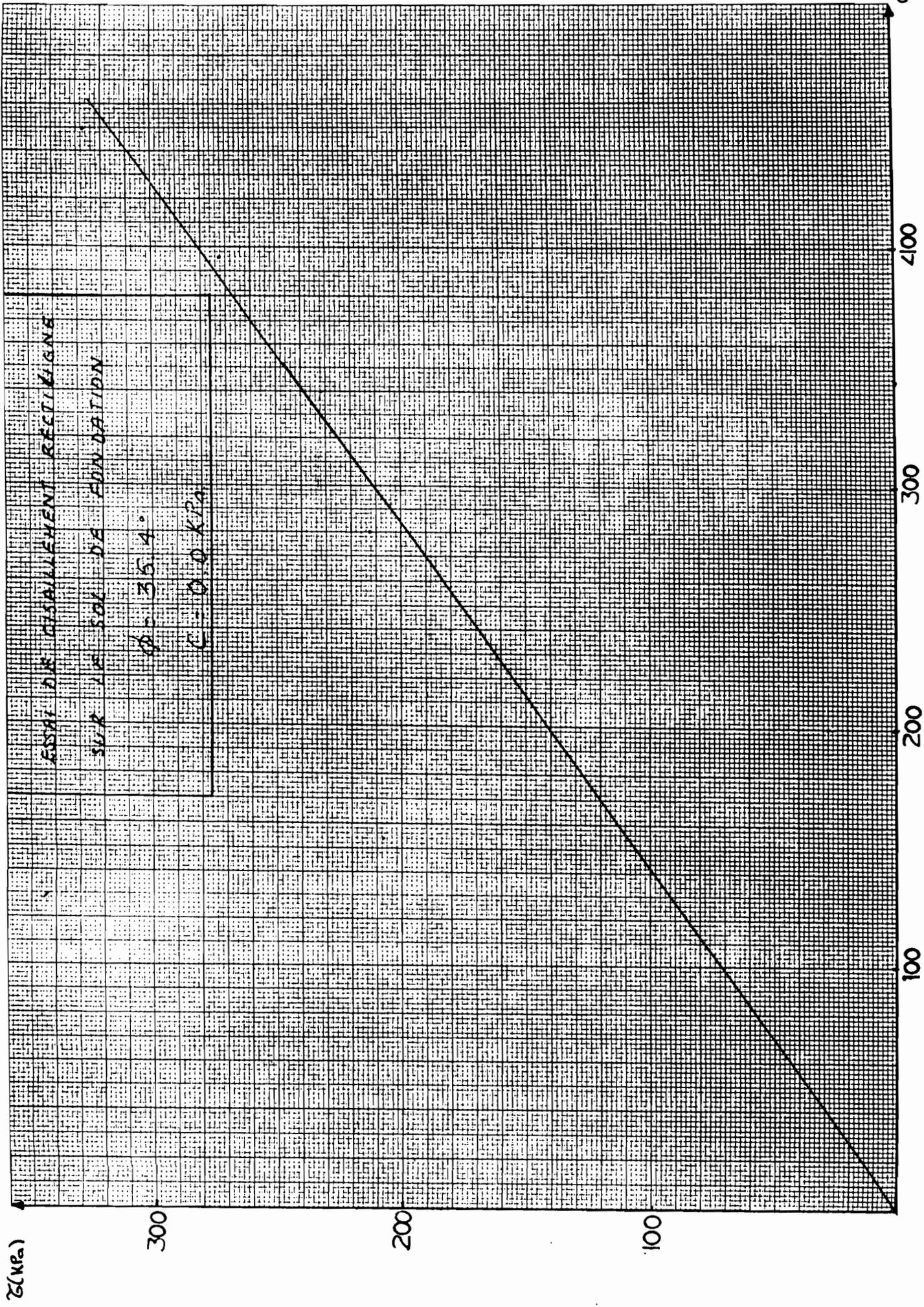












## ANNEXE II

### CALCULS DES FACTEURS DE SÉCURITÉ

Ecole Polytechnique de Thies - Calcul des stabilités de pentes

M E T H O D E D E B I S H O P S I M P L I F I E E

ETUDE DE LA STABILITE DU TERRIL DES I.C.S. PAR B.PAKODTOGO, EI.

CALCUL AVEC UNE COHESION DE 0 KPa (hauteur de 30m)

\*\*\*\*\*

FACTEURS DE SECURITES MINIMUMS POUR TOUTES LES TANGENTES

\*\*\*\*\*

F.S. MINIMUM (BISHOP) = 1.280  
----- \*\*\*\*\*

CERCLE TANGENT A LA PROFONDEUR : 110.0 m  
Rayon = 32.0 m : X , Y = ( 330.0 78.0 )

F.S. MINIMUM (ORDIN.) = 1.064  
----- \*\*\*\*\*

CERCLE TANGENT A LA PROFONDEUR : 110.0 m  
Rayon = 32.0 m : X , Y = ( 330.0 78.0 )

Ecole Polytechnique de Thies - Calcul des stabilités de pentes

M E T H O D E D E B I S H O P S I M P L I F I E E

ETUDE DE LA STABILITE DU TERRIL DES I.C.S. PAR B.PAKODTOGO, EI.

CALCUL AVEC UNE COHESION DE 3 KPa

\*\*\*\*\*

FACTEURS DE SECURITES MINIMUMS POUR TOUTES LES TANGENTES

\*\*\*\*\*

F.S. MINIMUM (BISHOP) = 1.321  
----- \*\*\*\*\*

CERCLE TANGENT A LA PROFONDEUR : 110.0 m  
Rayon = 32.0 m : X , Y = ( 330.0 78.0 )

F.S. MINIMUM (ORDIN.) = 1.108  
----- \*\*\*\*\*

CERCLE TANGENT A LA PROFONDEUR : 110.0 m  
Rayon = 32.0 m : X , Y = ( 330.0 78.0 )

Ecole Polytechnique de Thies - Calcul des stabilités de pentes

M E T H O D E D E B I S H O P S I M P L I F I E E

ETUDE DE LA STABILITE DU TERRIL DES I.C.S. PAR B. PAKODTOGO, EI.

CALCUL AVEC UNE COHESION DE 6 KPa

\*\*\*\*\*

FACTEURS DE SECURITES MINIMUMS POUR TOUTES LES TANGENTES

\*\*\*\*\*

F.S. MINIMUM (BISHOP) = 1.362  
----- \*\*\*\*\*

CERCLE TANGENT A LA PROFONDEUR : 110.0 m  
Rayon = 32.0 m : X , Y = ( 330.0 78.0 )

F.S. MINIMUM (ORDIN.) = 1.152  
----- \*\*\*\*\*

CERCLE TANGENT A LA PROFONDEUR : 110.0 m  
Rayon = 32.0 m : X , Y = ( 330.0 78.0 )

Ecole Polytechnique de Thies - Calcul des stabilités de pentes

M E T H O D E D E B I S H O P S I M P L I F I E E

ETUDE DE LA STABILITE DU TERRIL DES I.C.S. PAR B. PAKODTOGO, EI.

CALCUL AVEC UNE COHESION DE 10 KPa (hauteur de 30 m)

\*\*\*\*\*

FACTEURS DE SECURITES MINIMUMS POUR TOUTES LES TANGENTES

\*\*\*\*\*

F.S. MINIMUM (BISHOP) = 1.417  
----- \*\*\*\*\*

CERCLE TANGENT A LA PROFONDEUR : 110.0 m  
Rayon = 32.0 m : X , Y = ( 330.0 78.0 )

F.S. MINIMUM (ORDIN.) = 1.211  
----- \*\*\*\*\*

CERCLE TANGENT A LA PROFONDEUR : 110.0 m  
Rayon = 32.0 m : X , Y = ( 330.0 78.0 )

## Ecole Polytechnique de Thies - Calcul des stabilités de pentes

## METHODE DE BISHOP SIMPLIFIEE

ETUDE DE LA STABILITE DU TERRIL DES I.C.S. PAR B. PAKODTOGO, ET.

## CONTROLE DES DONNEES

NOMBRE DE CENTRES SPECIFIES	20
NOMBRE DE TANGENTES LIMITEES	1
NOMBRE DE SECTIONS VERTICALES	8
NOMBRE DE FRONTIERES ENTRE SOLS	3
NOMBRE DE LIGNES EQUIPRESSIONS	0
NOMBRE DE POINTS DEFINISSANT LA COHESION	0

COEFFICIENTS SISMIQUES S1	.000
S2	.000

\*\*\* SYSTEME METRIQUE \*\*\*\* kilo-Newton - metre

## CENTRES DES CERCLES (X,Y)

( 310.0 14.0 )	( 320.0 14.0 )	( 330.0 14.0 )	( 340.0 14.0 )
( 350.0 14.0 )	( 310.0 22.0 )	( 320.0 22.0 )	( 330.0 22.0 )
( 340.0 22.0 )	( 350.0 22.0 )	( 310.0 30.0 )	( 320.0 30.0 )
( 330.0 30.0 )	( 340.0 30.0 )	( 350.0 30.0 )	( 310.0 38.0 )
( 320.0 38.0 )	( 330.0 38.0 )	( 340.0 38.0 )	( 350.0 38.0 )

TOUS LES CERCLES TANGENTS AUX PROFONDEURS, 110.0,

## GEOMETRIE

SECTIONS	250.0	270.0	280.0	287.0	290.0	300.0	310.0	320.0
FISSURATION	76.0	76.0	84.0	90.0	92.0	98.0	104.0	110.0
EAU-FISSURE	76.0	76.0	84.0	90.0	92.0	98.0	104.0	110.0
FRONTIERE 1	76.0	76.0	84.0	90.0	92.0	98.0	104.0	110.0
FRONTIERE 2	110.0	110.0	110.0	110.0	110.0	110.0	110.0	110.0

FRONTIERE 3 122.0 122.0 122.0 122.0 122.0 122.0 122.0 122.0

## PROPRIETES DES SOLS

COUCHE	COHESION kPA	FROTTEMENT DEG.	DENSITE kN/m3	DESCRIPTION
1	15.0	29.0	16.6	PHOSPHOGYPSE
2	0	35.0	22.4	SOL DE FONDATION

## Ecole Polytechnique de Thies - Calcul des stabilités de pentes

-----  
M E T H O D E D E B I S H O P S I M P L I F I E E

ETUDE DE LA STABILITE DU TERRIL DES I.C.S. PAR B. PAKODTOGO, EI.

No	TANGENTE (m)	RAYON (m)	(X)CENTRE (m)	(Y)CENTRE (m)	FS (BISHOP)	FS (ORD.)
1	110.0	96.0	310.0	14.0	1.603	1.531
2	110.0	96.0	320.0	14.0	1.439	1.387
3	110.0	96.0	330.0	14.0	1.307	1.267
4	110.0	96.0	340.0	14.0	1.445	1.416
5	110.0	96.0	350.0	14.0		CIRCLRE OUTSIDE SLOPE
6	110.0	88.0	310.0	22.0	1.563	1.488
7	110.0	88.0	320.0	22.0	1.385	1.329
8	110.0	88.0	330.0	22.0	1.282	1.238
9	110.0	88.0	340.0	22.0	1.891	1.875
10	110.0	88.0	350.0	22.0		CIRCLRE OUTSIDE SLOPE
11	110.0	80.0	310.0	30.0	1.518	1.438
12	110.0	80.0	320.0	30.0	1.335	1.274
13	110.0	80.0	330.0	30.0	1.287	1.240
14	110.0	80.0	340.0	30.0	3.380	3.378
15	110.0	80.0	350.0	30.0		CIRCLRE OUTSIDE SLOPE
16	110.0	72.0	310.0	38.0	1.465	1.377
17	110.0	72.0	320.0	38.0	1.296	1.227
18	110.0	72.0	330.0	38.0	1.373	1.328
19	110.0	72.0	340.0	38.0		CIRCLRE OUTSIDE SLOPE
20	110.0	72.0	350.0	38.0		CIRCLRE OUTSIDE SLOPE

F.S. MINIMUM (BISHOP) = 1.282

----- \*\*\*\*\*

Rayon = 88.0 m : X , Y = ( 330.0 22.0 )

F.S. MINIMUM (ORDIN.) = 1.227

----- \*\*\*\*\*

Rayon = 72.0 m : X , Y = ( 320.0 38.0 )

## Ecole Polytechnique de Thies - Calcul des stabilités de pentes

## M E T H O D E D E B I S H O P S I M P L I F I E E

ETUDE DE LA STABILITE DU TERRIL DES I.C.S. PAR B. PAKODTOGO, E.I.

RAFFINEMENT DU CALCUL (h=30 m) (a tous les metres)

## CONTROLE DES DONNEES

NOMBRE DE CENTRES SPECIFIES	25
NOMBRE DE TANGENTES LIMITEES	1
NOMBRE DE SECTIONS VERTICALES	8
NOMBRE DE FRONTIERES ENTRE SOLS	3
NOMBRE DE LIGNES EQUIPRESSIONS	0
NOMBRE DE POINTS DEFINISSANT LA COHESION	0

COEFFICIENTS SISMIQUES S1	.000
S2	.000

\*\*\* SYSTEME METRIQUE \*\*\* kilo-Newton - metre

## CENTRES DES CERCLES (X,Y)

( 328.0 18.0 )	( 329.0 18.0 )	( 330.0 18.0 )	( 331.0 18.0 )
( 332.0 18.0 )	( 328.0 19.0 )	( 329.0 19.0 )	( 330.0 19.0 )
( 331.0 19.0 )	( 332.0 19.0 )	( 328.0 20.0 )	( 329.0 20.0 )
( 330.0 20.0 )	( 331.0 20.0 )	( 332.0 20.0 )	( 328.0 21.0 )
( 329.0 21.0 )	( 330.0 21.0 )	( 331.0 21.0 )	( 332.0 21.0 )
( 328.0 22.0 )	( 329.0 22.0 )	( 330.0 22.0 )	( 331.0 22.0 )
( 332.0 22.0 )	(		

TOUS LES CERCLES TANGENTS AUX PROFONDEURS, 110.0,

## GEOMETRIE

SECTIONS	250.0	270.0	280.0	287.0	290.0	300.0	310.0	320.0
FISSURATION	76.0	76.0	84.0	90.0	92.0	98.0	104.0	110.0
EAU-FISSURE	76.0	76.0	84.0	90.0	92.0	98.0	104.0	110.0

7 Mai 16:16 1985 stab.sor Page 2

FRONTIERE	1	76.0	76.0	84.0	90.0	92.0	98.0	104.0	110.0
FRONTIERE	2	110.0	110.0	110.0	110.0	110.0	110.0	110.0	110.0
FRONTIERE	3	122.0	122.0	122.0	122.0	122.0	122.0	122.0	122.0

## PROPRIETES DES SOLS

COUCHE	COHESION kPA	FROTTEMENT DEG.	DENSITE kN/m3	DESCRIPTION
1	15.0	29.0	16.6	PHOSPHOGYPSE
2	.0	35.0	22.4	SOL DE FONDATION

## Ecole Polytechnique de Thies - Calcul des stabilités de pentes

## M E T H O D E D E B I S H O P S I M P L I F I E E

ETUDE DE LA STABILITE DU TERRIL DES I.C.S. PAR B. PAKODTOGO, EI.

RAFFINEMENT DU CALCUL (h=30 m) (a tous les metres)

No	TANGENTE (m)	RAYON (m)	(X)CENTRE (m)	(Y)CENTRE (m)	FS (BISHOP)	FS (ORD.)
1	110.0	92.0	328.0	18.0	1.305	1.262
2	110.0	92.0	329.0	18.0	1.298	1.255
3	110.0	92.0	330.0	18.0	1.292	1.251
4	110.0	92.0	331.0	18.0	1.288	1.248
5	110.0	92.0	332.0	18.0	1.287	1.248
6	110.0	91.0	328.0	19.0	1.301	1.257
7	110.0	91.0	329.0	19.0	1.294	1.251
8	110.0	91.0	330.0	19.0	1.289	1.247
9	110.0	91.0	331.0	19.0	1.286	1.245
10	110.0	91.0	332.0	19.0	1.286	1.247
11	110.0	90.0	328.0	20.0	1.297	1.252
12	110.0	90.0	329.0	20.0	1.290	1.247
13	110.0	90.0	330.0	20.0	1.286	1.244
14	110.0	90.0	331.0	20.0	1.284	1.243
15	110.0	90.0	332.0	20.0	1.286	1.246
16	110.0	89.0	328.0	21.0	1.293	1.248
17	110.0	89.0	329.0	21.0	1.287	1.243
18	110.0	89.0	330.0	21.0	1.284	1.241
19	110.0	89.0	331.0	21.0	1.283	1.241
20	110.0	89.0	332.0	21.0	1.286	1.245
21	110.0	88.0	328.0	22.0	1.290	1.244
22	110.0	88.0	329.0	22.0	1.284	1.240
23	110.0	88.0	330.0	22.0	1.282	1.238
24	110.0	88.0	331.0	22.0	1.282	1.240
25	110.0	88.0	332.0	22.0	1.286	1.245

F.S. MINIMUM (BISHOP) = 1.282

\*\*\*\*\*

Rayon = 88.0 m : X , Y = ( 330.0 22.0 )

F.S. MINIMUM (ORDIN.) = 1.238

\*\*\*\*\*

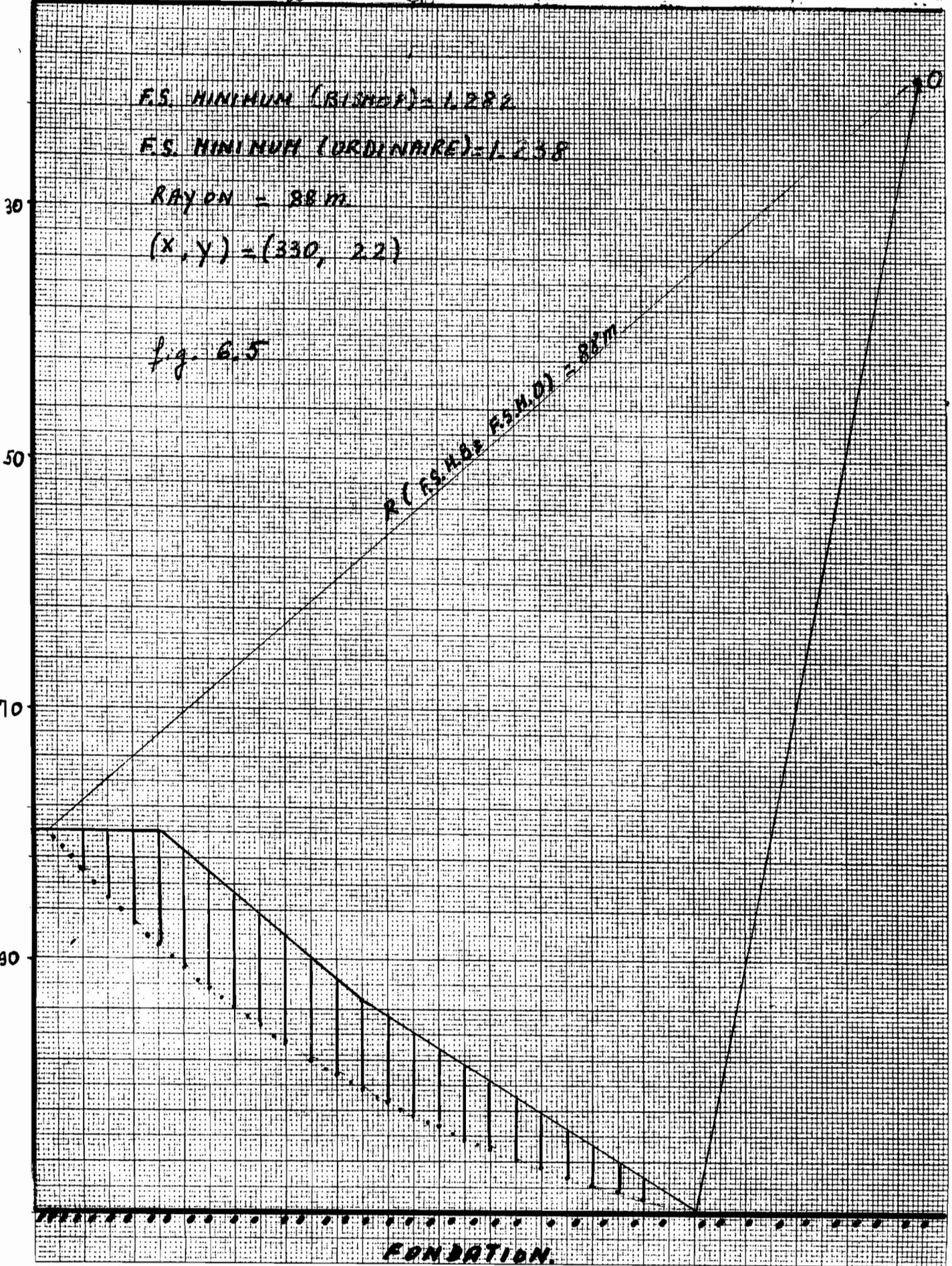
Rayon = 88.0 m : X , Y = ( 330.0 22.0 )

260

270

280

290



F.S. MINIMUM (BISMAR) = 1.282  
 F.S. MINIMUM (ORDINAIRE) = 1.238  
 RAYON = 88m  
 (x, y) = (330, 2.2)

fig. 6.5

R (R.S.M. & F.S.M.D.) = 88m

FONDATION.

## Ecole Polytechnique de Thies - Calcul des stabilités de pentes

## M E T H O D E D E B I S H O P S I M P L I F I E E

ETUDE DE LA STABILITE DU TERRIL DES I.C.S. PAR B. PAKODTOGO, EI.

EXTRAPOLATION POUR UNE HAUTEUR DE 50m (pentes sans changement)

## CONTROLE DES DONNEES

NOMBRE DE CENTRES SPECIFIES	9
NOMBRE DE TANGENTES LIMITES	1
NOMBRE DE SECTIONS VERTICALES	5
NOMBRE DE FRONTIERES ENTRE SOLS	3
NOMBRE DE LIGNES EQUIPRESSIONS	0
NOMBRE DE POINTS DEFINISSANT LA COHESION	0

COEFFICIENTS SISMIQUES S1	.000
S2	.000

\*\*\* SYSTEME METRIQUE \*\*\*\* kilo-Newton - metre

## CENTRES DES CERCLES (X,Y)

( 160.0 5.0 )	( 180.0 5.0 )	( 200.0 5.0 )	( 160.0 25.0 )
( 180.0 25.0 )	( 200.0 25.0 )	( 160.0 45.0 )	( 180.0 45.0 )
( 200.0 45.0 )	(		

TOUS LES CERCLES TANGENTS AUX PROFONDEURS, 110.0,

## GEOMETRIE

SECTIONS	100.0	110.0	125.0	145.0	185.0
FISSURATION	60.0	60.0	73.0	85.0	110.0
EAU-FISSURE	60.0	60.0	73.0	85.0	110.0
FRONTIERE 1	60.0	60.0	73.0	85.0	110.0
FRONTIERE 2	110.0	110.0	110.0	110.0	110.0
FRONTIERE 3	122.0	122.0	122.0	122.0	122.0

## PROPRIETES DES SOLS

COUCHE	COHESION kPA	FROTTEMENT DEG.	DENSITE kN/m3	DESCRIPTION
1	15.0	29.0	16.6	PHOSPHOGYPSE
2	.0	35.0	22.4	SOL DE FONDATION

## Ecole Polytechnique de Thies - Calcul des stabilités de pentes

-----  
M E T H O D E   D E   B I S H O P   S I M P L I F I E E

ETUDE DE LA STABILITE DU TERRIL DES I.C.S. PAR B. PAKODTOGO, EI.

EXTRAPOLATION POUR UNE HAUTEUR DE 50m (pentes sans changement)

No	TANGENTE (m)	RAYON (m)	(X)CENTRE (m)	(Y)CENTRE (m)	FS (BISHOP)	FS (ORD.)
1	110.0	105.0	160.0	5.0	1.375	1.234
2	110.0	105.0	180.0	5.0	1.262	1.181
3	110.0	105.0	200.0	5.0	1.299	1.264
4	110.0	85.0	160.0	25.0	1.414	1.259
5	110.0	85.0	180.0	25.0	1.247	1.151
6	110.0	85.0	200.0	25.0	1.487	1.462
7	110.0	65.0	160.0	45.0	1.456	1.270
8	110.0	65.0	180.0	45.0	1.341	1.247
9	110.0	65.0	200.0	45.0	2.270	2.259

F.S. MINIMUM (BISHOP) = 1.247

-----  
\*\*\*\*\*

Rayon = 85.0 m : X , Y = ( 180.0 25.0 )

F.S. MINIMUM (ORDIN.) = 1.151

-----  
\*\*\*\*\*

Rayon = 85.0 m : X , Y = ( 180.0 25.0 )

## Ecole Polytechnique de Thies - Calcul des stabilités de pentes

-----  
M E T H O D E    D E    B I S H O P    S I M P L I F I E E  
-----

ETUDE DE LA STABILITE DU TERRIL DES I.C.S. PAR B. PAKODTOGO, EI.

RAFFINEMENT POUR h=50m (extrapolation)

## CONTROLE DES DONNEES

NOMBRE DE CENTRES SPECIFIES	12
NOMBRE DE TANGENTES LIMITES	1
NOMBRE DE SECTIONS VERTICALES	5
NOMBRE DE FRONTIERES ENTRE SOLS	3
NOMBRE DE LIGNES EQUIPRESSIONS	0
NOMBRE DE POINTS DEFINISSANT LA COHESION	0

COEFFICIENTS SISMIQUES S1	.000
S2	.000

\*\*\* SYSTEME METRIQUE \*\*\*\* kilo-Newton - metre  
-----

## CENTRES DES CERCLES (X,Y)

( 197.0 -20.0 )	( 199.0 -20.0 )	( 201.0 -20.0 )	( 197.0 -15.0 )
( 199.0 -15.0 )	( 201.0 -15.0 )	( 197.0 -10.0 )	( 199.0 -10.0 )
( 201.0 -10.0 )	( 197.0 -5.0 )	( 199.0 -5.0 )	( 201.0 -5.0 )

TOUS LES CERCLES TANGENTS AUX PROFONDEURS, 110.0,

## GEOMETRIE

SECTIONS		100.0	110.0	125.0	145.0	185.0
FISSURATION		60.0	60.0	73.0	85.0	110.0
EAU-FISSURE		60.0	60.0	73.0	85.0	110.0
FRONTIERE	1	60.0	60.0	73.0	85.0	110.0
FRONTIERE	2	110.0	110.0	110.0	110.0	110.0
FRONTIERE	3	122.0	122.0	122.0	122.0	122.0

## Ecole Polytechnique de Thies - Calcul des stabilités de pentes

-----  
M E T H O D E D E B I S H O P S I M P L I F I E E

ETUDE DE LA STABILITE DU TERRIL DES I.C.S. PAR B. PAKODTOGO, EI.

RAFFINEMENT POUR h=50m (extrapolation)

No	TANGENTE (m)	RAYON (m)	(X)CENTRE (m)	(Y)CENTRE (m)	FS (BISHOP)	FS (ORD.)
1	110.0	130.0	197.0	-20.0	1.217	1.172
2	110.0	130.0	199.0	-20.0	1.213	1.171
3	110.0	130.0	201.0	-20.0	1.210	1.169
4	110.0	125.0	197.0	-15.0	1.212	1.166
5	110.0	125.0	199.0	-15.0	1.207	1.163
6	110.0	125.0	201.0	-15.0	1.205	1.162
7	110.0	120.0	197.0	-10.0	1.205	1.157
8	110.0	120.0	199.0	-10.0	1.203	1.157
9	110.0	120.0	201.0	-10.0	1.210	1.167
10	110.0	115.0	197.0	-5.0	1.203	1.153
11	110.0	115.0	199.0	-5.0	1.210	1.163
12	110.0	115.0	201.0	-5.0	1.229	1.186

F.S. MINIMUM (BISHOP) = 1.203

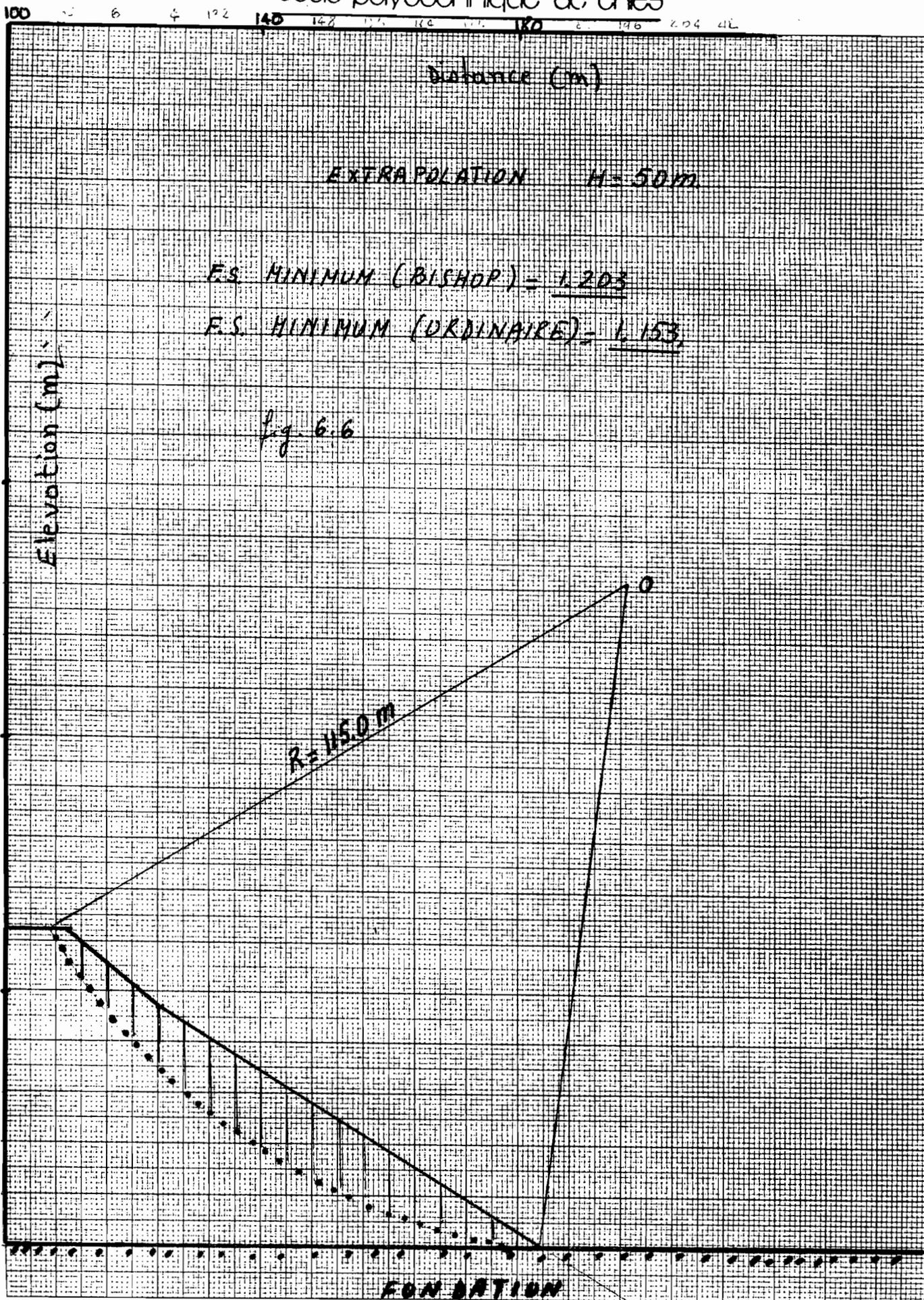
-----  
\*\*\*\*\*

Rayon = 115.0 m : X , Y = ( 197.0 -5.0 )

F.S. MINIMUM (ORDIN.) = 1.153

-----  
\*\*\*\*\*

Rayon = 115.0 m : X , Y = ( 197.0 -5.0 )



Ecole Polytechnique de Thies - Calcul des stabilités de pentes

M E T H O D E D E B I S H O P S I M P L I F I E E

ETUDE DE LA STABILITE DU TERRIL DES I.C.S. PAR B. PAKODTOGO, EI.

CALCUL POUR LA HAUTEUR FINALE DE 70m (extrapolation)

CONTROLE DES DONNEES

NOMBRE DE CENTRES SPECIFIES	9
NOMBRE DE TANGANTES LIMITES	1
NOMBRE DE SECTIONS VERTICALES	5
NOMBRE DE FRONTIERES ENTRE SOLS	3
NOMBRE DE LIGNES EQUIPRESSIONS	0
NOMBRE DE POINTS DEFINISSANT LA COHESION	0

COEFFICIENTS SISMIQUES S1	.000
S2	.000

\*\*\* SYSTEME METRIQUE \*\*\*\* kilo-Newton - metre

CENTRES DES CERCLES (X,Y)

( 300.0 -34.0 )	( 320.0 -34.0 )	( 340.0 -34.0 )	( 300.0 -14.0 )
( 320.0 -14.0 )	( 340.0 -14.0 )	( 300.0 6.0 )	( 320.0 6.0 )
( 340.0 6.0 )	(		

TOUS LES CERCLES TANGENTS AUX PROFONDEURS, 110.0,

GEOMETRIE

SECTIONS	200.0	216.0	236.0	256.0	312.0
FISSURATION	40.0	40.0	56.0	70.0	110.0
EAU-FISSURE	40.0	40.0	56.0	70.0	110.0
FRONTIERE 1	40.0	40.0	56.0	70.0	110.0
FRONTIERE 2	110.0	110.0	110.0	110.0	110.0
FRONTIERE 3	122.0	122.0	122.0	122.0	122.0

PROPRIETES DES SOLS

8 Mai 09:34 1985 stab.sor Page 3

## Ecole Polytechnique de Thies - Calcul des stabilités de pentes

-----  
M E T H O D E D E B I S H O P S I M P L I F I E E

ETUDE DE LA STABILITE DU TERRIL DES I.C.S. PAR B. PAKODTOGO, EI.

CALCUL POUR LA HAUTEUR FINALE DE 70m (extrapolation)

No	TANGENTE (m)	RAYON (m)	(X)CENTRE (m)	(Y)CENTRE (m)	FS (BISHOP)	FS (ORD.)
1	110.0	144.0	300.0	-34.0	1.271	1.186
2	110.0	144.0	320.0	-34.0	1.101	1.041
3	110.0	144.0	340.0	-34.0	1.076	1.044
4	110.0	124.0	300.0	-14.0	1.216	1.120
5	110.0	124.0	320.0	-14.0	1.064	.996
6	110.0	124.0	340.0	-14.0	1.185	1.163
7	110.0	104.0	300.0	6.0	1.171	1.058
8	110.0	104.0	320.0	6.0	1.093	1.029
9	110.0	104.0	340.0	6.0	1.572	1.562

F.S. MINIMUM (BISHOP) = 1.064

-----  
\*\*\*\*\*

Rayon = 124.0 m : X , Y = ( 320.0 -14.0 )

F.S. MINIMUM (ORDIN.) = .996

-----  
\*\*\*\*\*

Rayon = 124.0 m : X , Y = ( 320.0 -14.0 )

## Ecole Polytechnique de Thies - Calcul des stabilités de pentes

## M E T H O D E D E B I S H O P S I M P L I F I E E

ETUDE DE LA STABILITE DU TERRIL DES I.C.S. PAR B. PAKODTOGO, E.I.

RAFFINEMENT POUR LA HAUTEUR DE 70m(extrapolation)

## CONTROLE DES DONNEES

NOMBRE DE CENTRES SPECIFIES	18
NOMBRE DE TANGENTES LIMITES	1
NOMBRE DE SECTIONS VERTICALES	5
NOMBRE DE FRONTIERES ENTRE SOLS	3
NOMBRE DE LIGNES EQUIPRESSIONS	0
NOMBRE DE POINTS DEFINISSANT LA COHESION	0

COEFFICIENTS SISMIQUES S1	.000
S2	.000

\*\*\* SYSTEME METRIQUE \*\*\*\* kilo-Newton - metre

## CENTRES DES CERCLES (X,Y)

( 330.0 -54.0 )	( 332.0 -54.0 )	( 334.0 -54.0 )	( 336.0 -54.0 )
( 338.0 -54.0 )	( 340.0 -54.0 )	( 330.0 -34.0 )	( 332.0 -34.0 )
( 334.0 -34.0 )	( 336.0 -34.0 )	( 338.0 -34.0 )	( 340.0 -34.0 )
( 330.0 -14.0 )	( 332.0 -14.0 )	( 334.0 -14.0 )	( 336.0 -14.0 )
( 338.0 -14.0 )	( 340.0 -14.0 )	(	

TOUS LES CERCLES TANGENTS AUX PROFONDEURS, 110.0,

## GEOMETRIE

SECTIONS	200.0	216.0	236.0	256.0	312.0
FISSURATION	40.0	40.0	56.0	70.0	110.0
EAU-FISSURE	40.0	40.0	56.0	70.0	110.0
FRONTIERE 1	40.0	40.0	56.0	70.0	110.0
FRONTIERE 2	110.0	110.0	110.0	110.0	110.0

## Ecole Polytechnique de Thies - Calcul des stabilités de pentes

## METHODE DE BISHOP SIMPLIFIEE

ETUDE DE LA STABILITE DU TERRIL DES I.C.S. PAR B.PAKODTOGO, E.I.

RAFFINEMENT POUR LA HAUTEUR DE 70m(extrapolation)

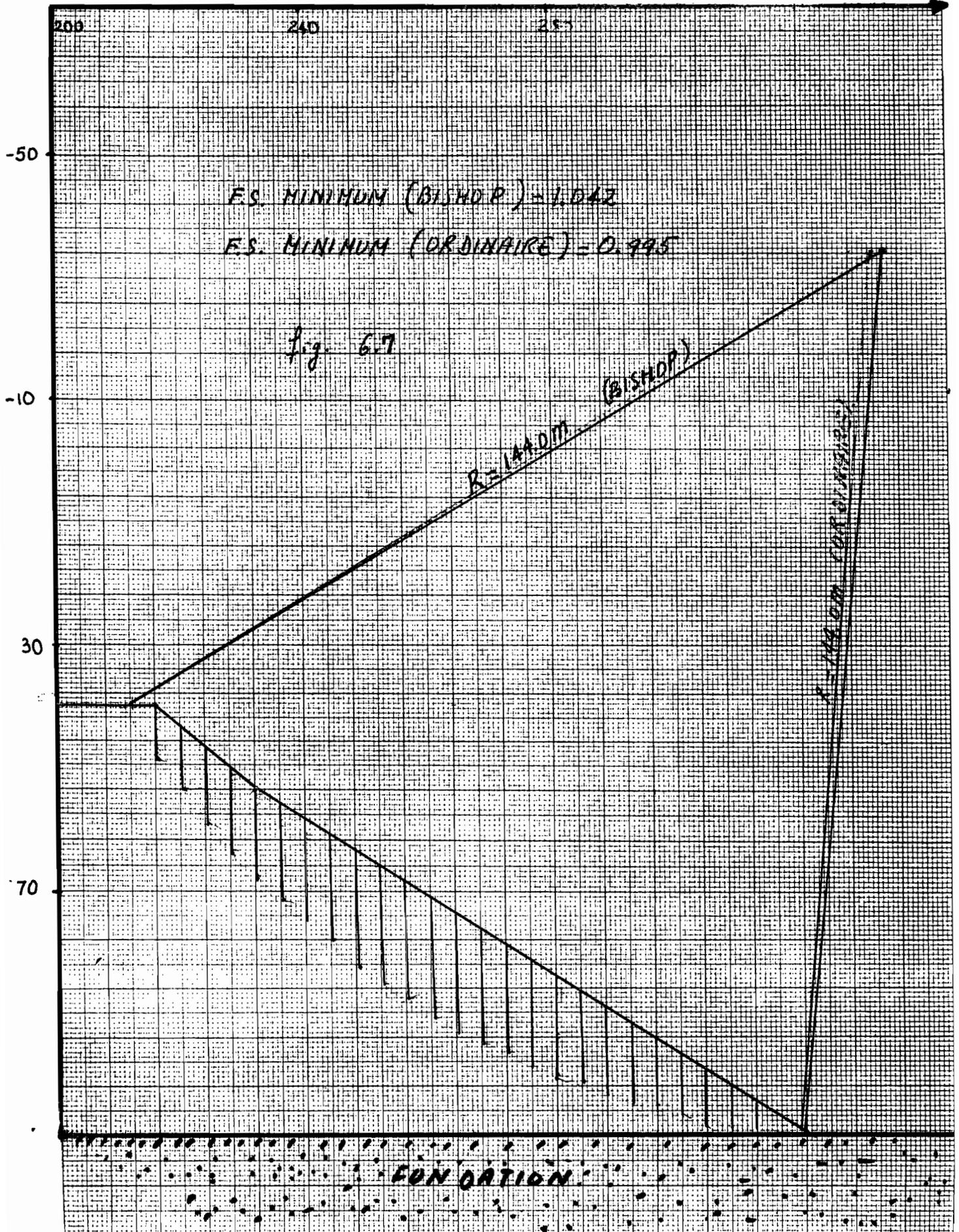
No	TANGENTE (m)	RAYON (m)	(X)CENTRE (m)	(Y)CENTRE (m)	FS (BISHOP)	FS (ORD.)
1	110.0	164.0	330.0	-54.0	1.088	1.042
2	110.0	164.0	332.0	-54.0	1.076	1.032
3	110.0	164.0	334.0	-54.0	1.065	1.023
4	110.0	164.0	336.0	-54.0	1.056	1.015
5	110.0	164.0	338.0	-54.0	1.048	1.009
6	110.0	164.0	340.0	-54.0	1.044	1.006
7	110.0	144.0	330.0	-34.0	1.047	.997
8	110.0	144.0	332.0	-34.0	1.043	.995
9	110.0	144.0	334.0	-34.0	1.042	.997
10	110.0	144.0	336.0	-34.0	1.046	1.004
11	110.0	144.0	338.0	-34.0	1.057	1.019
12	110.0	144.0	340.0	-34.0	1.076	1.044
13	110.0	124.0	330.0	-14.0	1.072	1.027
14	110.0	124.0	332.0	-14.0	1.084	1.043
15	110.0	124.0	334.0	-14.0	1.099	1.064
16	110.0	124.0	336.0	-14.0	1.120	1.089
17	110.0	124.0	338.0	-14.0	1.146	1.120
18	110.0	124.0	340.0	-14.0	1.185	1.163

F.S. MINIMUM (BISHOP) = 1.042

----- \*\*\*\*\*  
Rayon = 144.0 m : X , Y = ( 334.0 -34.0 )

F.S. MINIMUM (ORDIN.) = .995

----- \*\*\*\*\*  
Rayon = 144.0 m : X , Y = ( 332.0 -34.0 )



## ANNEXE III

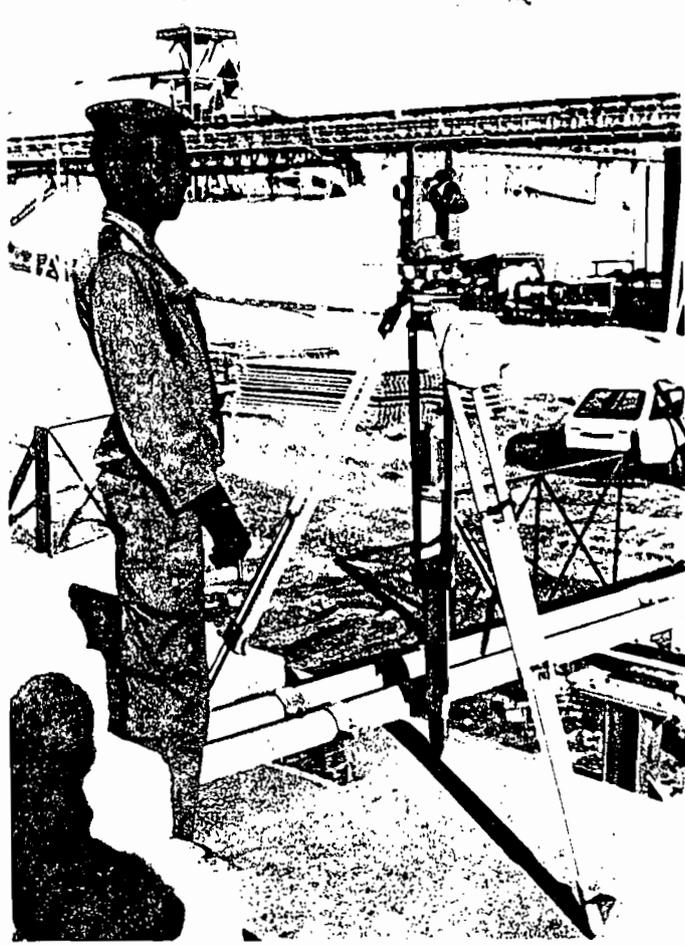
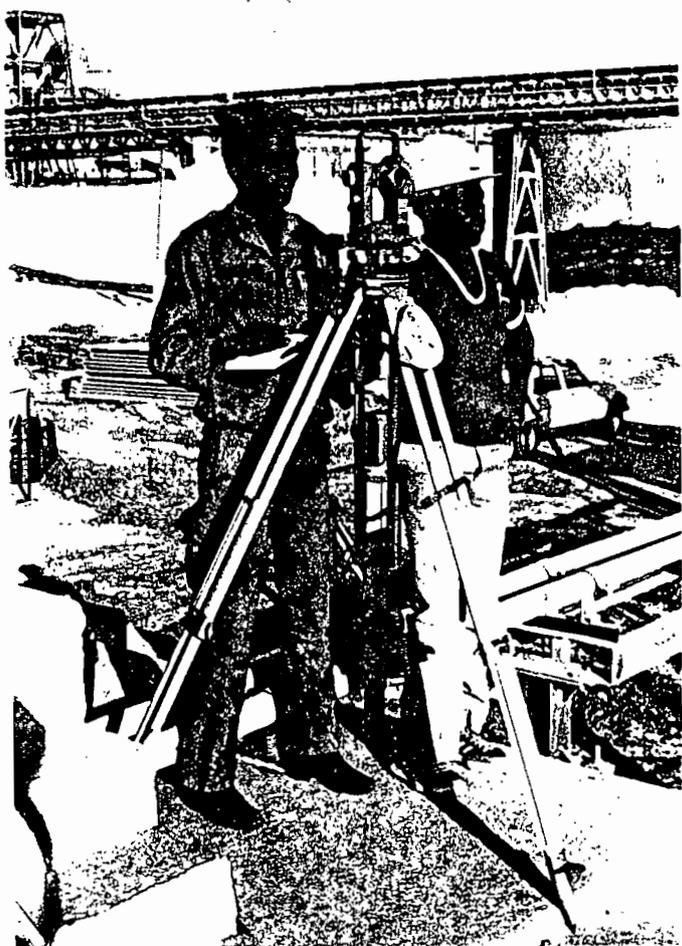
---

### . RELEVÉS TOPOGRAPHIQUES

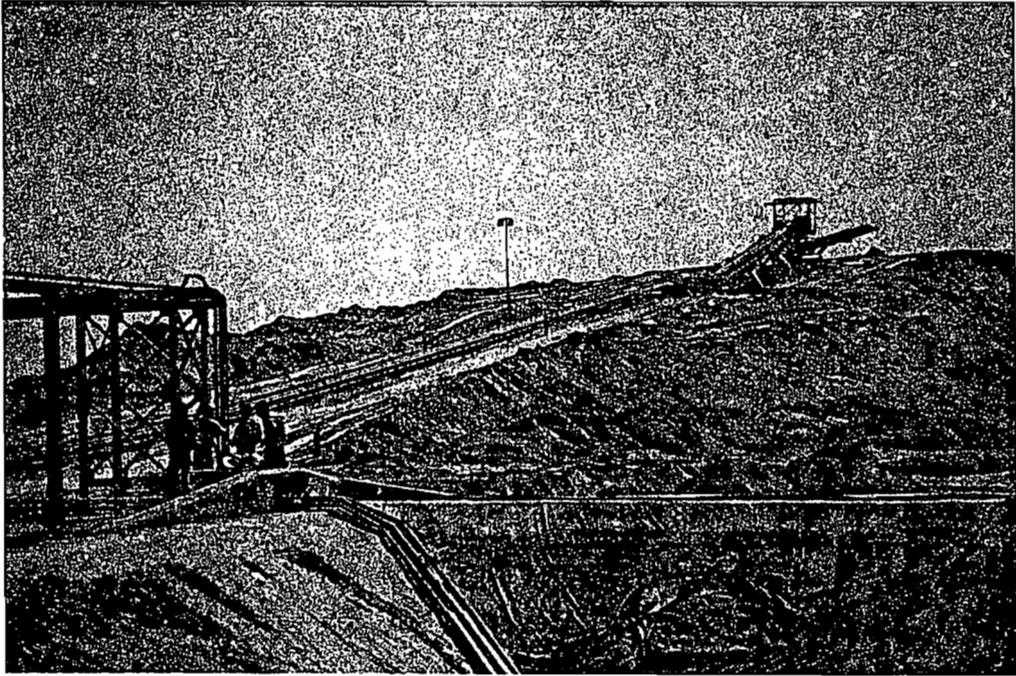
- COURBES HYPOMÉTRIQUES
- PROFIL EN LONG
- PROFILS EN TRAVERS

(voir plan et coupes dans l'enveloppe à la fin du rapport)

P H O T O G R A P H I E S







## ANNEXE IV

---

MANUEL D'UTILISATION DU PROGRAMME

PROGRAMME STABIL - MANUEL D'UTILISATION

ANALYSE DE LA STABILITE DES PENTES

Méthode modifiée de Bishop et Méthode ordinaire des Tranches

ENTREE DES DONNEES

1- Première carte:

Identification du cas étudié. Pas de restriction d'écriture, 72 caractères maximum.

2- Deuxième carte:

Ecrire chaque chiffre en commençant aux colonnes 1, 6, 11, 16, etc...

col 1-2        nombre de centres de cercles spécifiés - Maximum 40. Ecrire 09 et non pas 9.

col 6-7        nombre de tangentes horizontales limites - Maximum 08. Spécifier 00 si tous les cercles doivent passer par un même point.

col 11-12     nombre de sections verticales utilisées pour définir la géométrie du cas étudié - Maximum 17. Exemple 09.

col 16-17     nombre de couches + un. Maximum 12. Exemple 03.

col 21-22     nombre de lignes d'équipression interstitielle, fournies soit à partir d'un réseau d'écoulement soit à partir de relevés piézométriques. Maximum 12. Ecrire 01 dans le cas d'une nappe sans écoulement et -1 dans le cas où on utilise un coefficient  $R_u$ .

col 26-27     nombre de points servant à définir la courbe de cohésion non drainée - Maximum 12. Ne rien écrire si cette option n'est pas utilisée.

col 31-35     coefficient sismique  $S_1$ .

col 36-40     coefficient sismique  $S_2$ .  
Si  $S_1 = S_2$ , la force sismique est appliquée au centre de la tranche. Si  $S_2$  est nul, mais pas  $S_1$ , la force sismique est appliquée à la base de la tranche.

### 3- Troisième carte:

Description de la grille des centres des cercles spécifiés.

- col 1-10      abscisse X du premier cercle.
- col 11-20     ordonnée Y du premier cercle.  
Prendre les deux valeurs minimales, soit le point le plus haut du côté du sommet de la pente.
- col 21-22     nombre de centres suivant l'axe des X. Exemple 04.
- col 26-27     nombre de centres suivant l'axe des Y. Exemple 03.
- col 31-40     côté de la grille suivant l'axe des X.
- col 41-50     côté de la grille suivant l'axe des Y.

### 4- Quatrième carte:

Options concernant les cercles spécifiés.

- a) Tous les cercles peuvent passer par un même point. Donner alors les coordonnées X et Y de ce point.
- b) Tous les cercles peuvent être tangents à une série de droites horizontales: Donner les ordonnées de ces tangentes (huit au maximum).

Ecrire les chiffres en commençant aux colonnes 1, 11, 21, 31 ...

### 5- Cartes de géométrie:

Donner pour chaque section verticale les informations suivantes:

- a) L'abscisse X de la section suivie des ordonnées Y,
- b) Du point le plus bas de la fissure de traction,
- c) Du niveau de l'eau dans cette fissure,  
(s'il n'y a pas de fissure, ces ordonnées sont égales à celle du terrain)
- d) Du sommet de chaque couche.

Utiliser une nouvelle carte pour chaque nouvelle section. Ecrire les chiffres en commençant aux colonnes 1, 11, 21, 31 ...

### 6- Cartes des propriétés mécaniques:

Utiliser une carte pour chaque couche (maximum 11).

Inscrire le no. de la couche dans les deux premières colonnes, par exemple 06.

Inscrire ensuite - la cohésion  
- l'angle de frottement (degré)  
- le poids total du sol

en commençant aux colonnes 11, 21, 31 .

( Description du sol, colonnes 41 à 60 )

### 7- Cartes des pressions interstitielles:

- a) Dans le cas d'une analyse en contraintes totales, aucune carte n'est requise.
- b) Dans le cas d'un calcul avec  $R_u$ , donner la valeur utilisée.
- c) Dans le cas d'une ou plusieurs lignes équipressions, donner l'abscisse de la section et la série des ordonnées successives des équipressions. Commencer chaque section sur une nouvelle carte, en commençant toujours chaque chiffre aux colonnes 1, 11, 21, 31 ...

S'il y a plusieurs lignes, entrer sur la carte suivante les valeurs des pressions affectées à chaque ligne, en poursuivant sur une nouvelle carte si nécessaire.

Aucune carte n'est requise s'il n'y a qu'une nappe phréatique.

### 8- Cartes de la variation de cohésion non drainée:

Aucune carte n'est requise si l'option n'a pas été choisie. Sinon, entrer à la suite les couples élévation-valeur de la cohésion qui définissent le profil, en commençant aux colonnes 1, 11, 21, 31 ...

Si on veut traiter un autre cas, il suffit de mettre à la suite de ces premières cartes les cartes du deuxième cas précédées par une carte d'identification.

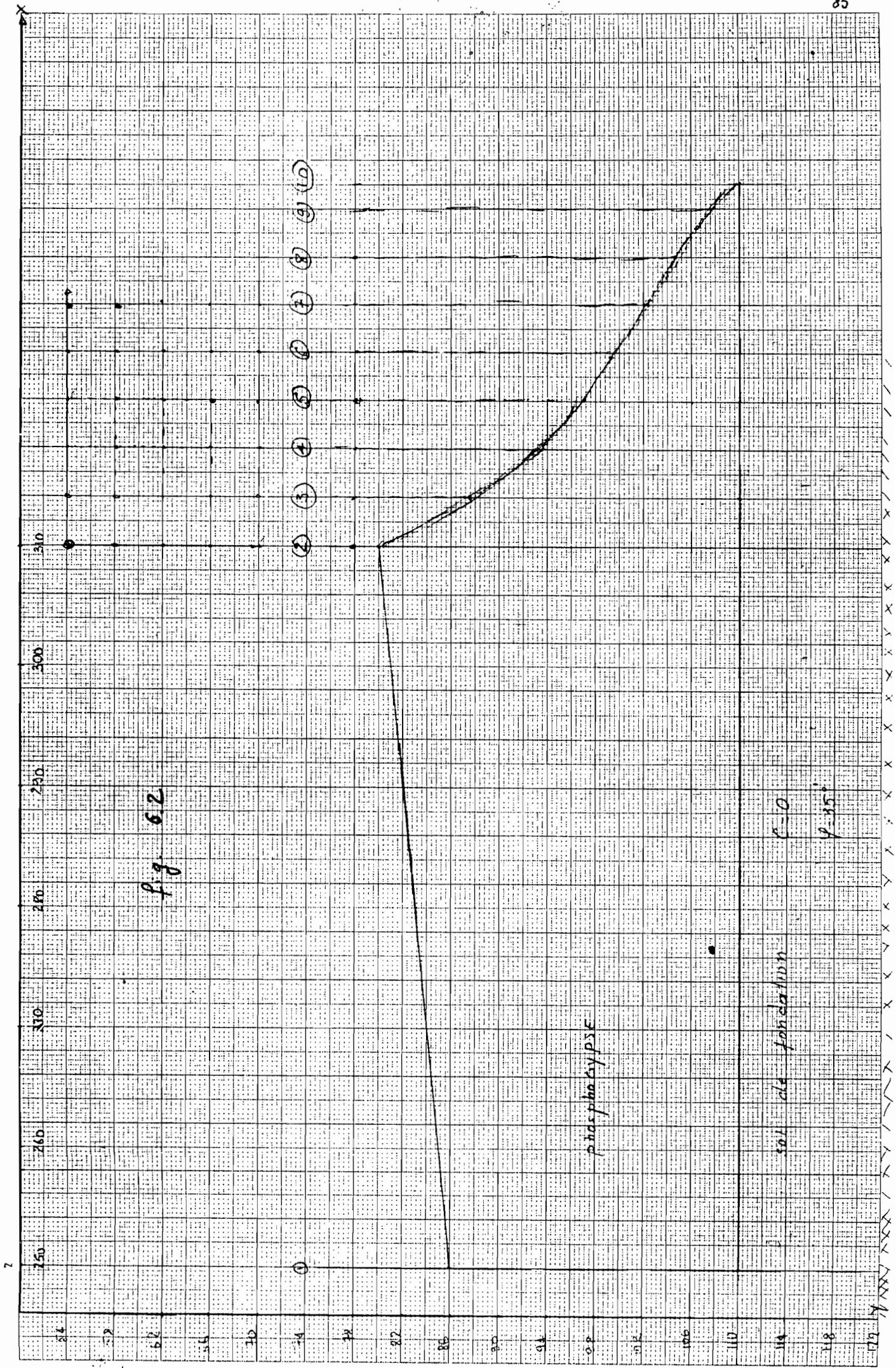
Il est recommandé pour toute étude de stabilité de faire un premier calcul avec une grille grossière, de 4 x 4 par exemple et quelques tangentes, 3 par exemple.

Ce procédé a deux buts: Il permet d'éviter un long temps de calcul avec des données qui peuvent contenir une erreur indétectable par l'ordinateur; il permet ensuite de localiser approximativement la position du cercle critique.

Un deuxième calcul sera effectué avec une grille plus précise, en utilisant les résultats du premier calcul.

Les seules données modifiées d'un calcul à l'autre se trouvent réunies dans les cartes #2, 3 et 4.

Il est important de noter que la seule contrainte imposée pour les unités est la prise en compte dans le programme du poids spécifique de l'eau.





## ANNEXE V

-----

ÉSSAIS DE VALIDATION DU PROGRAMME.

Ecole Polytechnique de Thies - Calcul des stabilités de pentes  
-----  
M E T H O D E   D E   B I S H O P   S I M P L I F I E E  
-----

STABIL Essai-1 Calcul propose par les auteurs du programme STABR

Essai de validation d'apres etudes du B.R.G.M.

CONTROLE DES DONNEES

NOMBRE DE CENTRES SPECIFIES	25
NOMBRE DE TANGANTES LIMITEES	1
NOMBRE DE SECTIONS VERTICALES	4
NOMBRE DE FRONTIERES ENTRE SOLS	6
NOMBRE DE LIGNES EQUIPRESSIONS	0
NOMBRE DE POINTS DEFINISSANT LA COHESION	4

COEFFICIENTS SISMIQUES S1	.000
S2	.000

\*\*\* SYSTEME IMPERIAL \*\*\*\* Livre - pied  
-----

CENTRES DES CERCLES (X,Y)

( 40.0 20.0 )	( 42.0 20.0 )	( 44.0 20.0 )	( 46.0 20.0 )
( 48.0 20.0 )	( 40.0 22.0 )	( 42.0 22.0 )	( 44.0 22.0 )
( 46.0 22.0 )	( 48.0 22.0 )	( 40.0 24.0 )	( 42.0 24.0 )
( 44.0 24.0 )	( 46.0 24.0 )	( 48.0 24.0 )	( 40.0 26.0 )
( 42.0 26.0 )	( 44.0 26.0 )	( 46.0 26.0 )	( 48.0 26.0 )
( 40.0 28.0 )	( 42.0 28.0 )	( 44.0 28.0 )	( 46.0 28.0 )
( 48.0 28.0 )	(		

TOUS LES CERCLES TANGENTS AUX PROFONDEURS, 54.0,

GEOMETRIE

SECTIONS	-50.0	40.0	55.4	200.0
FISSURATION	35.0	35.0	40.0	40.0
EAU-FISSURE	35.0	35.0	40.0	40.0

FRONTIERE	1	27.7	27.7	40.0	40.0
FRONTIERE	2	40.0	40.0	40.0	40.0
FRONTIERE	3	42.5	42.5	42.5	42.5
FRONTIERE	4	53.1	53.1	53.1	53.1
FRONTIERE	5	59.7	59.7	59.7	59.7
FRONTIERE	6	68.0	68.0	68.0	68.0

PROPRIETES DES SOLS

COUCHE	COHESION lb/pi <sup>2</sup>	FROTTEMENT DEC.	DENSITE lb/pi <sup>3</sup>	DESCRIPTION
1	615.0	31.0	123.5	
2	-1.0	.0	90.0	
3	-1.0	.0	89.7	
4	-1.0	.0	84.0	
5	-1.0	.0	87.0	

COHESION NON DRAINEE vs PROFONDEUR

PROFONDEUR	COHESION
40.0	750.0
44.0	260.0
48.2	260.0
68.0	520.0

Ecole Polytechnique de Thies - Calcul des stabilités de pentes

M E T H O D E D E B I S H O P S I M P L I F I E E

STABIL Essai-1 Calcul propose par les auteurs du programme STABR

Essai de validation d'apres etudes du B.R.C.M.

No	TANGENTE (pi)	RAYON (pi)	(X)CENTRE (pi)	(Y)CENTRE (pi)	FS (BISHOP)	FS (ORD.)
1	54.0	34.0	40.0	20.0	1.411	1.418
2	54.0	34.0	42.0	20.0	1.362	1.373
3	54.0	34.0	44.0	20.0	1.329	1.342
4	54.0	34.0	46.0	20.0	1.312	1.326
5	54.0	34.0	48.0	20.0	1.310	1.324
6	54.0	32.0	40.0	22.0	1.409	1.418
7	54.0	32.0	42.0	22.0	1.356	1.369
8	54.0	32.0	44.0	22.0	1.322	1.337
9	54.0	32.0	46.0	22.0	1.303	1.320
10	54.0	32.0	48.0	22.0	1.299	1.316
11	54.0	30.0	40.0	24.0	1.414	1.426
12	54.0	30.0	42.0	24.0	1.356	1.371
13	54.0	30.0	44.0	24.0	1.317	1.335
14	54.0	30.0	46.0	24.0	1.296	1.316
15	54.0	30.0	48.0	24.0	1.291	1.311
16	54.0	28.0	40.0	26.0	1.423	1.438
17	54.0	28.0	42.0	26.0	1.358	1.377
18	54.0	28.0	44.0	26.0	1.315	1.338
19	54.0	28.0	46.0	26.0	1.292	1.316
20	54.0	28.0	48.0	26.0	1.286	1.310
21	54.0	26.0	40.0	28.0	1.438	1.459
22	54.0	26.0	42.0	28.0	1.364	1.390
23	54.0	26.0	44.0	28.0	1.316	1.346
24	54.0	26.0	46.0	28.0	1.290	1.321
25	54.0	26.0	48.0	28.0	1.284	1.315

F. S. MINIMUM (BISHOP) = 1.284

\*\*\*\*\*

Rayon = 26.0 m : X , Y = ( 48.0 28.0 )

F. S. MINIMUM (ORDIN.) = 1.310

\*\*\*\*\*

Rayon = 28.0 m : X , Y = ( 48.0 26.0 )

Ecole Polytechnique de Thies - Calcul des stabilités de pentes

-----  
M E T H O D E   D E   B I S H O P   S I M P L I F I E E  
-----

STABIL Essai-2 Glissement de terrain de Logaden en Suede (Mougin)

Essai de validation d'apres etude du B.R.G.M.

CONTROLE DES DONNEES

NOMBRE DE CENTRES SPECIFIES	14
NOMBRE DE TANGANTES LIMITES	0
NOMBRE DE SECTIONS VERTICALES	8
NOMBRE DE FRONTIERES ENTRE SOLS	2
NOMBRE DE LIGNES EQUIPRESSIONS	8
NOMBRE DE POINTS DEFINISSANT LA COHESION	0

COEFFICIENTS SISMIQUES S1	.000
S2	.000

\*\*\* SYSTEME METRIQUE \*\*\*\* kilo-Newton - metre

-----  
CENTRES DES CERCLES (X,Y)

( 30.0 10.0 )	( 34.0 10.0 )	( 38.0 10.0 )	( 42.0 10.0 )
( 46.0 10.0 )	( 50.0 10.0 )	( 54.0 10.0 )	( 30.0 14.0 )
( 34.0 14.0 )	( 38.0 14.0 )	( 42.0 14.0 )	( 46.0 14.0 )
( 50.0 14.0 )	( 54.0 14.0 )	(	

TOUS LES CERCLES PASSENT PAR LE POINT ( 12.5, 26.0)

GEOMETRIE

SECTIONS		0	15.0	18.0	30.0	44.0	52.0	58.0	67.0
FISSURATION		26.0	26.0	26.0	32.0	39.0	43.0	43.5	43.5
EAU-FISSURE		26.0	26.0	26.0	32.0	39.0	43.0	43.5	43.5
FRONTIERE 1		26.0	26.0	26.0	32.0	39.0	43.0	43.5	43.5
FRONTIERE 2		58.0	58.0	58.0	58.0	58.0	58.0	58.0	58.0

PROPRIETES DES SOLS

COUCHE	COHESION kPA	FROTTEMENT DEG.	DENSITE kN/m3	DESCRIPTION
1	9.8	27.1	19.6	

## PRESSIONS INTERSTITIELLES

## COORDONNEES DES LIGNES EQUIPRESSIONS

SECTIONS	.0	15.0	18.0	30.0	44.0	52.0	58.0	67.0
LIGNE 1	28.7	30.5	31.0	34.5	40.0	43.0	44.0	44.0
LIGNE 2	31.0	32.0	32.5	37.0	42.3	45.5	46.5	46.5
LIGNE 3	33.0	34.0	34.7	39.0	44.5	47.0	48.0	48.0
LIGNE 4	34.0	35.5	36.3	40.5	46.0	48.5	49.5	49.5
LIGNE 5	35.0	36.7	37.7	42.3	48.0	50.0	51.0	51.0
LIGNE 6	36.0	38.3	39.3	43.5	49.7	52.0	53.0	53.0
LIGNE 7	38.3	40.0	40.5	45.3	51.7	54.0	55.0	55.0
LIGNE 8	40.0	41.7	42.5	47.3	53.7	56.3	57.3	57.3

## VALEURS DES PRESSIONS SUR LES LIGNES EQUIPRESSIONS

LIGNE	PRESSION
1	.0
2	19.6
3	39.2
4	58.9
5	78.5
6	98.1
7	117.7
8	137.3

## Ecole Polytechnique de Thies - Calcul des stabilités de pentes

-----  
M E T H O D E   D E   B I S H O P   S I M P L I F I E E

STABIL Essai-2 Glissement de terrain de Logaden en Suede (Mougin)

Essai de validation d'apres etude du B.R.C.M.

No	TANGENTE (m)	RAYON (m)	(X)CENTRE (m)	(Y)CENTRE (m)	FS (BISHOP)	FS (ORD.)
1	33.7	23.7	30.0	10.0	2.008	1.937
2	36.8	26.8	34.0	10.0	1.594	1.505
3	40.1	30.1	38.0	10.0	1.336	1.228
4	43.6	33.6	42.0	10.0	1.136	1.013
5	47.1	37.1	46.0	10.0	1.094	.919
6	50.8	40.8	50.0	10.0	1.161	.905
7	54.5	44.5	54.0	10.0	1.160	.872
8	35.2	21.2	30.0	14.0	1.792	1.681
9	38.6	24.6	34.0	14.0	1.466	1.332
10	42.2	28.2	38.0	14.0	1.237	1.083
11	45.8	31.8	42.0	14.0	1.085	.907
12	49.6	35.6	46.0	14.0	1.144	.879
13	53.4	39.4	50.0	14.0	1.212	.877
14	57.2	43.2	54.0	14.0	1.257	.910

F.S. MINIMUM (BISHOP) = 1.085

-----  
\*\*\*\*\*  
Rayon = 31.8 m : X , Y = ( 42.0 14.0 )

F.S. MINIMUM (ORDIN.) = .872

-----  
\*\*\*\*\*  
Rayon = 44.5 m : X , Y = ( 54.0 10.0 )

Ecole Polytechnique de Thies - Calcul des stabilités de pentes  
 -----  
 METHODE DE BISHOP SIMPLIFIEE

STABIL Essai-3 Stabilité de talus aval de barrage (SHERARD)

Essai de validation d'après étude du B.R.G.M.

CONTROLE DES DONNEES

NOMBRE DE CENTRES SPECIFIES	30
NOMBRE DE TANGENTES LIMITES	1
NOMBRE DE SECTIONS VERTICALES	9
NOMBRE DE FRONTIERES ENTRE SOLS	4
NOMBRE DE LIGNES EQUIPRESSIONS	4
NOMBRE DE POINTS DEFINISSANT LA COHESION	0

COEFFICIENTS SISMIQUES S1	.000
S2	.000

\*\*\* SYSTEME METRIQUE \*\*\*\* tonne - metre  
 -----

CENTRES DES CERCLES (X,Y)

( 130.0 54.0 )	( 134.0 54.0 )	( 138.0 54.0 )	( 142.0 54.0 )
( 146.0 54.0 )	( 150.0 54.0 )	( 130.0 58.0 )	( 134.0 58.0 )
( 138.0 58.0 )	( 142.0 58.0 )	( 146.0 58.0 )	( 150.0 58.0 )
( 130.0 62.0 )	( 134.0 62.0 )	( 138.0 62.0 )	( 142.0 62.0 )
( 146.0 62.0 )	( 150.0 62.0 )	( 130.0 66.0 )	( 134.0 66.0 )
( 138.0 66.0 )	( 142.0 66.0 )	( 146.0 66.0 )	( 150.0 66.0 )
( 130.0 70.0 )	( 134.0 70.0 )	( 138.0 70.0 )	( 142.0 70.0 )
( 146.0 70.0 )	( 150.0 70.0 )	(	

TOUS LES CERCLES TANGENTS AUX PROFONDEURS, 150.0,

GEOMETRIE

SECTIONS	25.0	31.0	38.5	48.0	60.0	73.0	82.0	110.0	200.0
FISSURATION	80.0	76.0	73.0	73.0	79.0	86.0	90.5	105.0	150.0

EAU-FISSURE		80.0	76.0	73.0	73.0	79.0	86.0	90.5	105.0	150.0
FRONTIERE	1	80.0	76.0	73.0	73.0	79.0	86.0	90.5	105.0	150.0
FRONTIERE	2	104.0	90.0	73.0	73.0	101.0	129.0	150.0	150.0	150.0
FRONTIERE	3	104.0	90.0	76.5	84.0	101.0	129.0	150.0	150.0	150.0
FRONTIERE	4	150.0	150.0	150.0	150.0	150.0	150.0	150.0	150.0	150.0

PROPRIETES DES SOLS

COUCHE	COHESION t/m2	FROTTEMENT DEG	DENSITE t/m3	DESCRIPTION
1	0	38.7	2.0	
2	2.4	26.6	2.0	
3	2.4	26.6	1.9	

PRESSIONS INTERSTITIELLES

COORDONNEES DES LIGNES EQUIPRESSIONS

SECTIONS	25.0	31.0	38.5	48.0	60.0	73.0	82.0	110.0	200.0
LIGNE 1	80.0	76.0	76.5	83.5	101.0	129.0	150.0	150.0	150.0
LIGNE 2	82.0	82.0	84.0	91.0	107.0	132.0	150.0	150.0	150.0
LIGNE 3	86.0	86.0	89.0	99.0	114.0	137.0	150.0	150.0	150.0
LIGNE 4	91.5	91.5	95.5	105.5	121.0	141.0	150.0	150.0	150.0

VALEURS DES PRESSIONS SUR LES LIGNES EQUIPRESSIONS

LIGNE	PRESSION
1	0
2	0.5
3	1.0
4	1.5

Ecole Polytechnique de Thies - Calcul des stabilités de pentes  
 -----  
 METHODE DE BISHOP SIMPLIFIEE

STABIL Essai-3 Stabilité de talus aval de barrage (SHERARD)

Essai de validation d'après étude du B.R.G.M.

No	TANGENTE (m)	RAYON (m)	(X)CENTRE (m)	(Y)CENTRE (m)	FS (BISHOP)	FS (ORD.)
1	150.0	96.0	130.0	54.0	2.319	1.992
2	150.0	96.0	134.0	54.0	2.299	1.981
3	150.0	96.0	138.0	54.0	2.290	1.975
4	150.0	96.0	142.0	54.0	2.296	1.976
5	150.0	96.0	146.0	54.0	2.294	1.948
6	150.0	96.0	150.0	54.0	2.250	1.925
7	150.0	92.0	130.0	58.0	2.362	2.016
8	150.0	92.0	134.0	58.0	2.347	2.007
9	150.0	92.0	138.0	58.0	2.347	2.007
10	150.0	92.0	142.0	58.0	2.370	1.988
11	150.0	92.0	146.0	58.0	2.323	1.963
12	150.0	92.0	150.0	58.0	2.277	1.940
13	150.0	88.0	130.0	62.0	2.414	2.045
14	150.0	88.0	134.0	62.0	2.408	2.043
15	150.0	88.0	138.0	62.0	2.418	2.037
16	150.0	88.0	142.0	62.0	2.405	2.007
17	150.0	88.0	146.0	62.0	2.355	1.981
18	150.0	88.0	150.0	62.0	2.306	1.957
19	150.0	84.0	130.0	66.0	2.481	2.085
20	150.0	84.0	134.0	66.0	2.484	2.082
21	150.0	84.0	138.0	66.0	2.499	2.058
22	150.0	84.0	142.0	66.0	2.444	2.029
23	150.0	84.0	146.0	66.0	2.390	2.002
24	150.0	84.0	150.0	66.0	2.338	1.975
25	150.0	80.0	130.0	70.0	2.565	2.133
26	150.0	80.0	134.0	70.0	2.608	2.117
27	150.0	80.0	138.0	70.0	2.547	2.084
28	150.0	80.0	142.0	70.0	2.487	2.054
29	150.0	80.0	146.0	70.0	2.429	2.024
30	150.0	80.0	150.0	70.0	2.373	1.994

F.S. MINIMUM (BISHOP) = 2.250  
-----  
XXXX  
Rayon = 96.0 m : X, Y = ( 150.0 54.0 )

F.S. MINIMUM (ORDIN.) = 1.925  
-----  
XXXX  
Rayon = 96.0 m : X, Y = ( 150.0 54.0 )

Ecole Polytechnique de Thies - Calcul des stabilités de pentes

M E T H O D E D E B I S H O P S I M P L I F I E E

STABIL Essai-4 Tire de l'ouvrage de Pilot et Moreau (p.29)

Essai de validation d'apres etude du B.R.G.M.

CONTROLE DES DONNEES

NOMBRE DE CENTRES SPECIFIES	35
NOMBRE DE TANGENTES LIMITEES	1
NOMBRE DE SECTIONS VERTICALES	15
NOMBRE DE FRONTIERES ENTRE SOLS	3
NOMBRE DE LIGNES EQUIPRESSIONS	0
NOMBRE DE POINTS DEFINISSANT LA COHESION	0

COEFFICIENTS SISMIQUES S1	.000
S2	.000

\*\*\* SYSTEME METRIQUE \*\*\*\* tonne - metre

CENTRES DES CERCLES (X,Y)

( 34.0 4.0 )	( 36.0 4.0 )	( 38.0 4.0 )	( 40.0 4.0 )
( 42.0 4.0 )	( 44.0 4.0 )	( 46.0 4.0 )	( 34.0 6.0 )
( 36.0 6.0 )	( 38.0 6.0 )	( 40.0 6.0 )	( 42.0 6.0 )
( 44.0 6.0 )	( 46.0 6.0 )	( 34.0 8.0 )	( 36.0 8.0 )
( 38.0 8.0 )	( 40.0 8.0 )	( 42.0 8.0 )	( 44.0 8.0 )
( 46.0 8.0 )	( 34.0 10.0 )	( 36.0 10.0 )	( 38.0 10.0 )
( 40.0 10.0 )	( 42.0 10.0 )	( 44.0 10.0 )	( 46.0 10.0 )
( 34.0 12.0 )	( 36.0 12.0 )	( 38.0 12.0 )	( 40.0 12.0 )
( 42.0 12.0 )	( 44.0 12.0 )	( 46.0 12.0 )	(

TOUS LES CERCLES TANGENTS AUX PROFONDEURS, 40.0,

GEOMETRIE

SECTIONS	-50.0	.0	10.0	20.0	24.0	30.0	39.2	44.0	49.2	52.0	55.0	60.0	70.0	80.0	100.0
----------	-------	----	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	-------

FISSURATION		15.0	15.0	15.0	15.0	15.0	18.0	22.6	22.6	22.6	23.8	25.0	25.0	25.0	25.0	25.0
EAU-FISSURE		15.0	15.0	15.0	15.0	15.0	18.0	22.6	22.6	22.6	23.8	25.0	25.0	25.0	25.0	25.0
FRONTIERE	1	15.0	15.0	15.0	15.0	15.0	18.0	22.6	22.6	22.6	23.8	25.0	25.0	25.0	25.0	25.0
FRONTIERE	2	25.0	25.0	25.0	25.0	25.0	25.0	25.0	25.0	25.0	25.0	25.0	25.0	25.0	25.0	25.0
FRONTIERE	3	40.0	40.0	40.0	40.0	40.0	40.0	40.0	40.0	40.0	40.0	40.0	40.0	40.0	40.0	40.0

PROPRIETES DES SOLS

COUCHE	COHESION t/m2	FROTTEMENT DEG.	DENSITE t/m3	DESCRIPTION
1	.0	35.0	2.2	
2	3.0	.0	2.0	

## Ecole Polytechnique de Thies - Calcul des stabilités de pentes

-----  
M E T H O D E     D E     B I S H O P     S I M P L I F I E E

STABIL Essai-4 Tire de l'ouvrage de Pilot et Moreau (p.29)

Essai de validation d'apres etude du B.R.G.M.

No	TANGENTE (m)	RAYON (m)	(X)CENTRE (m)	(Y)CENTRE (m)	FS (BISHOP)	FS (ORD.)
1	40.0	36.0	34.0	4.0	.844	.794
2	40.0	36.0	36.0	4.0	.838	.789
3	40.0	36.0	38.0	4.0	.840	.791
4	40.0	36.0	40.0	4.0	.850	.800
5	40.0	36.0	42.0	4.0	.869	.815
6	40.0	36.0	44.0	4.0	.897	.839
7	40.0	36.0	46.0	4.0	.936	.873
8	40.0	34.0	34.0	6.0	.844	.791
9	40.0	34.0	36.0	6.0	.838	.786
10	40.0	34.0	38.0	6.0	.840	.787
11	40.0	34.0	40.0	6.0	.851	.797
12	40.0	34.0	42.0	6.0	.871	.814
13	40.0	34.0	44.0	6.0	.902	.840
14	40.0	34.0	46.0	6.0	.946	.877
15	40.0	32.0	34.0	8.0	.847	.790
16	40.0	32.0	36.0	8.0	.840	.784
17	40.0	32.0	38.0	8.0	.842	.786
18	40.0	32.0	40.0	8.0	.854	.797
19	40.0	32.0	42.0	8.0	.877	.816
20	40.0	32.0	44.0	8.0	.911	.845
21	40.0	32.0	46.0	8.0	.961	.887
22	40.0	30.0	34.0	10.0	.853	.793
23	40.0	30.0	36.0	10.0	.845	.786
24	40.0	30.0	38.0	10.0	.848	.788
25	40.0	30.0	40.0	10.0	.861	.800
26	40.0	30.0	42.0	10.0	.887	.822
27	40.0	30.0	44.0	10.0	.926	.855
28	40.0	30.0	46.0	10.0	.983	.902
29	40.0	28.0	34.0	12.0	.865	.801
30	40.0	28.0	36.0	12.0	.855	.793
31	40.0	28.0	38.0	12.0	.858	.796
32	40.0	28.0	40.0	12.0	.874	.809
33	40.0	28.0	42.0	12.0	.903	.834
34	40.0	28.0	44.0	12.0	.949	.872
35	40.0	28.0	46.0	12.0	1.015	.928

25 Apr 18:02 1985 tes4b.sor Page 4

F.S. MINIMUM (BISHOP) = .838  
-----  
\*\*\*\*\*  
Rayon = 34.0 m ; X, Y = ( 36.0 6.0 )

F.S. MINIMUM (ORDIN.) = .784  
-----  
\*\*\*\*\*  
Rayon = 32.0 m ; X, Y = ( 36.0 8.0 )

Ecole Polytechnique de Thies - Calcul des stabilités de pentes

M E T H O D E D E B I S H O P S I M P L I F I E E

STABIL Essai-4 Tire de l'ouvrage de Pilot et Moreau p.29 (10 centres)

Essai de validation d'après étude du B.R.C.M.

CONTROLE DES DONNEES

NOMBRE DE CENTRES SPECIFIES	10
NOMBRE DE TANGENTES LIMITES	1
NOMBRE DE SECTIONS VERTICALES	15
NOMBRE DE FRONTIERES ENTRE SOLS	3
NOMBRE DE LIGNES EQUIPRESSIONS	0
NOMBRE DE POINTS DEFINISSANT LA COHESION	0

COEFFICIENTS SISMIQUES S1	.000
S2	.000

\*\*\* SYSTEME METRIQUE \*\*\*\* tonne - metre

CENTRES DES CERCLES (X,Y)

( 36.0 -3.0 )	( 40.0 -3.0 )	( 44.0 -3.0 )	( 36.0 1.0 )
( 40.0 1.0 )	( 44.0 1.0 )	( 36.0 5.0 )	( 40.0 5.0 )
( 44.0 5.0 )	( 36.0 9.0 )	(	

TOUS LES CERCLES TANGENTS AUX PROFONDEURS, 40.0,

GEOMETRIE

SECTIONS	-50.0	.0	10.0	20.0	24.0	30.0	39.2	44.0	49.2	52.0	55.0	60.0	70.0	80.0	100.0
FISSURATION	15.0	15.0	15.0	15.0	15.0	18.0	22.6	22.6	22.6	23.8	25.0	25.0	25.0	25.0	25.0
EAU-FISSURE	15.0	15.0	15.0	15.0	15.0	18.0	22.6	22.6	22.6	23.8	25.0	25.0	25.0	25.0	25.0
FRONTIERE 1	15.0	15.0	15.0	15.0	15.0	18.0	22.6	22.6	22.6	23.8	25.0	25.0	25.0	25.0	25.0
FRONTIERE 2	25.0	25.0	25.0	25.0	25.0	25.0	25.0	25.0	25.0	25.0	25.0	25.0	25.0	25.0	25.0
FRONTIERE 3	40.0	40.0	40.0	40.0	40.0	40.0	40.0	40.0	40.0	40.0	40.0	40.0	40.0	40.0	40.0

PROPRIETES DES SOLS

25 Avr 18:01 1985 tes4a.sor Page 2

COUCHE	COHESION t/m <sup>2</sup>	FROTTEMENT DEC.	DENSITE t/m <sup>3</sup>	DESCRIPTION
1	0	35.0	2.2	
2	3.0	0	2.0	

Ecole Polytechnique de Thies - Calcul des stabilités de pentes

M E T H O D E   D E   B I S H O P   S I M P L I F I E E

STABIL Essai-4 Tire de l'ouvrage de Pilot et Moreau p.29 (10 centres)

Essai de validation d'apres etude du B.R.G.M.

No	TANGENTE (m)	RAYON (m)	(X)CENTRE (m)	(Y)CENTRE (m)	FS (BISHOP)	FS (ORD.)
1	40.0	43.0	36.0	-3.0	.853	.814
2	40.0	43.0	40.0	-3.0	.862	.822
3	40.0	43.0	44.0	-3.0	.898	.853
4	40.0	39.0	36.0	1.0	.843	.798
5	40.0	39.0	40.0	1.0	.853	.807
6	40.0	39.0	44.0	1.0	.894	.843
7	40.0	35.0	36.0	5.0	.838	.787
8	40.0	35.0	40.0	5.0	.850	.798
9	40.0	35.0	44.0	5.0	.899	.839
10	40.0	31.0	36.0	9.0	.842	.785

F.S. MINIMUM (BISHOP) = .838

\*\*\*\*\*

Rayon = 35.0 m : X , Y = ( 36.0 5.0 )

F.S. MINIMUM (ORDIN.) = .785

\*\*\*\*\*

Rayon = 31.0 m : X , Y = ( 36.0 9.0 )