

École Polytechnique de Thiès

Département: Génie civil

PROJET GC.0678

DE

FIN D'ÉTUDES

titre: Barrage en terre sur
fondation perméable.

Auteur: Jean-claude DOREGO

Directeur: Dr. Victor CIUBOTARIU

Mai 1983

A mes parents

A mes amis.

Remerciements

J'adresse mes vifs remerciements à mon Directeur de projet M^r CIUBOTARIU pour le soutien constant qu'il a bien voulu m'apporter durant toute la période consacrée à ce projet.

Je tiens aussi à remercier tous ceux qui de près ou de loin ont contribué à la réalisation de cette tâche.

SOMMAIRE

Dans le cadre des travaux d'aménagement d'une vallée située en Casamance, il est demandé de réaliser la conception d'un barrage en terre à section homogène pour une tête d'eau en amont de 5,5 mètres et en aval de 3,5 mètres.

Le sol de fondation est constitué de sable fin et moyen nu une grande épaisseur, ayant en surface une couverture de sol de mangrove d'épaisseur variable allant jusqu'à 2 mètres.

Le contrôle de la filtration devra se faire par un tapis amont imperméable et des puits de décharge avec bernes stabilisatrices s'il ya lieu en aval.

La stabilité des pentes amont et aval doit être assurée avec des coefficients de sécurité appropriés pour les hypothèses habituelles de construction, de service et de vidange rapide.

TABLE DES MATIERES

Dedicace	i
Remerciements	ii
Sommaire	iii
INTRODUCTION	1
CHAPITRE I	
Caractéristiques géométriques du barrage	
1-1 Hauteur du barrage	4
1-2 Largeur en crête du barrage	7
1-3 pente des talus	7
CHAPITRE II	
Construction du réseau d'écoulement	
2-1 Généralités	8
2-2 Tracé de la ligne de saturation	9
2-3 Réseau d'écoulement	11
2-4 Utilité des réseaux d'écoulement	12
2-4.1 Calcul de débit.	12
2-4.2 Le gradient hydraulique	12
CHAPITRE III	
Calculs de Stabilité	
3-1 Généralités	13
3-2 Procédure de calcul du coefficient de sécurité	16
3-3 Programme pour le calcul du coefficient de sécurité relatif à un cercle de glissement donné	18

Chapitre IV

19

Etude de l'écoulement et de la stabilité
du barrage démuné de tout dispositif
de contrôle ou de réduction de l'infiltration

Chapitre V

Dispositifs de Sécurité et
de contrôle.

5.1. Généralités	25
5.2. le tapis amont imperméable	27
5.3. le dispositif de drainage	30

Chapitre VI

Etude de l'écoulement et de la stabilité
du barrage muni des dispositifs de
réduction et de contrôle de l'infiltration.

6.1. le réseau d'écoulement	34
6.2. Calcul des débits d'infiltration	34
6.3. Calcul du gradient hydraulique de montée	38
6.4. Calculs de stabilité	38
6.4.1. Introduction	38
6.4.2. Hypothèse de construction	41
6.4.3. Hypothèse de service	43
6.4.4. Hypothèse de la mélange rapide	44
6.4.5. Analyse des résultats	46

Chapitre 7

HYPOTHESE DU TALUS AVAL IMMERGE

7.1. Généralités	48
7.2. Gradient hydraulique de sortie	48
7.3. Calcul du débit	49
7.4. Calcul de stabilité	50

Chapitre 8

Mesures de protection

8.1. tassements	51
8.2. Dispositif de protection contre les effets de l'eau	51
8.3. Le tapis amont imperméable	53
8.4. protection des talus	53

CONCLUSION

56

BIBLIOGRAPHIE

58

ANNEXES

60

Annexe 1. Calcul du Fetch effectif. 61

Annexe 2. Calcul de Stabilité' du talus aval. (Barrage sans dispositif de Sécurité) 63

Annexe 3. Hypothèse de construction 69

Annexe 4. Hypothèse de service 76

Annexe 5. Hypothèse de la vidange rapide 83

Annexe 6. Hypothèse du talus aval immergé' 90

INTRODUCTION

Le Sénégal est un pays dont la population est essentiellement rurale, en effet, plus de 70% de la population est composée de paysans et d'éleveurs. Cette tendance agricole et pastorale du pays fait que la majorité de ses habitants voit presque tous ses projets reposer sur les caprices du climat en général et en particulier de la pluviométrie qui ces dernières années du reste n'a pas été très abondante. Les conséquences de ce fait sont que les points d'eau se font de plus en plus rares, frappés par le taux élevé d'évaporation auquel ils sont soumis, de certains cours d'eau et rivières, il ne reste qu'un lit asséché, seul souvenir d'une période de relative abondance.

Cette situation à prévalu depuis plusieurs générations et ce n'est que depuis quelques années, le manque d'eau se manifestant par une baisse terrible de la production agricole globale, par la décimation d'une partie considérable du bétail, par la menace croissante du spectre de la famine, que les conditions d'une mise ~~de~~

Conscience du caractère fondamental de la maîtrise de l'eau ne sont manifestées.

Le principe de la maîtrise de l'eau sous toutes ses formes étant posé, il reste à définir les voies et moyens de la réalisation de cet objectif en tenant compte de tous les facteurs intervenant dans le processus de son application.

Nous nous intéresserons essentiellement à l'aspect technique de la réalisation d'un petit barrage en terre dans le cadre de notre étude tout en ayant à l'esprit le fait que "l'objectif n'est pas de faire des aménagements" mais bien de contribuer au "développement des zones rurales africaines."

En effet, une région comme la Casamance où les conditions hydrologiques, géologiques et topographiques se trouvent réunies peut être favorablement influencée dans le cadre de la marche vers l'autosuffisance alimentaire par la réalisation de petits barrages. Ceux-ci en permettant le stockage, le relèvement du niveau de l'eau et en constituant une barrière à l'avancée des eaux salines vers les terres cultivables peuvent d'un apport

considérable pour l'immigration des zones dans lesquelles ils sont construits, si les populations l'acceptent, d'où la nécessité de tenir compte du caractère social de ces projets et d'associer les populations concernées à toutes les phases de ceux-ci.

Pour ce qui est de la conception et de la réalisation de notre petit barrage en terre nous essayerons dans les limites du possible d'utiliser les matériaux se trouvant à proximité du site choisie, cela pour des fins économiques.

La démarche qui sera suivie dans ce rapport sera de faire les calculs pour un barrage sans aucun dispositif de drainage et de réduction de l'infiltration, et ensuite montrer quantitativement l'apport de tels dispositifs.

CHAPITRE 1

CARACTERISTIQUES

GÉOMETRIQUES DU BARRAGE

1-1 Hauteur du barrage

La hauteur totale du barrage sera égale au niveau des plus hautes eaux majoré de la revanche.

+ Le niveau des plus hautes eaux est fourni par des études hydrologiques et est égal à 5,5 mètres dans ~~notre~~ cas.

+ Le calcul de la revanche doit tenir compte de la hauteur des vagues qui se forment sur le plan d'eau et de la projection de l'eau vers le haut du barrage due au vent.

Pour alors utiliser des formules empiriques donnant la hauteur des vagues et la surélévation due au vent en fonction du fetch. Le fetch étant considérée comme étant une zone dégagée dans laquelle le vent souffle dans une direction constante avec une vitesse constante.

Procédure de Calcul du Fetch.

- a) A partir du milieu du barrage, traçons une droite représentant la direction des vents dominants.
- b) Considérons un secteur de 90° ayant la droite précédemment tracée comme axe central.
- c) Traçons de part et d'autre du centre du barrage des droites ayant entre elles un angle de 6° , cela jusqu'à 42° de part et d'autre de l'axe central du barrage (donné par la direction des vents dominants).
- d) mesurons la distance de chaque rayon du centre du barrage au premier obstacle rencontré.
- e) mesurons l'angle que fait chaque segment avec le rayon central.
- f) l'efficacité de chaque segment est le produit de la distance trouvée en d) par le cosinus de l'angle mesuré en e).
- g) le quotient de la somme des efficacités des segments sur la somme des cosinus nous donne la valeur du fetch effectif.

La valeur du fetch effectif trouvée est $F = 2,928 \text{ km}$, nous allons arrondir en prenant la valeur plus sécuritaire $F = 3 \text{ km}$.

- Calcul de la hauteur des vagues:

nous utiliserons la formule de Stevenson en considérant une vitesse de vent égale à $V = 80 \text{ km/heure}$

formule de STEVENSON $H = 0,76 + 0,032\sqrt{VF} - 0,26\sqrt[4]{VF}$

$H =$ hauteur des vagues (m) $F =$ fetch (km) $V =$ vit. vent (km)

On aura alors $H = 0,76 + 0,032\sqrt{80 \times 3} - 0,26\sqrt[4]{80 \times 3} = 0,91 \text{ m}$.

- La vitesse de propagation des vagues est donnée par la formule suivante:

$V = 1,5 + 2H$ (m/s) : formule de Gaillard

On aura: $V = 1,5 + 2 \times 0,91 = 3,33 \text{ m/s}$

- l'effet de projection de la vague sur le talus amont est donné par la relation

$$\frac{V^2}{2g} = \frac{(3,33)^2}{2 \times 9,81} = 0,56 \text{ m}$$

La valeur de la revanche sera prise approximativement égale à:

$$R = 0,75H + \frac{V^2}{2g} = 0,75 \times 0,91 + 0,56 = 1,25 \text{ mètres}$$

On prendra $R = 1,5 \text{ mètres}$

La hauteur du barrage sera donc égale

à $5,5 \text{ mètres} + 1,5 \text{ mètres} = \underline{\underline{7 \text{ mètres}}}$

1-2 Largeur en crête du barrage

Des valeurs minimales de largeur en crête d'un barrage sont données afin d'éviter une circulation trop importante d'eau près du couronnement. En pratique, la largeur en crête d'un barrage en terre n'est jamais inférieure à 3 mètres. On calcule parfois la largeur en crête L par les formules

$$L = 1,65\sqrt{H} \quad \text{et} \quad L = 3,6\sqrt[3]{H} - 3$$

qui donnent respectivement, H étant la hauteur en mètres du barrage $H = 7\text{m}$.

$$L = 4,36 \text{ mètres} \quad \text{et} \quad L = 3,38 \text{ mètres}$$

Pour allons cependant prendre $L = 6\text{m}$.

pour permettre une circulation ultérieure des véhicules et une bonne manœuvrabilité des engins pour les travaux de finition.

1-3 Pente des talus

Compte-tenu de la hauteur du barrage, de sa nature: barrage homogène composé essentiellement d'argile, nous prendrions une pente de $1/3$ en amont et aval; nous vérifierons par la suite par des études de stabilité la validité de ces hypothèses.

CHAPITRE 2

CONSTRUCTION DU RESEAU D'ÉCOULEMENT

2-1 Generalités

L'écoulement de l'eau dans un barrage peut être représenté à l'aide de la formule suivante:

$$\boxed{\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} = 0} \quad \text{équation de Laplace}$$

Cette équation se dérive des hypothèses de Darcy et de la loi de continuité en admettant le milieu étudié homogène et isotrope. Il existe plusieurs méthodes de construction des réseaux d'écoulement, dans le cadre de notre projet nous avons utilisé celle de Kozeny-Caraglande (méthode graphique).

La solution de l'équation de Laplace nous donnera 2 familles de courbes qui se coupent à angle droit en formant un réseau de carrés que l'on appelle réseau d'écoulement. Une famille de courbe se nomme les lignes de courant, l'autre famille les lignes équipotentielles. Les équipotentielles sont des lignes de même niveau d'énergie, les lignes de courant décrivent l'écoulement de l'eau à travers le barrage. Tout réseau d'écoulement doit remplir certaines conditions parmi lesquelles les suivantes sont fondamentales:

1°) Les lignes de courant et les lignes équipotentielles doivent se couper à angle droit pour former des surfaces courbes.

2°) Les Conditions précises d'entrée et de sortie doivent être rencontrées.

3°) Une règle fondamentale de déflexion doit être suivie pour passer d'un sol d'une certaine perméabilité à un sol de perméabilité différente.

4°) Des équipotentielles adjacentes ont des pertes de charge égales.

5°) La même quantité d'écoulement d'infiltration doit exister entre des paires de lignes d'écoulement adjacentes.

Après ces considérations de base nous allons décrire plus précisément la méthode graphique qui est très utilisée car malgré son abord relativement simple elle est d'une précision suffisante.

2-2. Tracé de la ligne de saturation

La ligne de saturation, dans le cas d'un barrage en terre homogène non drainé est donnée par l'équation de la parabole de Kozeny dont le foyer O est situé au pied du parement aval du barrage.

l'équation de la parabole est:

$$y^2 - y_0^2 - 2xy_0 = 0$$

avec $y_0 = \sqrt{h^2 + d^2} - d$

h = hauteur d'eau

d = largeur en base du barrage diminuée de $0,7b$ et b étant la projection horizontale de la partie mouillée du parement amont.

Si le barrage en terre est muni d'un drain, la parabole de Kozeny a pour foyer l'extrémité amont du drain auquel se raccorde la ligne de saturation.

La contribution de Casagrande au niveau de la construction des réseaux d'écoulement a été la définition de règles d'entrée et de sortie de l'eau dans le barrage.

En aval, la ligne de saturation sera raccordée au point D, soigneusement situé aux $2/3$ de OC théoriquement tel que

$$\frac{DC}{OD} = \frac{3}{8} \cos \frac{\alpha}{2}$$

2-3 Réseau d'écoulement.

La construction du réseau d'écoulement devient aisée une fois que la ligne phréatique est connue. On divise la charge hydraulique totale en un nombre convenable de parties égales et on trace des lignes horizontales passant par ces différentes valeurs de H . Les points d'intersection entre ces droites horizontales et la ligne phréatique sont les points à partir desquels une famille d'équipotentielles doit être dessinée. On dessine ensuite à partir du talus amont une ou plusieurs lignes d'écoulement supplémentaires de façon à obtenir ce qui sera le réseau d'écoulement. Si à ce niveau on constate que les intersections entre les lignes de courant et les équipotentielles sont droites et que les figures résultantes de ces intersections sont sensiblement carrées, alors le réseau d'écoulement est valable sinon on effectue des corrections jusqu'à ce que les conditions précitées soient remplies.

2-4 UTILITÉ des réseaux d'écoulement

Nous allons dans cette section décrire quelques applications pratiques que l'on peut tirer des réseaux d'écoulement.

2-4.1. Calcul du Débit.

Soit:

ΔQ : le débit traversant un canal de courant

Q : le débit total

$\Delta \Delta H$: perte de charge entre 2 équipotentielles

ΔH : perte totale de charge

n_f : nombre de canaux de courant

$n_d = \Delta H / \Delta \Delta H$

La loi de Darcy nous donne $Q = K i A$

La transformation de l'équation précédente nous mène à la relation qui sera utilisée pour le calcul du débit soit:

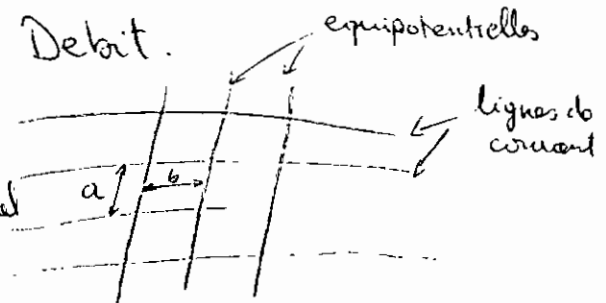
$$Q = K \Delta H \frac{n_f}{n_d}$$

K : coefficient de perméabilité.

2.4.2 Le gradient hydraulique

La valeur du gradient hydraulique entre 2 points peut aussi être obtenue à l'aide du réseau d'écoulement par le rapport de la perte de charge entre ces deux points sur la longueur entre ces deux points dans le sens du courant:

$$i = \frac{\Delta \Delta H}{\Delta L}$$



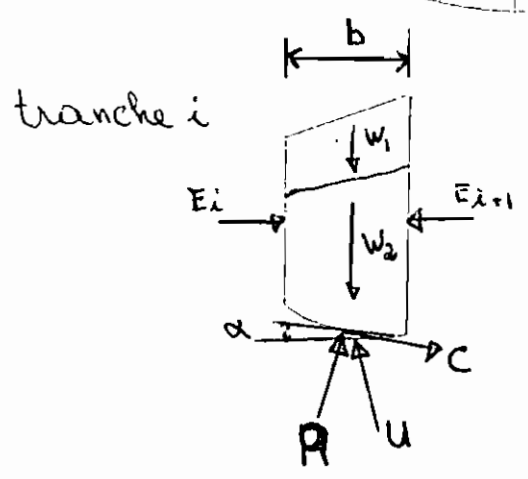
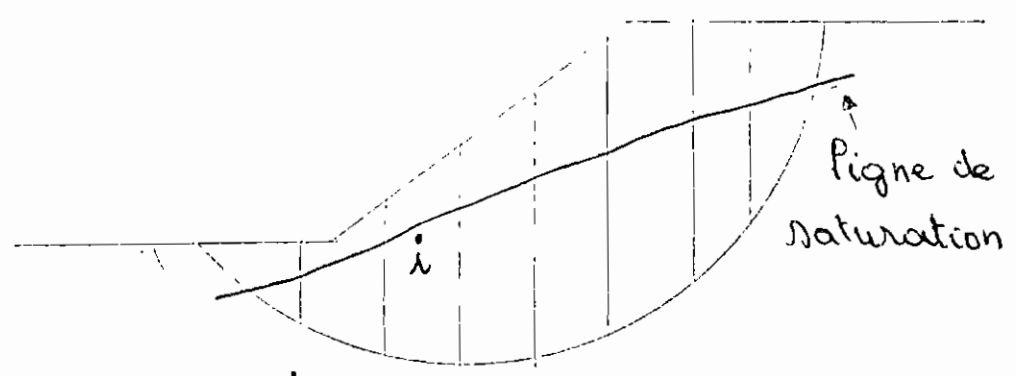
CHAPITRE 3: Calculs de stabilité

des études de stabilité que nous ferons porteront sur le talus aval ou le talus amont dans l'hypothèse du barrage en construction, sur le talus aval dans le cas de l'hypothèse de service et sur le talus amont dans le cas du vidange rapide. Pour effectuer les calculs de stabilité on utilisera la méthode de Bishop qui est un perfectionnement de la méthode de Fellenius.

Il est admis dans cette méthode que la rupture a lieu suivant une surface de glissement en forme de cylindre circulaire et qu'elle se produit instantanément et simultanément sur toute la surface. La procédure consiste à considérer plusieurs cercles de glissement et à rechercher le cercle le plus critique c'est-à-dire celui qui donne le coefficient de sécurité le plus faible.

Le principe de la méthode est relativement simple: la tranche circulaire est découpée en un certain nombre d'éléments verticaux dont le poids est en équilibre sous l'effet des forces latérales, de la réaction le long de la ligne de glissement, de la cohésion et de

la pression interstitielle.



- R = réaction du sol
- u = pression interstitielle
- W₁ = poids humide
- W₂ = poids déjaugé
- E_i, E_{i+1} = forces latérales
- b = largeur de la tranche

L'analyse des forces représentées à la figure précédente du point de vue de leur équilibre permet à Bishop de développer la formule suivante :

$$F = \frac{\sum [c'b + (W_1 + W_2 - Ub) \operatorname{tg} \varphi \frac{1}{\cos \alpha (1 + \operatorname{tg} \alpha \operatorname{tg} \varphi / F)}]}{\sum (W_1 + W_2) \sin \alpha}$$

La valeur du coefficient de sécurité F s'obtient par itérations successives,

A cette fin, un programme informatique a été élaboré dans le but d'alléger et de permettre une convergence plus rapide des calculs.

Ce programme qui sera exposé à la page suivante permet après l'introduction de toutes les données relatives à un cercle de glissement déterminé et une valeur supposée de F de trouver la valeur réelle du coefficient de sécurité relative à ce cercle.

Plusieurs cercles de glissement seront essayés et la valeur minimale des coefficients de sécurité sera celle qui sera prise comme étant le coefficient de sécurité du talus.

3-2 : Procédure de calcul du coefficient de sécurité

Considérons la tranche numéro n

— Calcul de W_1 : On multiplie le volume non immergé de la tranche par le poids volumique humide du sol

— Calcul de W_2 : On multiplie le volume immergé de la tranche par le poids volumique déjaugé du sol.

— $W_1 + W_2 = W$ sera la valeur introduite comme donnée dans le programme.

— Calcul de U (pression interstitielle)

A partir de chaque extrémité inférieure de la tranche, on calcule la pression interstitielle à partir d'une courbe équipotentielle tracée à l'estime et s'intégrant dans le réseau : cette courbe coupe la ligne phréatique en un point M_1 de potentiel égal à la cote de ce point noté z_1 . L'égalité des potentiels en M_1 et le point considéré, noté M_0 s'écrit :

$$z_0 + U = z_1, \text{ d'où la pression interstitielle}$$

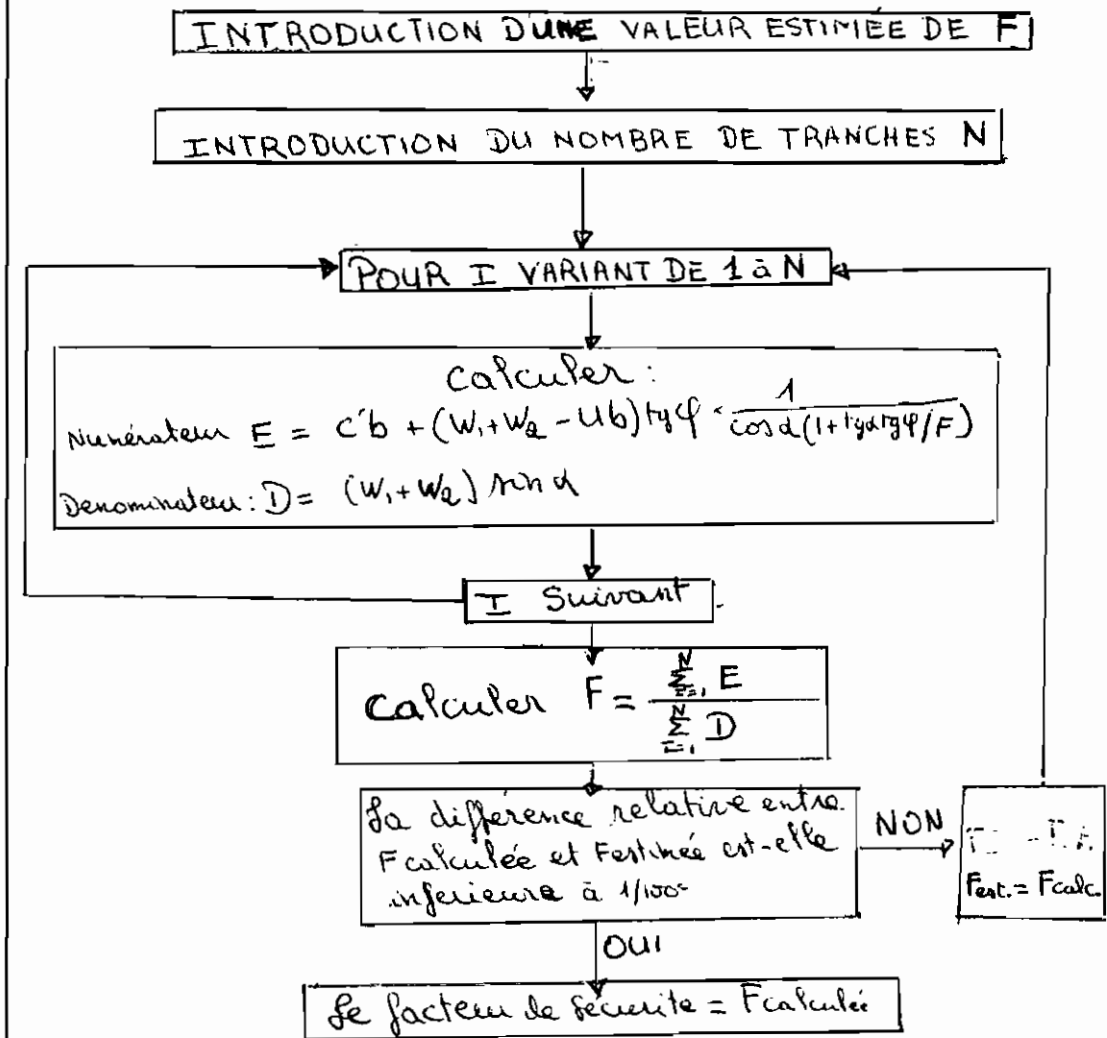
$$U = z_1 - z_0 \text{ exprimée en mètres d'eau.}$$

En multipliant cette valeur de U par le poids volumique de l'eau exprimé en (T/m^3) on obtient la valeur de la pression interstitielle en T/m^2

Les valeurs calculées de C (cohésion), P (Angle de frottement interne), B (largeur de tranche), A (Angle alpha en radians), U (pression interstitielle), W (poids de la tranche) sont introduites dans cet ordre dans le programme à l'aide de l'instruction DATA.

Ensuite avec une valeur supposée du coefficient de sécurité F , l'exécution du programme permet après un certain nombre d'itérations de converger vers la valeur réelle de F pour le cercle considéré.

STRUCTURE DU PROGRAMME



3-3 Programme pour le calcul du coefficient
de sécurité relatif à un cercle de
glissement donné
(méthode de Bishop)

```

0010 REM CALCUL DU COEFFICIENT DE SECURITE
0020 DIM K(200)
0030 PRINT 'INTRODUIRE F INITIAL'
0040 INPUT F
0050 PRINT FLP, ' F INITIAL=';F
0060 PRINT 'INTRODUIRE LE NOMBRE DE TRANCHES'
0070 INPUT N
0080 PRINT FLP, '-----';
0090 PRINT FLP, '-----';
0100 PRINT FLP, TAB(2); 'LARGEUR'; TAB(11); 'ALPHA'; TAB(21); 'PRESS.';
0110 PRINT FLP, TAB(30); 'POIDS'; TAB(40); 'NUMERATEUR';
0120 PRINT FLP, TAB(54); 'DENOMINATEUR'
0130 E,D,L,M=0
0140 FOR I=1 TO N
0150 READ C,P,B,A,U,W
0160 E=((C*B+(W-U*B)*TAN(P))/(COS(A)*(1+TAN(A)*TAN(P)/F)))
0170 L=L+E
0180 D=W*SIN(A)
0190 M=M+D
0200 PRINT FLP, TAB(4); B; TAB(12); A; TAB(22); U; TAB(31); W;
0210 PRINT FLP, TAB(42); E; TAB(55); D
0220 NEXT I
0230 RESTORE
0240 H=L/M
0250 PRINT FLP,
0260 J=J+1
0270 PRINT FLP, 'ITERATION':J' F= ';H
0280 IF ABS(H-F)/H<.01 GOTO 0350
0290 PRINT FLP,
0300 PRINT FLP,
0310 F=H
0320 PRINT FLP, '-----';
0330 PRINT FLP, '-----';
0340 GOTO 0130
0350 PRINT FLP, ' COEFFICIENT DE SEC. DU CERCLE: F FINAL= ';H
0360 DATA 3,.419,2,.951,0,5.24
0370 DATA 3,.419,2,.833,1.6,12.66
0380 DATA 3,.419,2,.54,2.44,13.95
0390 DATA 3,.419,2,.54,3.54,13.75
0400 DATA 0,.524,2,.38,4.28,13.28
0410 DATA 0,.524,2,.291,4.7,13.59
0420 DATA 0,.524,2,.099,4.98,10.79
0430 DATA 0,.524,2,0,4.86,9.2
0440 DATA 0,.524,2,-.0095,4.32,7.7
0450 DATA 0,.524,2,-.197,3.47,5.23
0460 DATA 0,.524,2,-.38,2.2,3.74
0470 DATA 0,.524,2,-.733,1.5,.954
0480 END

```

CHAPITRE 4

Etude de l'écoulement et de la stabilité du barrage démunie de tout dispositif de contrôle ou de réduction de l'infiltration.

La méthode de Kozeny-Caragrande sera utilisée pour la construction du réseau d'écoulement (Voir CHAP. 2)

$$b = 5,5 \times 3 = 16,5 \text{ m}$$

$$d = (7 \times 3) \times 2 + 6 - 0,7 \times b = 36,45$$

$$\Rightarrow y_0 = \sqrt{(5,5)^2 + (36,45)^2} - 36,45 = 0,41$$

$$\Rightarrow y = \sqrt{y_0^2 + 2xy_0} = \sqrt{0,17 + 0,82x}$$

Le calcul de la valeur de l'ordonnée y de la parabole de Kozeny pour des valeurs $x = 0, 1, \dots, 32$ nous a permis d'obtenir la figure de la page suivante que nous avons construite à l'aide de la méthode exposée au chapitre 2

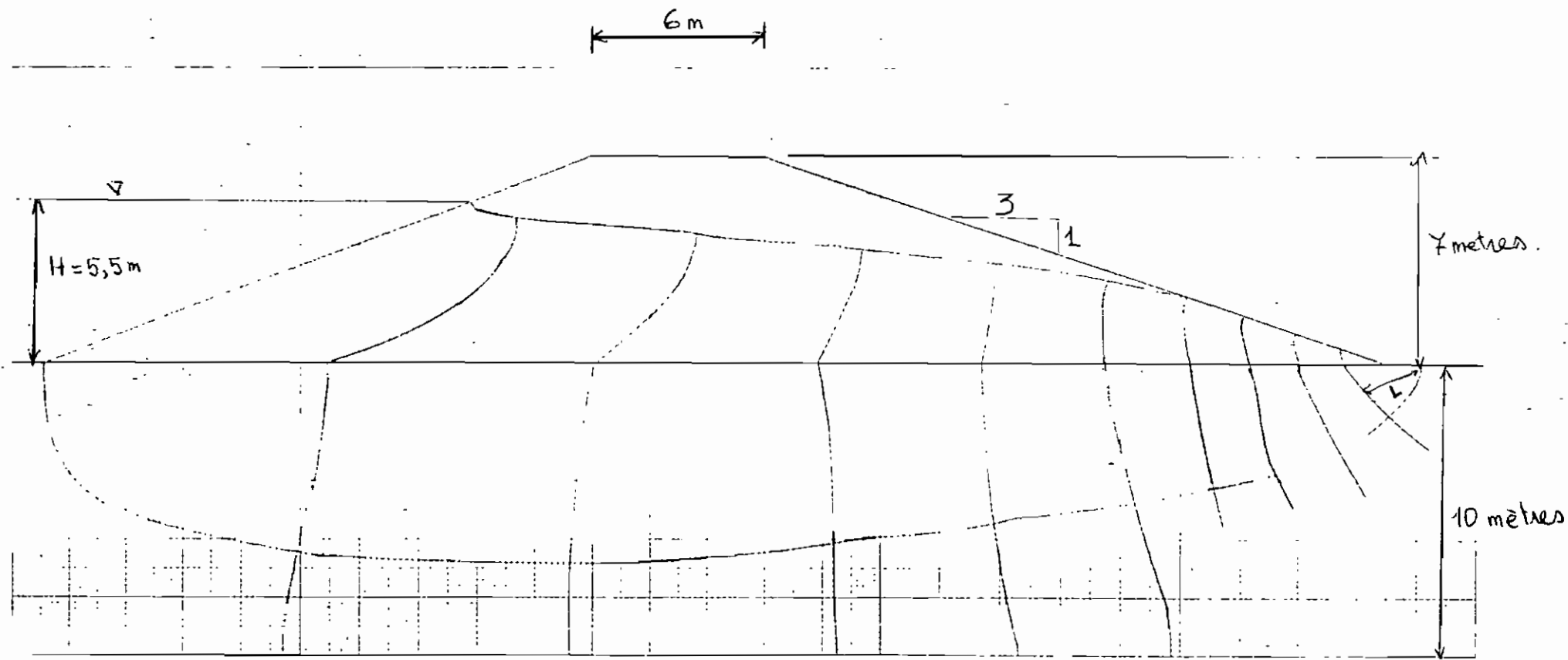
Le point de sortie de l'eau en aval sera situé en un point D tel que

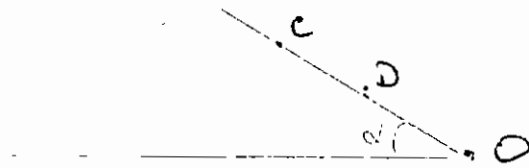
$\frac{OC}{OD} = \frac{3}{8} \cos \frac{\alpha}{2}$ C étant le point d'intersection entre le talus aval et la parabole de Kozeny

Fig. 1 : Géométrie et réseau d'écoulement du barrage démuné de dispositif de sécurité

$$K_{\text{barrage}} = 10^{-6} \text{ cm/sec}$$

$$K_{\text{fondation}} = 10^{-2} \text{ cm/sec.}$$





$$\Rightarrow OD = \frac{DC}{\frac{3}{8} \cos \frac{\alpha}{2}} \quad \alpha = 18,43^\circ$$

$$\Rightarrow OD = \frac{DC}{0,37} \Rightarrow CO = 1,37 \times CO = 38 \text{ mm}$$

$$\Rightarrow \underline{CO} \rightarrow 7,6 \text{ mètres}$$

- Calcul du débit de filtration

$$Q = K \Delta H \frac{n_f}{n_d}$$

$$K_{\text{barrage}} = 10^{-6} \text{ cm/s}$$

$$K_{\text{fondation}} = 10^{-2} \text{ cm/s}$$

$$n_f(\text{barrage}) = 1$$

$$n_f(\text{fondation}) = 1,5$$

$$n_d = 10$$

\Rightarrow le débit à travers le barrage

$$Q = 10^{-6} \times 550 \times \frac{1}{10} = 0,55 \times 10^{-4} \text{ cm}^3/\text{sec./cm}$$

le débit à travers la fondation

$$Q = 10^{-2} \times 550 \times \frac{1,5}{10} = 0,825 \text{ cm}^3/\text{sec./cm}$$

Calcul du gradient hydraulique de sortie

$$i = \frac{\Delta h}{\Delta L}$$

Cette relation donne la valeur du gradient hydraulique qui est le rapport de la variation de la hauteur de charge hydraulique Δh à la distance qui les sépare mesurée le long de la ligne de courant.

Les mesures effectuées sur la figure 1 nous donnent pour le gradient de sortie

$$\Delta h = 0,55 \text{ m} \quad \Delta L = 1,2 \text{ m}$$

$$\Rightarrow i = \frac{0,55}{1,2} = 0,46$$

Calculs de la stabilité du Talus aval

- Caractéristiques physico-mécaniques.

Barrage: $\gamma_h = 1,9 \text{ T/m}^3$ = poids volumique humide
 $n = 35\%$ = porosité
 $\phi' = 24^\circ$ = Angle de frottement interne effectif
 $c' = 3 \text{ T/m}^2$ = cohésion effective
 $\gamma' = 0,9 \text{ T/m}^3$ = poids volumique dépourvu
 $w = 12\%$ = teneur en eau

Fondation: $\gamma_h = 1,8 \text{ T/m}^3$
 $n = 46\%$
 $\phi' = 30^\circ$
 $c' = 0$
 $\gamma' = 0,8 \text{ T/m}^3$

L'étude de stabilité se faisant en supposant l'établissement d'un régime permanent, les pressions interstitielles dans le corps de digue et sa fondation seront totalement indépendantes des contraintes existant dans le sol. L'étude se fera dans ces conditions à partir des contraintes effectives.

Les détails des calculs seront exposés au chapitre 2 pour ce qui est de la procédure générale et à l'annexe A2 pour ce qui a trait au problème considéré dans ce chapitre.

Les résultats donnent $F = -0,426$

ce qui montre l'importance destabilisatrice de la pression interstitielle par rapport aux forces stabilisatrices telles que la cohésion, le frottement et le poids.

Récapitulation

Débit à travers la fondation $Q = 0,825 \text{ m}^3/\text{km}$

gradient hydraulique de portee $i = 0,46$

facteur de sécurité du Talus aval $F = -0,426$

Le Débit d'eau s'écoulant à travers la fondation est trop important par rapport à la fonction du barrage qui est de retenir les eaux à des fins d'irrigation; des mesures doivent donc être prises à ce niveau.

Le gradient hydraulique critique du sable est voisin de 1; en considérant un coefficient de sécurité de 2,5 nous aurons:

$$i_{\text{admissible}} = \frac{i_{\text{crit}}}{2,5} = 0,4$$

nous avons trouvé un gradient hydraulique

$$i = 0,46 > i_{\text{admissible}} = 0,4$$

Le coefficient de sécurité trouvé pour le talus aval nous montre la très grande instabilité de ce dernier.

Toutes ces constatations et remarques que nous venons de faire nous obligent à fournir au barrage un certain nombre de dispositifs de sécurité et de contrôle.

Ces points feront l'objet du chapitre suivant.

CHAPITRE 5

DISPOSITIFS DE SECURITE ET DE CONTROLE

Les barrages en terre doivent être sécurisés contre un certain nombre de phénomènes tels que :

Un écoulement excessif d'eau à travers le barrage, la rupture des talus, le débordement de l'eau au dessus du barrage, les pressions excessives dues à l'eau et l'érosion interne. Une partie des problèmes précités peut être évitée par le choix de la géométrie du barrage mais pour lutter efficacement contre des problèmes tels que l'écoulement excessif et les gradients élevés, certains dispositifs particuliers et appropriés doivent être fournis au barrage. Le fonctionnement de ces dispositifs se base sur l'une des trois méthodes de traitement suivantes :

- 1) l'élimination de l'infiltration ou sa réduction à une quantité négligeable

par la construction d'une barrière verticale
constituant une protection du noyau
pour la fondation.

2) Réduction de l'infiltration soit par

une barrière verticale, soit par un tapis
imperméable à l'air, de contrôle de l'eau

A infiltrant au dessus de la barrière.

Notamment au dessus du tapis devra
être amarré.

3) Contrôle de l'eau d'infiltration, mais

aucune mesure n'est prise pour la

réduire.

Pour ce qui est de notre cas, nous

opérons sur les deuxièmes notions :

réduction de l'infiltration par un tapis

avec imperméable et un drain vertical et

un tapis de drainage horizontal pour le

contrôle de l'eau d'infiltration.

Cette notion a été choisie parce que

l'on a un réel problème qui n'est pas

10 mètres de profondeur, ce qui est considérable

Il serait alors nécessaire d'exécuter

sur une grande profondeur pour pratiquer

éliminer ou même réduire efficacement l'infiltration. Cette opération ne serait pas économique.

La 3^{ème} solution doit aussi être écartée car le débit d'infiltration que nous avons doit nécessairement être réduit.

La mise en place d'un tapis amont imperméable devrait permettre l'abaissement du gradient hydraulique de sortie jusqu'à une valeur admissible. Si tel n'est pas le cas, nous penserons alors à disposer à l'aval d'une berge stabilisatrice et de puits de décharge.

Pour nous maintenant passer au dimensionnement des différents éléments constituant le dispositif de sécurité et de contrôle.

5.2 Le tapis amont imperméable,

Le tapis amont imperméable agit en augmentant la longueur d'infiltration, cela réduit ce faisant le débit et la pression interstitielle et permet un accroissement de la stabilité.

Le tapis amont imperméable devrait être construit avec le même matériau que le royaume et doit avoir un coefficient de perméabilité K au moins 100 fois plus petit que celui de la fondation.

La réduction de l'infiltration et de la pression interstitielle est directement liée à la longueur du tapis, il existe cependant une longueur déterminée telle que au delà, l'efficacité du tapis n'est plus augmentée. Il est usuel de prendre pour le design $L = 12 H$

L = longueur du tapis.

H : hauteur d'eau.

La relation existant entre les dimensions du tapis et son efficacité peuvent être étudiées d'une manière assez précise en utilisant les réseaux d'écoulement. Il existe aussi des équations basées sur des hypothèses simplificatrices qui ont été élaborées et qui donnent des résultats d'une précision satisfaisante.

Les dimensions des épaisseurs du tapis

varient entre 0,6 et 3 mètres d'une manière générale. Nous avons choisi une valeur intermédiaire de 2 mètres pour notre design et vérifier si le débit à travers la fondation et les gradients hydrauliques restent dans des limites acceptables. Des études plus précises auraient cependant été nécessaires pour évaluer l'épaisseur optimale du tapis en tenant compte du coût de pose du matériau, le coût des pertes d'eau et les risques liés à l'existence de gradients hydrauliques élevés.

Dimensions du tapis:

$$\underline{\text{longueur}} \quad L = 12H = 12 \times 5,5 = \underline{66 \text{ mètres}}$$

$$\underline{\text{épaisseur}} = \underline{2 \text{ mètres}}$$

5.3^e dispositif de drainage.

Après avoir réduit les quantités d'infiltration et les pressions interstitielles par le biais du tapis amont imperméable nous devons à présent :

- Au niveau du remblai, assurer un rabattement de la ligne phréatique, ce qui aura pour effet de réduire ou d'annuler les pressions interstitielles défavorables à la stabilité du talus aval et d'empêcher par la même occasion le remontement de l'eau sur la face aval ce qui est un facteur d'érosion.

- Au niveau de la fondation, assurer une libre décharge de l'eau d'infiltration permettant d'éviter une rupture du barrage par roulement.

Le dispositif qui nous permettra de respecter ces contraintes est constitué d'un drain vertical et d'un tapis de drainage horizontal dont les épaisseurs et les perméabilités seront fonction du débit d'eau à évacuer. Ces drains seront combinés à des filtres dont le rôle sera d'éviter l'encrassement et d'empêcher la migration des fines particules de

sol entraînés par l'eau

Calcul des dimensions des drains:

Les calculs se feront à l'aide de la loi de Darcy:

$$Q = KiA \quad \text{ou} \quad Q = Kib$$

Si nous considérons ^{unité} 1 m de longueur de barrage

Q = débit en cm^3/s / m

i = gradient hydraulique

b = épaisseur du drain

Pour avoir donc une épaisseur de drain

$$b = \frac{Q}{Ki}$$

Compte-tenu de l'imprécision qui réside dans la détermination du coefficient de perméabilité nous allons multiplier par 10 nos débits de calculs afin de tenir compte de ce fait dans le dimensionnement des drains.

- Le drain horizontal

Le drain horizontal doit évacuer le débit venant du barrage et celui venant de la fondation

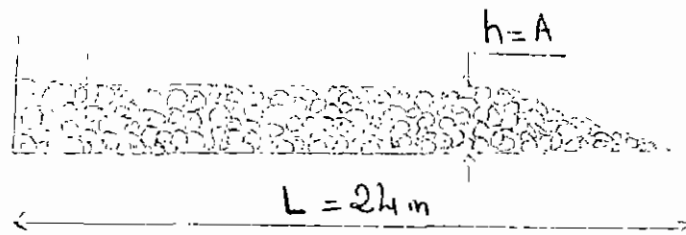
$$Q_{\text{barrage}} = 0,55 \times 10^{-4} \text{ (cm}^3/\text{s) / cm}$$

$$Q_{\text{fondation}} = 0,825 \text{ cm}^3/\text{sec/cm}$$

$$\Rightarrow Q \text{ à évacuer} = 0,825 \text{ cm}^3/\text{sec/cm}$$

$$Q_c \text{ de calcul} = Q \text{ à évacuer} \times 10 = 8,25 \text{ cm}^3 / \text{sec.km}$$

$$A = \frac{Q_c}{K_i} = \frac{Q}{K(h/L)}$$



$$\Rightarrow h = A \Rightarrow A = \sqrt{\frac{Q \times L}{K}} = \sqrt{\frac{825 \times 2400}{K}}$$

avec $K = 1 \text{ cm/sec}$ on trouve $h = A = 1/4$ mètres

$$K = 10 \text{ cm/sec}$$

$$\Rightarrow h = A = \dots$$

$$K = 40 \text{ cm/sec}$$

$$\Rightarrow h = A = 0,22 \text{ mètres}$$

$$K = 50 \text{ cm/sec}$$

$$\Rightarrow h = A = 0,198 \text{ mètres}$$

Pour prendre les valeurs qui nous semblent les plus raisonnables pour des épaisseurs de drain soit

$$K_{\text{drain}} = 1 \text{ cm/sec}$$

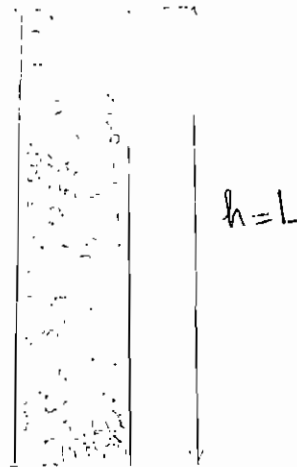
$$\text{épaisseur du tapis} = 2 \text{ mètres}$$

- Le drain vertical

Pour ce cas, nous allons prendre une épaisseur minimale de 2 mètres pour permettre aux engins de compactage de travailler sans difficulté. Le drain vertical doit évacuer le débit Q venant du barrage. On devra alors considérer:

$$Q_c \text{ de calcul} = 10 \times 0,55 \times 10^{-4} \text{ cm}^3/\text{s}/\text{cm} = 0,55 \times 10^{-3} \text{ cm}^3/\text{s}/\text{cm}$$

$$\Rightarrow \frac{Q}{(kL) \cdot A} = \frac{0,55 \times 10^{-3}}{1 \times 2000} = 0,27 \times 10^{-6} \text{ cm/sec} = k$$



nous prendons $k = 10^{-3} \text{ cm/s}$ pour tenir compte des exigences minimales car pour être efficace, le filtre doit être au moins 100 fois plus perméable que le corps du barrage.

Récapitulation

Tapis horizontal épaisseur = 2 mètres
 $K = 1 \text{ cm/sec}$

Drain vertical épaisseur = 2 mètres
 $K = 10^{-3} \text{ cm/sec.}$

CHAPITRE 6:

Etude de l'écoulement et de la stabilité du barrage muni des dispositifs de réduction et de contrôle de l'infiltration.

6-1: Le réseau d'écoulement.

Le réseau d'écoulement du barrage est construit suivant la procédure développée au Chapitre 2 en tenant toutefois compte des particularités liées à la présence du tapis amont imperméable et des drains verticaux et horizontaux.

Le schéma de la page suivante nous montre le réseau d'écoulement du barrage et une partie du tapis amont.

6-2: Calcul des débits d'infiltration

- A travers le remblai:

nous utiliserons la formule simplifiée suivante

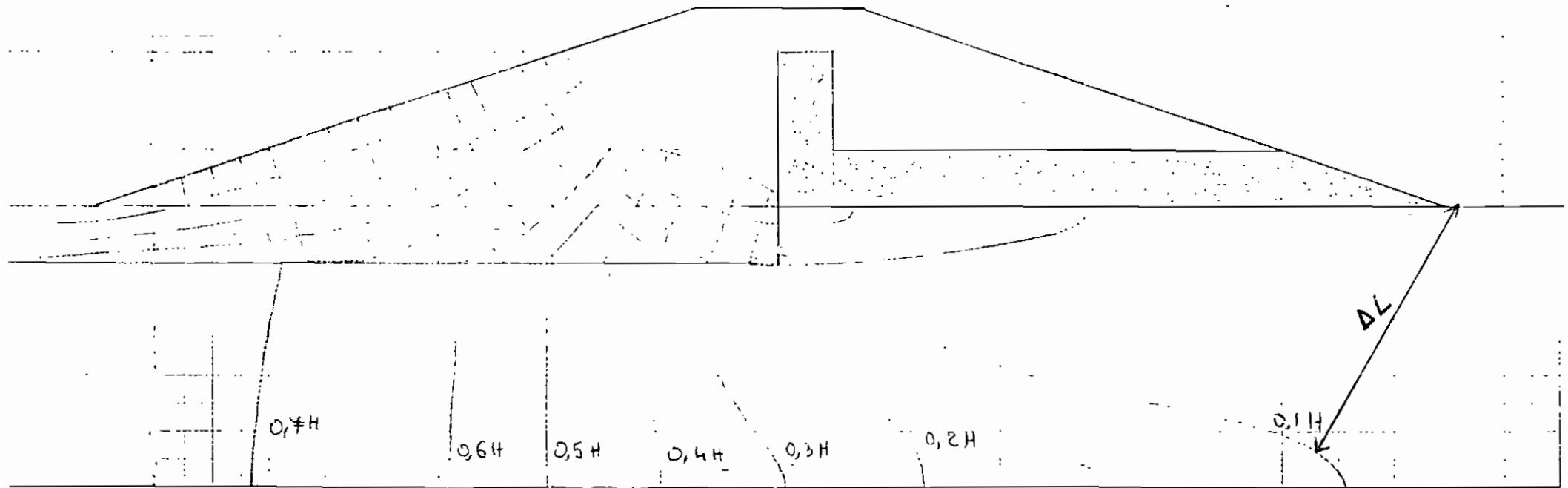
$$Q = S \cdot k \cdot \frac{H}{L}$$

S = longueur mouillée du parement amont

$\frac{H}{L} = I$ = gradient hydraulique moyen le long d'une ligne de courant de longueur moyenne.

P

Réseau d'écoulement du barrage



k : coefficient de perméabilité de Darcy

$$\text{On a: } S = 550 \times 3 \text{ cm} \quad k = 10^{-6} \text{ cm/sec} \quad \frac{H}{L} = \frac{0,55}{1}$$

ce qui donne $Q = \underline{9 \times 10^{-4} \text{ cm}^3/\text{sec}/\text{cm}}$.

A travers la fondation:

$$n_d = 10$$

$$\Delta H = 550 \text{ cm}$$

$$n_f = 0,6$$

$$k_{\text{fondation}} = 10^{-2} \text{ cm/sec}$$

$$\Rightarrow q = k_f \Delta H \frac{n_f}{n_d} = 10^{-2} \times 550 \times \frac{0,6}{10} = 0,33 \text{ cm}^3/\text{s}/\text{cm}$$

La valeur de n_f a été trouvée à partir du réseau d'écartement. nous allons cependant calculer le débit à l'aide d'une formule utilisée par le U.S. Army Engineers pour une comparaison.

Cette formule donne:

$$Q = \frac{k_f \Delta H \bar{z}_f}{(L_1 \text{ eff.} + L_2 + L_3 \text{ eff.})}$$

$$L_1 \text{ eff.} = \frac{\tanh(aL_1)}{a} \quad a = \sqrt{\frac{k_b}{k_f \bar{z}_f \bar{z}_b}} \quad L_3 \text{ eff.} = \frac{\tanh(aL_3)}{L_3}$$

L_3 = projection horizontale du tapis aval

L_1 : longueur de tapis amont + "projection" horizontale du tapis amont.

$$L_1 = 66 + 21 = 87 \text{ m.}$$

k_b = coefficient de perméabilité du tapis

\bar{z}_b = épaisseur du tapis

k_f = coefficient de perméabilité de la fondation

\bar{z}_f = profondeur de la fondation

L_2 = largeur en crête du barrage

$$\Rightarrow a = \sqrt{\frac{10^{-6}}{10^{-2} \times 10 \times 2}} = 2,24 \times 10^{-3}$$

$$L_1 = 87 \text{ m} \quad L_3 =$$

$$L_{1, \text{eff.}} = \frac{\tanh[(2,24 \times 10^{-3}) \times 87]}{2,24 \times 10^{-3}} = 85,9 \text{ m}$$

$$\Rightarrow Q = \frac{10^{-2} \times 550 \times 10}{(85,9 + 6)} = 0,6 \text{ cm}^3/\text{sec}/\text{cm}$$

6-3 - Calcul du gradient hydraulique de sortie

$$i = \frac{\Delta \Delta H}{\Delta L}$$

$$\Delta \Delta H = 0,55 \text{ m} \quad \Delta L = 8 \text{ m}$$

$$\Rightarrow i = \frac{0,55}{8} = 0,07$$

6-4 - Calculs de stabilité

6-4.1 - INTRODUCTION

Les conditions dans lesquelles sera soumis le barrage en tôle durant sa construction et son fonctionnement ainsi que les pressions interstitielles et les paramètres de cisaillement dans le corps de l'ouvrage

et la fondation évoluent considérablement au cours de la vie de celui-ci. Aussi la stabilité des digues en terre doit-elle être vérifiée à différents stades de son histoire :

- pendant sa construction,
- lorsque l'eau est à un niveau maximal dans la retenue et qu'un écoulement permanent s'est établi à travers l'ouvrage, c'est à dire dans les conditions normales d'exploitation,
- lorsque l'on abaisse rapidement le niveau de l'eau dans la retenue : le cas de la vidange rapide.

Les caractéristiques de l'ouvrage sont déterminées le plus souvent par son comportement au cours des 2 dernières phases; le talus aval est alors dimensionné en tenant compte des conditions existant lorsque l'eau dans la retenue est à son niveau maximal et le talus amont en tenant compte des conditions créées par la vidange rapide. Dans certains cas cependant, il s'avère nécessaire de modifier certaines caractéristiques du barrage pour assurer la stabilité de l'ouvrage durant la période de

construction. Des calculs se feront donc pour toutes les hypothèses que nous venons évoquer mais auparavant, nous aurons à donner la valeur de certains paramètres physico-mécaniques qui vont être utilisés:

Paramètres Physico-mécaniques

Remblai	$c_u = 3,5 \text{ T/m}^2$	$\gamma_n = 1,9 \text{ T/m}^3$	$\phi' = 24^\circ = 0,419 \text{ rd}$
	$c' = 3 \text{ T/m}^2$	$\gamma' = 0,9 \text{ T/m}^3$	$\phi_u = 0$
fondation	$c' = 0$	$c_u = 0$	$\phi' = 30^\circ = 0,524 \text{ rd}$
	$\gamma_n = 1,8 \text{ T/m}^3$	$\gamma' = 0,8 \text{ T/m}^3$	
filtres	$\phi' = 40^\circ = 0,698 \text{ rd}$	$c' = 0$	
	$\gamma_n = 2 \text{ T/m}^3$	$\gamma' = 1,2 \text{ T/m}^3$	

Pour les calculs de stabilité, afin que les paramètres utilisés correspondent à la réalité, nous utiliserons les valeurs de cohésion et d'angle de frottement interne obtenus à partir d'essais qui soumettront les échantillons à un **Champ de contraintes** analogue à celui qui se développera dans le corps du barrage

6.1. Calcul de stabilité du barrage muni de dispositifs de sécurité

6.1.2 Hypothèse de construction

Pendant la construction, la stabilité du barrage en terre peut être compromise lorsque des pressions interstitielles excessives se développent dans le corps du barrage, ce problème peut être évité en mettant en place un sol à une teneur en eau inférieure à celle de l'optimum pour éviter le risque de maturation. Cette façon de faire a cependant l'inconvénient de donner des remblais un peu raides ayant tendance à fissurer. C'est pourquoi pour des remblais de faible hauteur on peut avoir intérêt à opérer à une teneur en eau supérieure à W_{opt} : on évite ainsi le danger de gonflement. Enfin si un danger de développement de la pression interstitielle existe avec cette méthode, il est toujours possible de placer dans le remblai des capteurs de pression, de suivre le développement de la pression interstitielle avec

le chargement, et d'adapter la cadence de la construction à la dissipation de la pression de l'eau des pores. Cette méthode nous conduit à travailler avec les contraintes totales non drainées pour le remblai imperméable dans le cadre du calcul de stabilité.

Les détails des calculs sont exposés dans l'annexe n° 3. Nous nous contenterons ici de donner le résultat caractérisant la stabilité du talus: ce sera le plus petit des coefficients de sécurité donnés par les différents cercles de glissement analysés.

cercle C_2 :

$$F = 2,38$$

6-4.3 Hypothèse de service

Pour les mêmes raisons que celles exposées au chapitre 4, l'étude de stabilité en supposant la mise en service du barrage se fera avec les contraintes effectives. Les calculs sont exposés à l'annexe 4.

Le comportement du barrage en service n'a pas d'effet néfaste sur le talus amont mais présente des facteurs de risque quand à la stabilité du talus aval.

La sécurité du talus aval par rapport à l'instabilité nous est donnée par le cercle de glissement C_2 qui a le coefficient de sécurité le plus petit:

facteur de sécurité du talus aval

$$F = 2,04$$

6.4.4. Hypothèse de la vidange rapide.

La perméabilité du sol constituant le corps du barrage est trop faible pour que la surface de l'eau dans l'ouvrage s'abaisse de façon sensible lorsque l'on vide rapidement la retenue. La vidange rapide peut alors être considérée comme instantanée et c'est dans cette hypothèse que l'on se place pour étudier la stabilité du talus amont. La vidange rapide, en inversant le sens de l'écoulement dans la partie amont de l'ouvrage, crée des forces hydrauliques dirigées vers l'intérieur de la retenue. Ces forces peuvent réduire le coefficient de sécurité du talus amont mais ont sans effet défavorable sur la stabilité du talus aval.

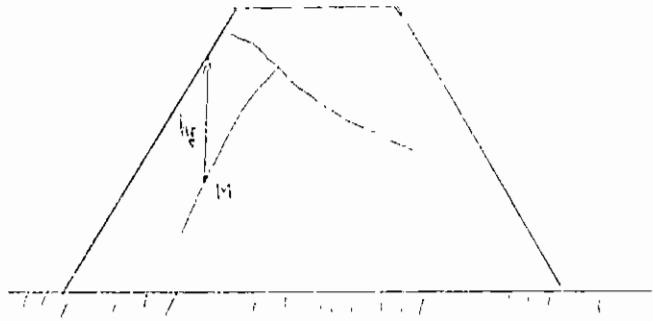
Pendant la vidange rapide, la stabilité du talus amont sera étudiée à partir des contraintes effectives. La distribution de la pression interstitielle elle, dépend de la déformabilité des matériaux qui constituent le corps de la digue dans notre cas (argile), la pression interstitielle peut être obtenue à l'aide de

l'expression suivante :

$$U = \gamma_w h_g$$

U : pression interstitielle en un point situé près du talus amont

h_g = distance verticale entre le point où l'on calcule la pression interstitielle et le point correspondant du talus amont.



Les résultats des calculs exposés à l'annexe 5 nous donnent :

facteur de sécurité du talus amont

$$F = 1,27$$

6.4.5 Analyse des résultats.

Les résultats que nous allons étudier seront les critères sur lesquels l'om devra se baser pour juger de la validité des dimensionnements effectués, de la valeur de certaines estimations. Nous allons passer en revue les solutions que des dispositifs tels que le tapis amont imperméable et les drains sont supposés apporter au barrage

- Au niveau de la réduction du débit:

celle-ci est effective, car avant la mise en place du tapis amont imperméable on avait un débit de $0,825 \text{ cm}^3/\text{sec}/\text{cm}$ ce qui est relativement considérable; à la suite de la mise en place de ce dispositif nous avons un débit de $0,33 \text{ cm}^3/\text{sec}/\text{cm}$ (calcul à l'aide du niveau d'écoulement) ou un débit de $0,6 \text{ cm}^3/\text{sec}/\text{cm}$ si nous utilisons les méthodes simplifiées soit une réduction de 27% à 60%

- Au niveau du gradient hydraulique de sortie

Le parcours plus long dû à la présence du tapis amont a causé une baisse du gradient hydraulique jusqu'à la valeur de $i = 0,07$ valeur qui est de loin inférieure à celle du gradient admissible ($i_{\text{admissible}} = 0,4$).

- Au niveau de la stabilité

Les coefficients de sécurité obtenus sont plus élevés que les coefficients de sécurité minimums recommandés par Terzaghi et Peck en ce qui concerne le barrage en construction et le barrage en service :

Barrage en construction

$$F = 2,38 > F_{\text{minimal}} = 1,3$$

Barrage en service

$$F = 2,04 > F_{\text{minimal}} = 1,5$$

Pour le cas de la vidange rapide, les deux facteurs de sécurité sont du même ordre

Vidange rapide

$$F = 1,27 \approx F_{\text{minimal}} = 1,3$$

Cette valeur sera admise d'autant plus que nous aurons à disposition sur la face amont de graviers qui sont destinés à d'autres fonctions mais dont la présence est un facteur d'accroissement de stabilité.

CHAPITRE 7

HYPOTHESE DU TALUS AVAL

IMMERGE

7-1 Generalités

Le cours d'eau à travers lequel le barrage s'élève est supposé être en contact avec la mer, de sorte qu'en certaines saisons, la cue aidant, l'eau de mer remonte le lit de la rivière et se hisse jusqu'à un niveau de 3,5 mètres sur le talus aval du barrage. Des figures montrant le niveau d'écrêtement d'une telle situation sont à l'annexe 6.

7-2 - Gradient hydraulique de sortie

nous avons $\Delta H = 3,5$ et $\Delta \Delta H = 3,5/10 = 0,35$

Le gradient hydraulique nous est donné par

$$i = \frac{\Delta \Delta H}{\Delta L} = \frac{0,35}{1,1} = 0,32$$

Ce gradient est inférieur au gradient admissible de l'argile plastique qui a pour

valeur admissible = 0,33

nous n'avons donc pas de problème de Renard.

7-3 Calcul du Débit

Le débit passant par le corps du barrage peut être négligé vu la faible perméabilité du matériau le constituant. Pour trouver le débit passant par la fondation, nous utilisons la formule suivante:

$$Q = T \cdot K \cdot \frac{H}{B}$$

T = profondeur de la fondation = 10 mètres

K = coefficient de perméabilité = 10^{-2} cm/sec

H = Tête d'eau = 3,5 m

B = longueur moyenne de la ligne de courant
: distance du bout du tapis amont imperméable
ou drain vertical = 87 mètres

$$\Rightarrow Q = 1000 \times 10^{-2} \times \frac{350}{8700} = 0,4 \text{ cm}^3/\text{sec/cm}$$

Ce débit n'a aucune importance tant que la hauteur de l'eau de mer est située dans des limites qui ne lui permette pas d'atteindre les zones cultivables.

7-4 Calcul de stabilité

Les détails de ce calcul sont exposés à l'annexe 6. La valeur minimale du facteur de sécurité est donnée par le cercle C₁

$$F = 2,23$$

Cette valeur du coefficient de sécurité étant supérieure à $1,5 = F_{\text{minimal}}$ On n'a aucun pas à s'inquiéter de problèmes de stabilité pour l'hypothèse de service.

Le cas du barrage en construction est de l'hypothèse de vidange rapide non plus n'est pas dangereuse pour le talus^{aval} immergé car le barrage est sécuritaire pour ces différentes hypothèses avec une tête d'eau en amont de 5,5 mètre, Cas bien plus critique que celui de la tête d'eau de 3,5 mètres à l'aval.

CHAPITRE 8

MESURES DE PROTECTION

8-1 Tassements

Le tassement du sol de mangrove, réparti sur une couche de 2m à partir de la surface du sol peut être important et nuire à la bonne tenue de l'ouvrage, c'est la raison pour laquelle cette couche de sol de mangrove devra être excavée, le barrage alors reposera sur la fondation composée de sables fins et grossiers peu susceptible au tassement cause par le poids d'un petit barrage. Toutefois il est souhaitable de suivre les tassements qui pourraient se produire à l'aide de repères et d'apporter des corrections s'il y a lieu.

8-2 - Dispositifs de protection contre les effets de l'eau.

Ce dispositif de protection est en général composé de drains et de filtres. Le rôle des drains a déjà été développé au chapitre 5

Le filtre est un organe destiné à bloquer la migration des particules fines éventuellement entraînées par la circulation de l'eau dans le massif. Nous choisirons des filtres constitués de couches successives de matériaux perméables de granulométrie graduée ces différentes couches doivent chacune jouer le rôle de filtre vis-à-vis de la précédente dans le sens de l'écoulement de l'eau. Pour éviter l'entraînement ou le colmatage des éléments du filtre, il est conseillé d'utiliser des sables dont le coefficient d'uniformité $\frac{D_{60}}{D_{10}}$ est inférieur à 2

D_x = diamètre tel que $x\%$ des particules ont un diamètre inférieur.

T. Brzaghgi a énoncé des critères permettant d'assurer une bonne perméabilité des filtres tout en évitant l'entraînement des particules fines

Ces critères sont les suivants:

granulométrie étroite

$$5 < \frac{D_{50}(\text{filte})}{D_{50}(\text{srl})} < 10$$

granulométrie étendue

$$\frac{D_{15}(\text{filte})}{D_{85}(\text{srl})} < 4 \text{ ou } 5 < \frac{D_{15}(\text{filte})}{D_{15}(\text{srl})}$$

Les talus du barrage doivent être protégés contre l'érosion due au ruissellement des eaux de pluie et en ce qui concerne le talus amont, contre l'attaque des vagues. Le talus aval peut être protégé efficacement contre l'érosion par un enrochement qui doit être réalisé immédiatement après l'achèvement des travaux de terrassement, en ayant soin de recouvrir le pavement d'une couche de terre.

8-4 - Protection des talus.

Le tapis amont doit être protégé par une recharge de 0,60 mètres afin d'éviter la décoloration et la fissuration du tapis lors des sécheresses ainsi que non attaquée par les animaux sauvages.

8-3. Le Tapis amont imperméable.

La couche géomembranaire du matériau constituant chaque filtre doit être à peu près parallèle à celle du matériau de la couche précédente. L'épaisseur minimale de chaque couche doit être de 20 à 30 cm ou supérieure à 50 fois D_{15} (sieve).

végétale de 5 à 10 cm.

Étant donné que notre étude se porte sur un petit barrage (hauteur < 10 m), nous pouvons laisser le parement amont brut ou simplement protégé par la végétation.

Toutefois, on peut protéger ce talus contre l'effet des vagues par un enrochement qui repose sur un filtre ou un traitement de ciment.

Cette protection servirait à empêcher que les matériaux terreux qui constituent le barrage ne soient érodés par les vagues qui se forment sous l'action du vent.

L'épaisseur de l'enrochement doit être tel que 50% des pierres aient un diamètre supérieur à 20 cm, les éléments les plus petits n'ayant pas un diamètre inférieur à 10 cm.

Les dimensions de l'enrochement peuvent être déterminées théoriquement par la formule

$$e = CV^2$$

e = épaisseur de l'enrochement en mètres

V = vitesse de propagation des vagues en m/s

C = coefficient fonction de la pente du talus et du poids spécifique θ du matériau

En prenant $\theta = 2,5$ nous avons $C = 0,028$

$V = 3,3$ m/s (Chapitre 1)

On aura alors $\theta = 0,3$ mètres

La moitié des enrochements devra alors être constituée d'éléments d'un poids unitaire W tel que $W \geq 0,52 C v^3$

Soit $W \geq 0,39$ Kg

schéma du barrage muni de ses dispositifs de protection

CONCLUSION

L'étude que nous venons de réaliser constitue une des étapes d'un projet plus vaste qui est l'aménagement d'un site donné, c'est dire donc que toutes les phases de cette étude technique doivent être conçues non seulement du point de vue purement technique mais aussi dans leur appartenance à un projet global.

C'est la raison pour laquelle l'intérêt de ce rapport de projet de fin d'études réside surtout dans la démarche suivie, les principes utilisés plutôt que dans les résultats trouvés.

Des études plus précises auraient été nécessaires pour déterminer les dimensions optimales à donner à chaque élément du barrage considéré comme étant un élément du projet global.

Les recommandations à faire pour les études techniques sur les petits barrages en terre sont que, en plus de la prise de connaissance de la littérature éditée à cet effet le concepteur doit aussi profiter des expériences heureuses ou malheureuses dans ce domaine, il doit se renseigner sur les méthodes traditionnellement utilisées par les populations pour

répondre les problèmes de ce genre qui se posaient à eux.

Un suivi régulier du barrage doit être assuré pendant et après la construction pour noter les écarts existant entre les calculs et les observations afin de prendre à temps les mesures qui s'imposent.

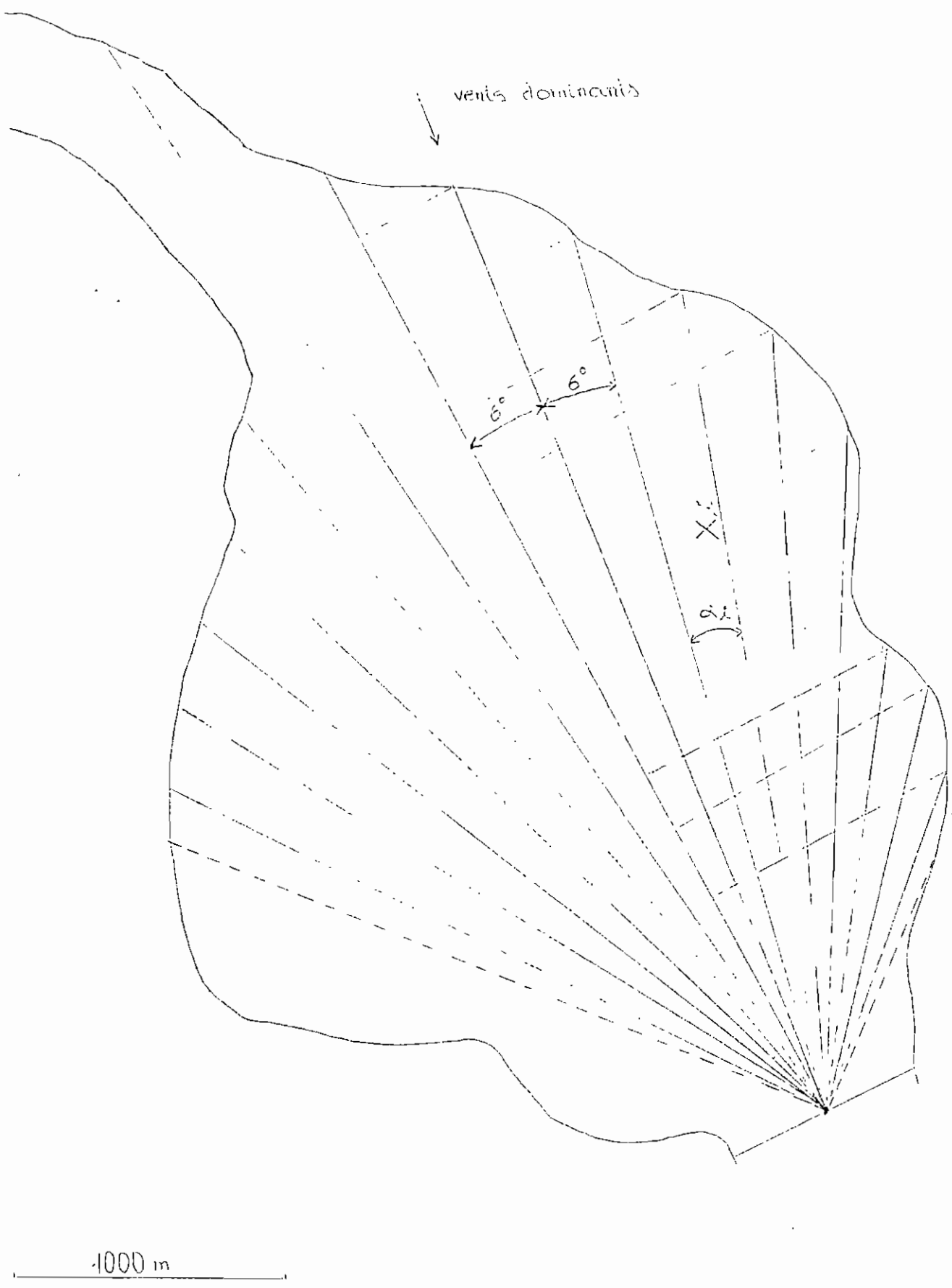
En ce qui concerne les perspectives, elles se situent surtout à notre avis dans le domaine du traitement informatique des données. Car malgré le programme élaboré, il fallait déterminer et mettre en mémoire dans l'ordinateur environ 60 valeurs par cercle de glissement considéré, cela est considérable quand on sait qu'il faut essayer parfois plusieurs dizaines de cercles pour trouver le coefficient de sécurité minimal pour un talus donné. Des études peuvent donc être effectuées dans le sens de perfectionner le programme existant.

Bibliographie

- J. Costet et G. Sanglerat
Cours pratique de mécanique des sols
Tomes I et II
Dunod technique, Paris, 1969. 599 p.
- Pierre Habib
Precis de Géotechnique
Dunod, Paris, 1973. 145 p.
- Marcel Mary
Les barrages
Que Sais-je
Presses universitaires de France
- Raymond Boucher
Technique des barrages.
E.P.M.
Montréal 1971
- Fernand Morin
Notes de cours de mécanique des sols
Sols I et Sols II E.P.T. 1981
- Harry R. Cedergren
Seepage, Drainage, and Flow Nets
John Wiley & Sons, 1977, 534 pages

- Hugo Lehr
Exemples de calculs pour les projets de
fondations
Editions Eyrolles Paris
Editrons Meridiane Bucarest.
- T. William Lambe . Robert V. Whitman
Soil Mechanics
Massachusetts Institute of Technology 1969
John Wiley & Sons, Inc.
- Ministère de l'agriculture (France) , 1977
Direction de l'aménagement
Groupe de travail permanent pour les
barrages en aménagement rural.
Technique des barrages en aménagement rural.
- Seni Tamba Etude des techniques de protection
des pentes avec application au
barrage de Dianki
Projet de fin d'études Mai 1981 EPT
- KHOUSSAYNOBO DIEDHIOU
Barrage en terre sur sol mou
Projet de fin d'études Juin 1982 EPT
- NDIAYE DIOUF NDIAYE Barrage zoné sur fondation
rocheuse
Projet de fin d'études Juin 1982 EPT

ANNEXES



Annexe 1 Calcul du fetch effectif.

fig. 1

Calcul du fetch effectif.

d_i	$\cos d_i$	X_i (km)	$X_i \cos(d_i)$
-42	0,743	2,68	1,991
-36	0,809	2,78	2,249
-30	0,866	2,90	2,511
-24	0,914	3,00	2,742
-18	0,951	3,30	3,138
-12	0,978	4,68	4,577
-6	0,995	3,86	3,841
0	1,000	3,60	3,600
6	0,995	3,32	3,303
12	0,978	3,02	2,953
18	0,951	2,82	2,682
24	0,914	2,48	2,267
30	0,866	1,70	1,472
36	0,809	1,58	1,278
42	0,743	1,30	0,966
	$\Sigma = 13,512$		$\Sigma = 39,57$

$$\Rightarrow \text{Fetch effectif} = \frac{39,57}{13,512} = 2,928 \text{ km.}$$

Tableau 1.

Annexe 2: Calcul de stabilité du talus oval sans dispositif de sécurité

1) Calcul du coefficient de Sécurité du cercle C₁

$$\phi'_{\text{remblai}} = 24^\circ \quad c'_{\text{remblai}} = 3 \text{ t/m}^2$$

$$\phi'_{\text{fondation}} = 30^\circ \quad c'_{\text{fondation}} = 0$$

Le cercle C₁ nous oblige à considérer de la tranche 1 à la tranche 4 les paramètres c' et ϕ' du remblai et de la tranche 5 à la tranche 10 les paramètres c' et ϕ' de la fondation.

$$(C_1) \quad \text{Rayon} = 17,4 \text{ m} \quad \Delta = 90^\circ$$

Avec une valeur initiale de F égale à 1,5 nous trouvons F final = 1,045 après 5 itérations

2) Calcul du coefficient de Sécurité du cercle C₂

$$F_{\text{initial}} = 0,582 \quad \text{nous trouvons } F_{\text{final}} = -0,426$$

Nous nous arrêterons à ce 2^e cercle dans la mesure où les résultats trouvés nous montrent que le talus est instable.

La valeur négative du coefficient de sécurité est tout simplement due au fait que l'action de la pression interstitielle est plus considérable que celles des forces stabilisatrices.

No	(T/m ²) C'	(p-φ) B	(m) B	A-a	(T/m ²) U	(Tonnes) W
1	3	24	2	0,951	0	5,24
2	3	24	2	0,833	1,8	12,66
3	3	24	2	0,54	2,44	13,35
4	3	24	2	0,54	3,54	13,75
5	0	30	2	0,38	4,28	13,28
6	0	30	2	0,291	4,7	13,53
7	0	30	2	0,099	4,98	10,79
8	0	30	2	0	4,86	8,2
9	0	30	2	-0,0095	4,32	7,7
10	0	30	2	-0,197	3,61	5,23
11	0	30	2	-0,32	2,2	3,76
12	0	30	2	-0,793	1,5	2,554

$$24^\circ = 0,419 \text{ m}$$

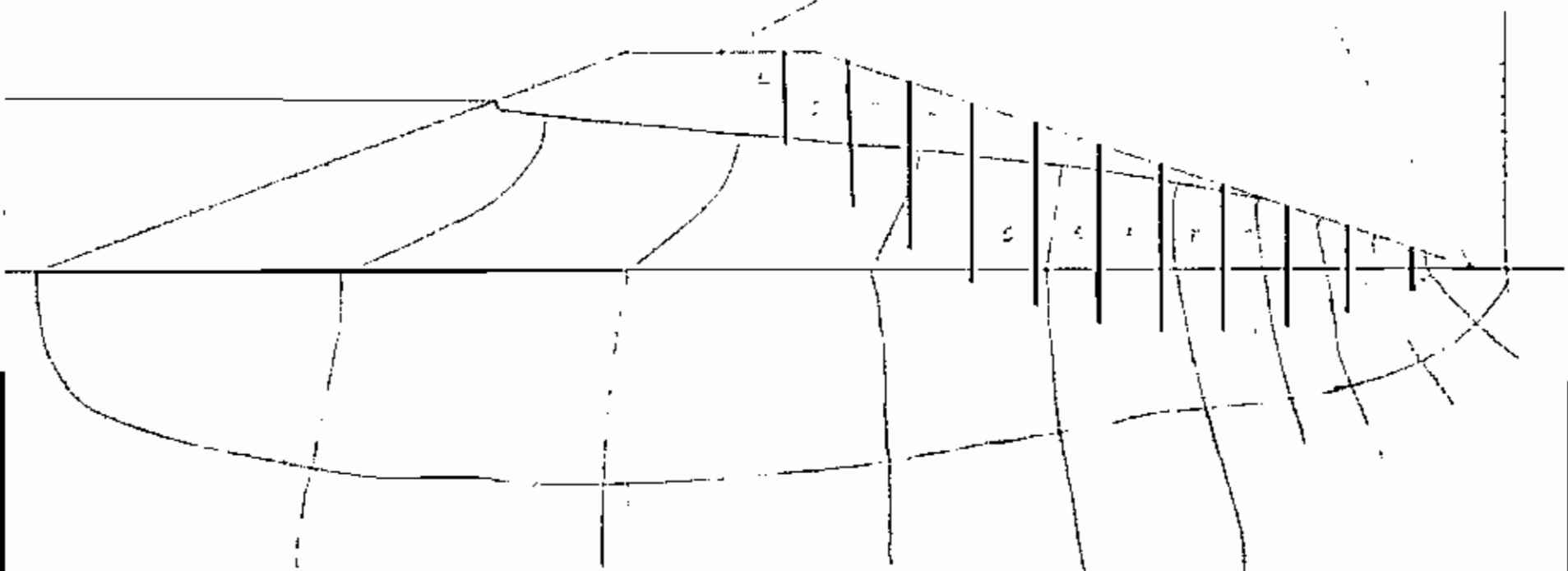
$$30^\circ = 0,524 \text{ m}$$

Cercle C₁

Sectione au
 Talus aval (Eclairage dans
 direction de pente)

10

C₁



A22

Cercle C₁

F INITIAL= 1.5

LARGEUR	ALPHA	PRESS.	POIDS	NUMERATEUR	DENOMINATEUR
2	.951	0	5.24	10.132	4.265
2	.833	1.8	12.66	11.246	9.368
2	.54	2.44	13.95	9.937	7.172
2	.54	3.54	13.75	8.879	7.069
2	.38	4.28	13.28	2.545	4.926
2	.291	4.7	13.59	2.266	3.899
2	9.9E-2	4.98	10.79	.464	1.066
2	0	4.86	9.2	-.301	0
2	-9.5E-3	4.32	7.7	-.545	-7.315E-2
2	-.197	3.47	5.23	-1.092	-1.024
2	-.38	2.2	3.74	-.485	-1.387
2	-.733	1.5	.954	-2.436	-.638

ITERATION 1 F= 1.172

2	.951	0	5.24	9.362	4.265
2	.833	1.8	12.66	10.521	9.368
2	.54	2.44	13.95	9.534	7.172
2	.54	3.54	13.75	8.519	7.069
2	.38	4.28	13.28	2.454	4.926
2	.291	4.7	13.59	2.202	3.899
2	9.9E-2	4.98	10.79	.460	1.066
2	0	4.86	9.2	-.301	0
2	-9.5E-3	4.32	7.7	-.546	-7.315E-2
2	-.197	3.47	5.23	-1.118	-1.024
2	-.38	2.2	3.74	-.511	-1.387
2	-.733	1.5	.954	-2.861	-.638

ITERATION 2 F= 1.089

2	.951	0	5.24	9.119	4.265
2	.833	1.8	12.66	10.288	9.368
2	.54	2.44	13.95	9.400	7.172
2	.54	3.54	13.75	8.399	7.069
2	.38	4.28	13.28	2.423	4.926
2	.291	4.7	13.59	2.181	3.899
2	9.9E-2	4.98	10.79	.458	1.066
2	0	4.86	9.2	-.301	0
2	-9.5E-3	4.32	7.7	-.546	-7.315E-2
2	-.197	3.47	5.23	-1.127	-1.024
2	-.38	2.2	3.74	-.521	-1.387
2	-.733	1.5	.954	-3.047	-.638

ITERATION 3 F= 1.060

Cercle C₁

2	.951	0	5.24	9.031	4.265
2	.833	1.8	12.66	10.203	9.368
2	.54	2.44	13.95	9.350	7.172
2	.54	3.54	13.75	8.355	7.069
2	.38	4.28	13.28	2.412	4.926
2	.291	4.7	13.59	2.173	3.899
2	9.9E-2	4.98	10.79	.457	1.066
2	0	4.86	9.2	-.301	0
2	-9.5E-3	4.32	7.7	-.546	-7.315E-2
2	-.197	3.47	5.23	-1.131	-1.024
2	-.38	2.2	3.74	-.525	-1.387
2	-.733	1.5	.954	-3.124	-.638

ITERATION 4 F= 1.049

2	.951	0	5.24	8.996	4.265
2	.833	1.8	12.66	10.170	9.368
2	.54	2.44	13.95	9.331	7.172
2	.54	3.54	13.75	8.338	7.069
2	.38	4.28	13.28	2.408	4.926
2	.291	4.7	13.59	2.170	3.899
2	9.9E-2	4.98	10.79	.457	1.066
2	0	4.86	9.2	-.301	0
2	-9.5E-3	4.32	7.7	-.546	-7.315E-2
2	-.197	3.47	5.23	-1.132	-1.024
2	-.38	2.2	3.74	-.527	-1.387
2	-.733	1.5	.954	-3.155	-.638

ITERATION 5 F= 1.045

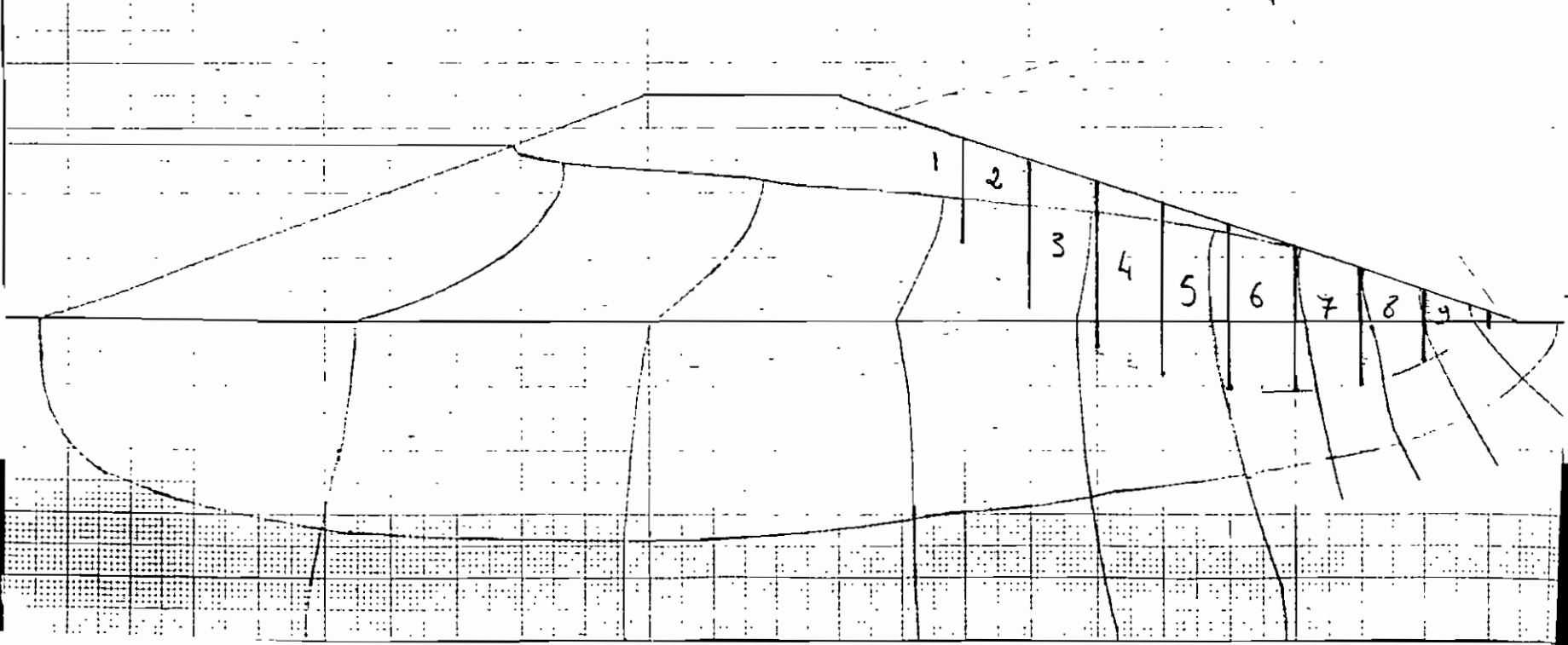
COEFFICIENT DE SEC.DU CERCLE: F FINAL= 1.045

Corde Ca

N°	$W_1 (T)$	$W_2 (T)$	$W (Tons)$	$U (Tons/m^2)$	$\alpha (rad.)$	β	c'	ϕ'
1	5,47	0,45	5,9	0,4	1,5	20	3	24
2	5,7	4,068	9,77	2,1	1,47	2	3	24
3	4,1	6,65	10,75	3,6	1,4	2	0	30
4	2,4	7,78	10,18	4,4	1,325	"	0	30
5	1,2	8,46	9,7	4,7	1,11	"	0	30
6	0,3	7,9	8,2	4,9	0,78	"	0	30
7	0	6,8	6,8	4,0	-0,78	"	0	30
8	0	5,1	5,1	3	-1,326	"	0	30
9	0	2,35	2,35	1,8	-1,35	"	0	30

remblai
 $c' = 3T/m^2$
 $\phi' = 24^\circ$
 $\gamma = 1,9T/m^3$ $\gamma' = 0,9T/m^3$
 fondation
 $c' = 0$ $\phi' = 30^\circ$
 $\gamma = 1,8T/m^3$ $\gamma' = 0,8T/m^3$

0.2



F INITIAL= .582

Cercle Ca

LARGEUR	ALPHA	PRESS.	POIDS	NUMERATEUR	DENOMINATEUR
2	1.5	.4	5.9	9.917	5.885
2	1.47	2.1	9.77	9.839	9.720
2	1.4	3.6	10.75	1.786	10.594
2	1.325	4.4	10.18	.661	9.874
2	1.11	4.7	9.7	.130	8.688
2	.78	4.9	8.2	-.656	5.767
2	-.78	4	6.8	-55.010	-4.782
2	-1.326	3	5.1	.721	-4.948
2	-1.35	1.8	2.35	.963	-2.293

ITERATION 1 F= -.822
 COEFFICIENT DE SEC.DU CERCLE: F FINAL= -.822

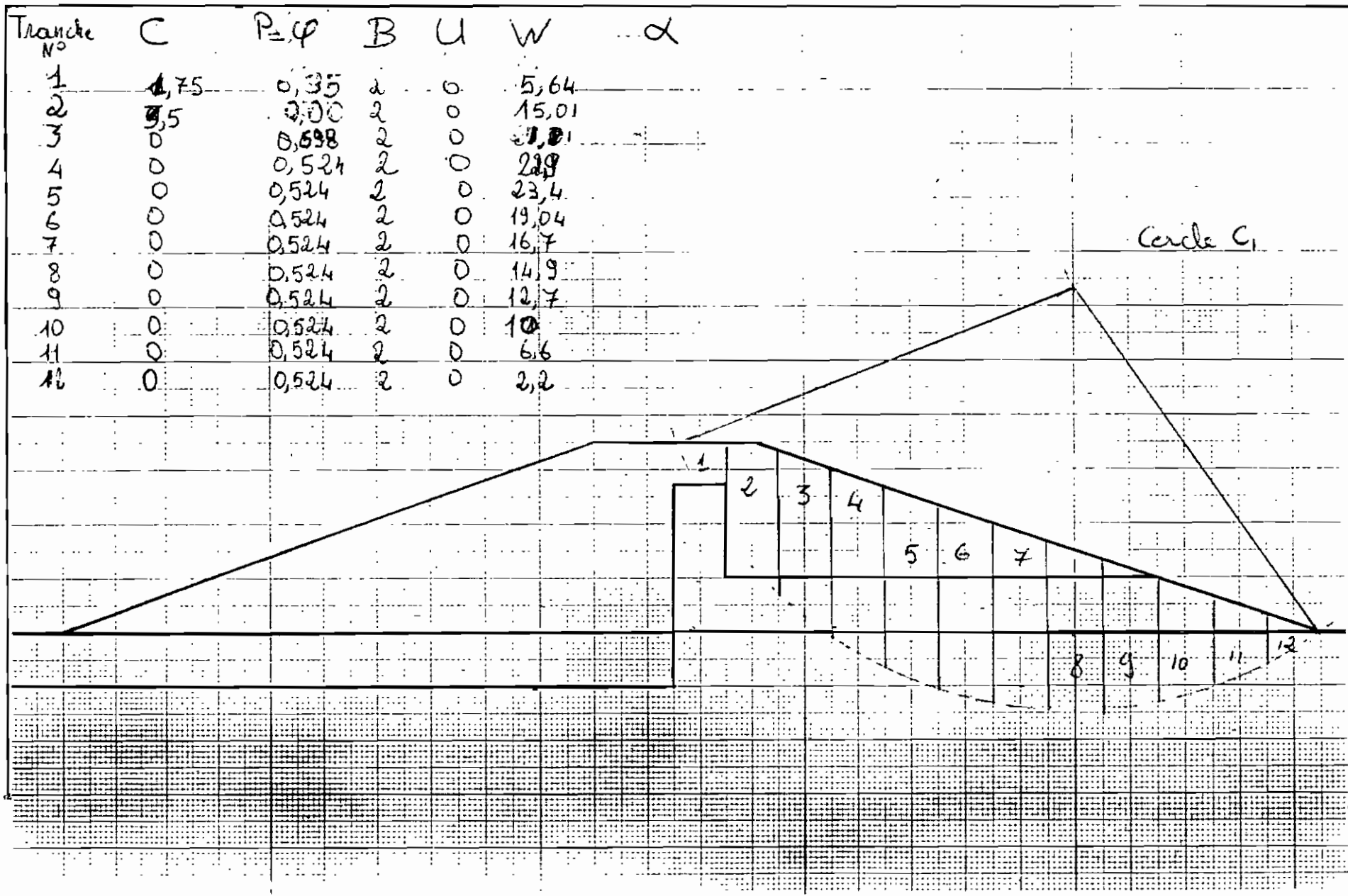
F INITIAL= .586

LARGEUR	ALPHA	PRESS.	POIDS	NUMERATEUR	DENOMINATEUR
2	1.5	.4	5.9	9.979	5.885
2	1.47	2.1	9.77	9.898	9.720
2	1.4	3.6	10.75	1.797	10.594
2	1.325	4.4	10.18	.665	9.874
2	1.11	4.7	9.7	.131	8.688
2	.78	4.9	8.2	-.658	5.767
2	-.78	4	6.8	-39.917	-4.782
2	-1.326	3	5.1	.728	-4.948
2	-1.35	1.8	2.35	.972	-2.293

ITERATION 1 F= -.426
 COEFFICIENT DE SEC.DU CERCLE: F FINAL= -.426

ANNEXE 3

HYPOTHESE DE CONSTRUCTION



Ballage en construction

C₁

F INITIAL= 2

LARGEUR	ALPHA	PRESS.	POIDS	NUMERATEUR	DENOMINATEUR
2	1.144	0	5.64	9.582	5.134
2	.833	0	15.01	8.920	11.107
2	.611	0	21.1	16.703	12.105
2	.54	0	22.9	13.151	11.774
2	.38	0	23.4	13.055	8.680
2	.149	0	19.04	10.664	2.826
2	9.97E-2	0	16.7	9.426	1.662
2	0	0	14.9	8.610	0
2	-9.97E-2	0	12.7	7.595	-1.264
2	-.291	0	10	6.604	-2.869
2	-.337	0	6.6	4.497	-2.182
2	-.464	0	2.2	1.662	-.985

ITERATION 1 F= 2.402

2	1.144	0	5.64	10.065	5.134
2	.833	0	15.01	8.920	11.107
2	.611	0	21.1	17.363	12.105
2	.54	0	22.9	13.484	11.774
2	.38	0	23.4	13.285	8.680
2	.149	0	19.04	10.738	2.826
2	9.97E-2	0	16.7	9.471	1.662
2	0	0	14.9	8.610	0
2	-9.97E-2	0	12.7	7.558	-1.264
2	-.291	0	10	6.501	-2.869
2	-.337	0	6.6	4.413	-2.182
2	-.464	0	2.2	1.616	-.985

ITERATION 2 F= 2.436

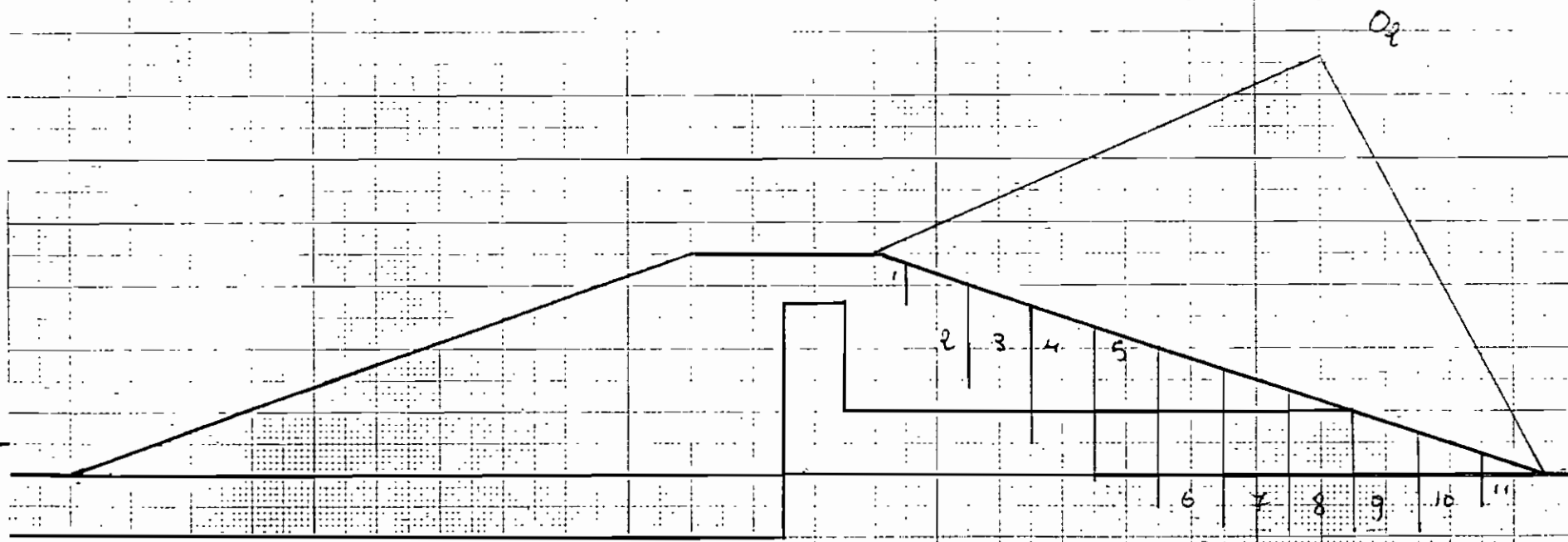
2	1.144	0	5.64	10.100	5.134
2	.833	0	15.01	8.920	11.107
2	.611	0	21.1	17.411	12.105
2	.54	0	22.9	13.508	11.774
2	.38	0	23.4	13.301	8.680
2	.149	0	19.04	10.744	2.826
2	9.97E-2	0	16.7	9.474	1.662
2	0	0	14.9	8.610	0
2	-9.97E-2	0	12.7	7.555	-1.264
2	-.291	0	10	6.494	-2.869
2	-.337	0	6.6	4.408	-2.182
2	-.464	0	2.2	1.613	-.985

ITERATION 3 F= 2.438

COEFFICIENT DE SEC. DU CERCLE: F FINAL= 2.438

Tranche N°	Cu	P=Q	B	U	W
1	3,5	0	1	0	2,7
2	3,5	0	2	0	8,74
3	1,75	0,35	2	0	13,7
4	0	0,698	2	0	15,6
5	0	0,524	2	0	17
6	0	0,524	2	0	15,6
7	0	0,524	2	0	13,9
8	0	0,524	2	0	12,7
9	0	0,524	2	0	8,6
10	0	0,524	2	0	5,2
11	0	0,524	2	0	1,52

cerche C₂



F INITIAL= 2

Barrage en construction Ca

LARGEUR	ALPHA	PRESS.	POIDS	NUMERATEUR	DENOMINATEUR
1	.611	0	2.7	4.273	1.549
2	.876	0	8.74	10.934	6.714
2	.576	0	13.7	9.062	7.462
2	.423	0	15.6	5.771	6.404
2	.406	0	17	13.151	6.714
2	.245	0	15.6	8.666	3.784
2	.197	0	13.9	7.744	2.721
2	0	0	12.7	7.339	0
2	-.148	0	8.6	5.251	-1.268
2	-.245	0	5.2	3.339	-1.261
2	-.291	0	1.52	1.004	-.436

ITERATION 1 F= 2.364

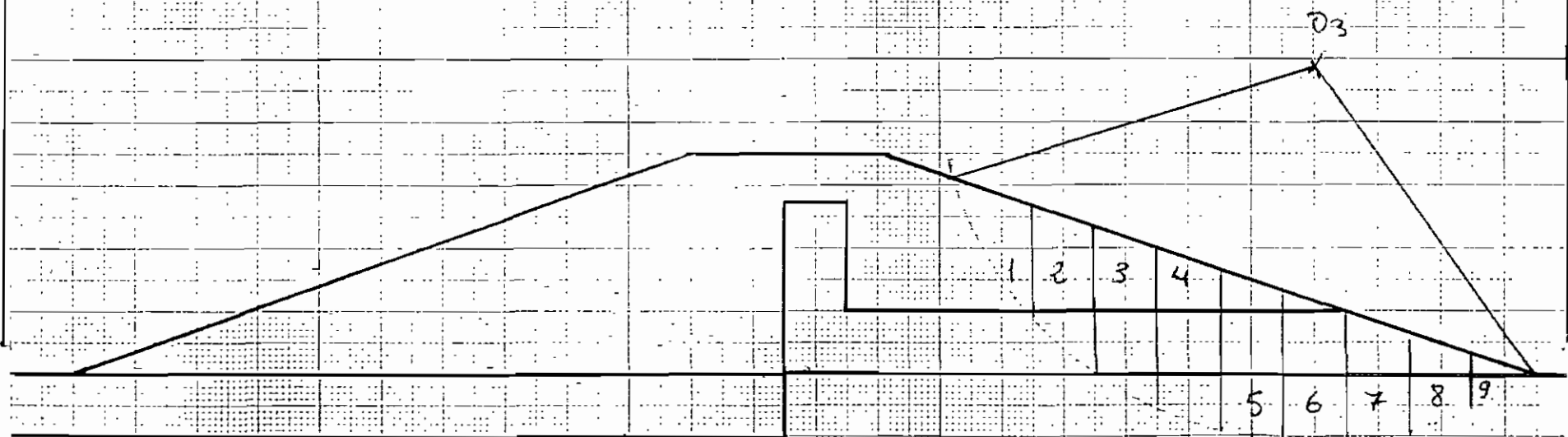
1	.611	0	2.7	4.273	1.549
2	.876	0	8.74	10.934	6.714
2	.576	0	13.7	9.212	7.462
2	.423	0	15.6	5.839	6.404
2	.406	0	17	13.468	6.714
2	.245	0	15.6	8.757	3.784
2	.197	0	13.9	7.810	2.721
2	0	0	12.7	7.339	0
2	-.148	0	8.6	5.215	-1.268
2	-.245	0	5.2	3.299	-1.261
2	-.291	0	1.52	.989	-.436

ITERATION 2 F= 2.382

COEFFICIENT DE SEC. DU CERCLE: F FINAL= 2.382

Tronche N°	Cu	(P-φ) α	B	U	W
1	3,5	0	2,4	0	6,06
2	0	0,698	2	0	15,3
3	0	0,524	2	0	16,9
4	0	0,524	2	0	15
5	0	0,524	2	0	14,6
6	0	0,524	2	0	12,3
7	0	0,524	2	0	8,3
8	0	0,524	2	0	5,8
9	0	0,524	2	0	2

cercle C₃



77

F INITIAL= 2

Barrage en construction C3

LARGEUR	ALPHA	PRESS.	POIDS	NUMERATEUR	DENOMINATEUR
2,4	1,1	0	6,06	18,519	5,401
2	,7	0	15,3	12,400	9,857
2	,464	0	16,9	9,541	7,563
2	,381	0	15	8,369	5,578
2	,197	0	14,6	8,134	2,858
2	0	0	12,3	7,108	0
2	-.183	0	8,3	5,153	-1,510
2	-.245	0	5,8	3,724	-1,407
2	-.464	0	2	1,511	-.895

ITERATION 1 F= 2,713

2,4	1,1	0	6,06	18,519	5,401
2	,7	0	15,3	13,314	9,857
2	,464	0	16,9	9,869	7,563
2	,381	0	15	8,604	5,578
2	,197	0	14,6	8,253	2,858
2	0	0	12,3	7,108	0
2	-.183	0	8,3	5,078	-1,510
2	-.245	0	5,8	3,649	-1,407
2	-.464	0	2	1,447	-.895

ITERATION 2 F= 2,763

2,4	1,1	0	6,06	18,519	5,401
2	,7	0	15,3	13,364	9,857
2	,464	0	16,9	9,886	7,563
2	,381	0	15	8,616	5,578
2	,197	0	14,6	8,259	2,858
2	0	0	12,3	7,108	0
2	-.183	0	8,3	5,074	-1,510
2	-.245	0	5,8	3,646	-1,407
2	-.464	0	2	1,443	-.895

ITERATION 3 F= 2,766

COEFFICIENT DE SEC. DU CERCLE: F FINAL= 2,766

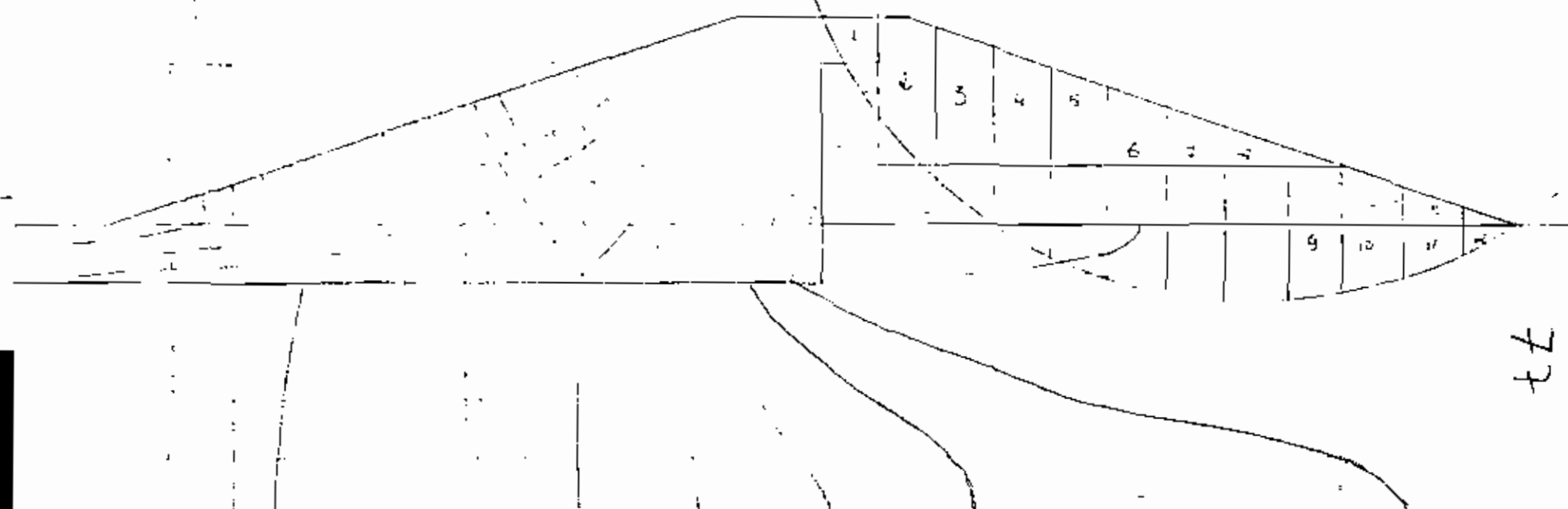
ANNEXE 4

HYPOTHESE de SERVICE

Tranche N°	C'	(P=Q) m	B	U	W (toques)	α
1	1,5	0,558	2	0	5,64	1,144
2	3	0,419	2	0	15,01	0,833
3	0	0,698	2	0	21,1	0,611
4	0	0,524	2	1,8	22,9	0,54
5	0	0,524	2	2,0	23,4	0,38
6	0	0,524	2	2,2	19,8	0,49
7	0	0,524	2	2,8	16,4	0,0937
8	0	0,524	2	2,9	14,9	0
9	0	0,524	2	2,7	12,7	-0,0937
10	0	0,524	2	2,1	10	-0,291
11	0	0,524	2	1,6	6,6	-0,337
12	0	0,524	2	0,8	2,2	-0,464

Circle C₁

- 0,



tt

INITIAL= 1.6

Hypothèse de service C₁

LARGEUR	ALPHA	PRESS.	POTDS	NUMERATEUR	DENOMINATEUR
2	1.144	0	5.64	8.478	5.134
2	.833	0	15.01	14.437	11.107
2	.611	0	21.1	15.806	12.105
2	.54	1.8	22.9	10.689	11.774
2	.38	2	23.4	10.550	8.680
2	.149	2.2	19.04	8.115	2.826
2	9.97E-2	2.8	16.7	6.222	1.662
2	0	2.9	14.9	5.259	0
2	-9.97E-2	2.7	12.7	4.399	-1.264
2	-.291	2.1	10	3.923	-2.869
2	-.337	1.6	6.6	2.384	-2.182
2	-.464	.8	2.2	.473	-.985

ITERATION 1 F= 1.973

2	1.144	0	5.64	9.289	5.134
2	.833	0	15.01	15.107	11.107
2	.611	0	21.1	16.651	12.105
2	.54	1.8	22.9	11.061	11.774
2	.38	2	23.4	10.808	8.680
2	.149	2.2	19.04	8.195	2.826
2	9.97E-2	2.8	16.7	6.263	1.662
2	0	2.9	14.9	5.259	0
2	-9.97E-2	2.7	12.7	4.368	-1.264
2	-.291	2.1	10	3.835	-2.869
2	-.337	1.6	6.6	2.320	-2.182
2	-.464	.8	2.2	.454	-.985

ITERATION 2 F= 2.036

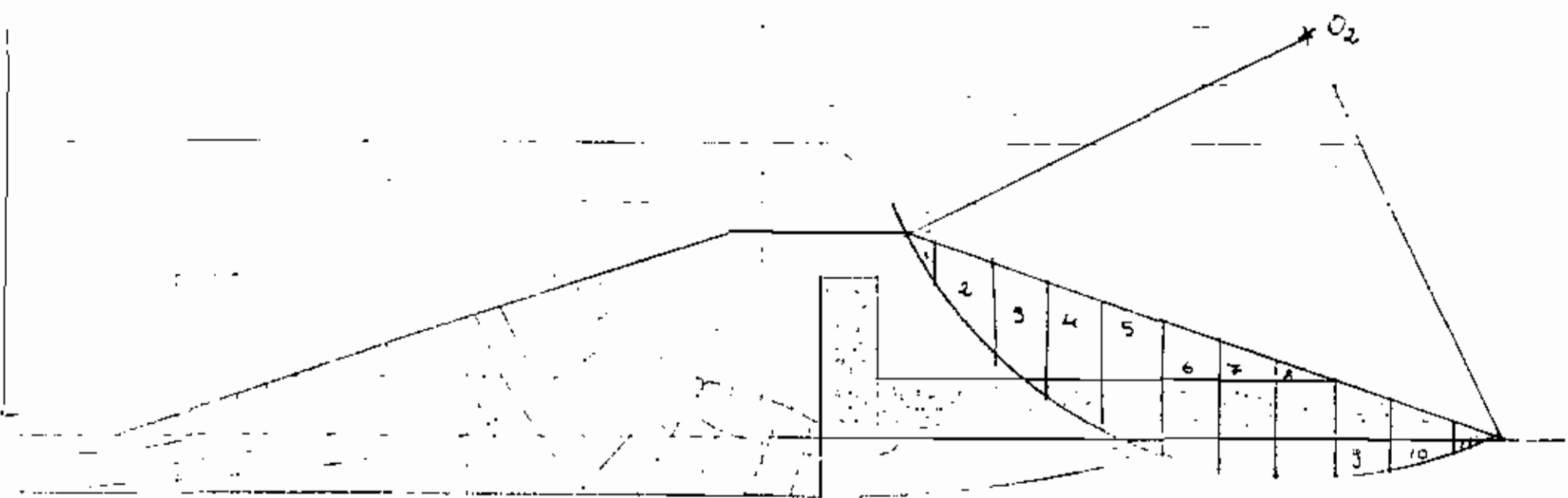
2	1.144	0	5.64	9.408	5.134
2	.833	0	15.01	15.200	11.107
2	.611	0	21.1	16.770	12.105
2	.54	1.8	22.9	11.112	11.774
2	.38	2	23.4	10.843	8.680
2	.149	2.2	19.04	8.205	2.826
2	9.97E-2	2.8	16.7	6.269	1.662
2	0	2.9	14.9	5.259	0
2	-9.97E-2	2.7	12.7	4.364	-1.264
2	-.291	2.1	10	3.824	-2.869
2	-.337	1.6	6.6	2.312	-2.182
2	-.464	.8	2.2	.452	-.985

ITERATION 3 F= 2.044

COEFFICIENT DE SEC. DU CERCLE: F FINAL= 2.044

Tranche N°	C'	(P=φ)rd.	B	U	W	Z
1	3	0,419	1	0	2,7	0,611
2	3	0,419	2	0	8,74	0,876
3	2	0,454	2	0	13,7	0,578
4	0	0,698	2	0	15,6	0,423
5	0	0,559	2	0,8	17	0,406
6	0	0,524	2	1,2	15,6	0,245
7	0	0,524	2	1,4	13,9	0,197
8	0	0,524	1	1,55	12,7	0,000
9	0	0,524	2	1,8	8,6	-0,118
10	0	0,524	2	1	5,2	-0,245
11	0	0,524	2	0,4	1,52	-0,291

Cercle C₂



F INITIAL= 2

Cercle C2

LARGEUR	ALPHA	PRESS.	POIDS	NUMERATEUR	DENOMINATEUR
1	.611	0	2.7	4.439	1.549
2	.876	0	8.74	12.194	6.714
2	.576	0	13.7	10.999	7.462
2	.423	0	15.6	12.072	6.404
2	.406	.8	17	9.243	6.714
2	.245	1.2	15.6	7.333	3.784
2	.197	1.4	13.9	6.184	2.721
2	0	1.55	12.7	5.548	0
2	-.148	1.2	8.6	3.786	-1.268
2	-.245	1	5.2	2.055	-1.261
2	-.291	.4	1.52	.475	-.436

ITERATION 1 F= 2.295

1	.611	0	2.7	4.517	1.549
2	.876	0	8.74	12.534	6.714
2	.576	0	13.7	11.196	7.462
2	.423	0	15.6	12.324	6.404
2	.406	.8	17	9.386	6.714
2	.245	1.2	15.6	7.397	3.784
2	.197	1.4	13.9	6.228	2.721
2	0	1.55	12.7	5.548	0
2	-.148	1.2	8.6	3.764	-1.268
2	-.245	1	5.2	2.034	-1.261
2	-.291	.4	1.52	.470	-.436

ITERATION 2 F= 2.328

1	.611	0	2.7	4.525	1.549
2	.876	0	8.74	12.567	6.714
2	.576	0	13.7	11.215	7.462
2	.423	0	15.6	12.349	6.404
2	.406	.8	17	9.400	6.714
2	.245	1.2	15.6	7.403	3.784
2	.197	1.4	13.9	6.232	2.721
2	0	1.55	12.7	5.548	0
2	-.148	1.2	8.6	3.762	-1.268
2	-.245	1	5.2	2.032	-1.261
2	-.291	.4	1.52	.469	-.436

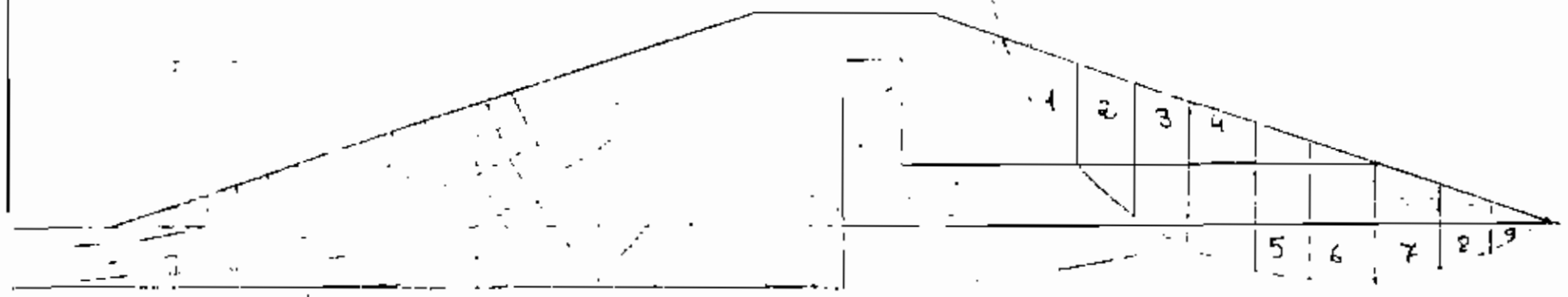
ITERATION 3 F= 2.332

COEFFICIENT DE SEC. DU CERCLE: F FINAL= 2.332

Tramo N°	C'	(P.4) NA	B	U	W (Tonos)	α
1	3	0,419	2,4	0	6,06	1,1
2	0	0,698	2	0	15,3	0,7
3	0	0,524	2	0	16,0	0,464
4	0	0,524	2	1,2	15	0,381
5	0	0,524	2	2	14,6	0,197
6	0	0,524	2	2	12,3	0
7	0	0,524	2	1,9	8,3	-0,183
8	0	0,524	2	1,2	5,8	-0,245
9	0	0,524	2	0,7	2	-0,464

Cercle C3

$\times 0_3$



F INITIAL= 2

Cercle C3

LARGEUR	ALPHA	PRESS.	PDIDS	NUMERATEUR	DENOMINATEUR
2.4	1.1	0	6.06	15.181	5.401
2	.7	0	15.3	12.400	9.857
2	.464	0	16.9	9.541	7.563
2	.381	1.2	15	7.030	5.578
2	.197	2	14.6	5.906	2.858
2	0	2	12.3	4.796	0
2	-.183	1.9	8.3	2.794	-1.510
2	-.245	1.2	5.8	2.183	-1.407
2	-.464	.7	2	.453	-.895

ITERATION 1 F= 2.197

2.4	1.1	0	6.06	15.606	5.401
2	.7	0	15.3	12.697	9.857
2	.464	0	16.9	9.650	7.563
2	.381	1.2	15	7.096	5.578
2	.197	2	14.6	5.935	2.858
2	0	2	12.3	4.796	0
2	-.183	1.9	8.3	2.780	-1.510
2	-.245	1.2	5.8	2.168	-1.407
2	-.464	.7	2	.447	-.895

ITERATION 2 F= 2.229

2.4	1.1	0	6.06	15.671	5.401
2	.7	0	15.3	12.742	9.857
2	.464	0	16.9	9.667	7.563
2	.381	1.2	15	7.106	5.578
2	.197	2	14.6	5.939	2.858
2	0	2	12.3	4.796	0
2	-.183	1.9	8.3	2.778	-1.510
2	-.245	1.2	5.8	2.166	-1.407
2	-.464	.7	2	.446	-.895

ITERATION 3 F= 2.234

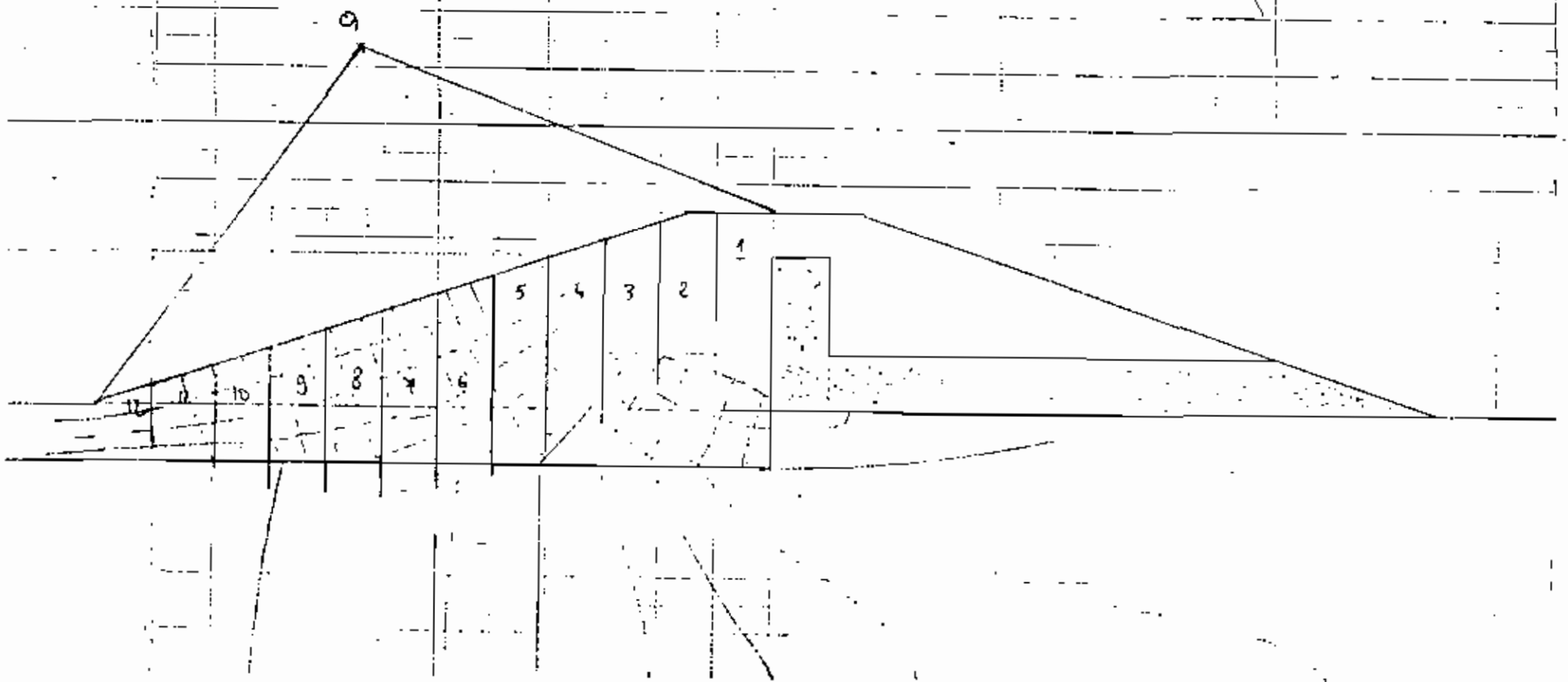
COEFFICIENT DE SEC.DU CERCLE: F FINAL= 2.234

ANNEXE 5

HYPOTHESE DE LA
VIDANGE RAPIDE

Tranche N°	C'	P ₁	P ₂	B	d (m)	U	W
1	3	0,413		2	1,166	0	3,6
2	3	0,218		2	0,433	0	11,2
3	3	0,419		2	0,611	6,3	15,8
4	3	0,419		2	0,54	6,9	14,6
5	3	0,419		2	0,38	7,1	12,6
6	0	0,524		2	0,143	5,1	12,4
7	0	0,524		2	0,0932	6,2	11,5
8	0	0,524		2	0	6,2	10,8
9	0	0,524		2	-0,0932	5,4	9,45
10	0	0,524		2	-0,291	4,3	7,6
11	3	0,419		1	-0,337	3	5,2
12	3	0,49		2	-0,404	1,4	1,8

Vidange Rapide C₁



2	.611	6.3	17.8	8.283	10.212
2	.54	6.9	14.46	6.150	7.434
2	.38	7.1	12.6	-.680	4.674
2	.149	7.1	12.4	-.990	1.841
2	.1	6.8	11.5	-1.171	1.148
2	0	6.2	10.7	-.982	0
2	-9.97E-2				
		5.4	9.45	-.818	-.941
2	-.291	4.3	7.6	-.690	-2.181
2	-.337	3	5.2	6.741	-1.719
2	-.464	1.4	1.8	7.406	-.806

ITERATION 2 F= 1.296

2	1.144	0	7.6	12.912	6.918
2	.833	0	18.43	15.327	13.637
2	.611	6.3	17.8	8.163	10.212
2	.54	6.9	14.46	6.084	7.434
2	.38	7.1	12.6	-.675	4.674
2	.149	7.1	12.4	-.986	1.841
2	.1	6.8	11.5	-1.167	1.148
2	0	6.2	10.7	-.982	0
2	-9.97E-2				
		5.4	9.45	-.821	-.941
2	-.291	4.3	7.6	-.696	-2.181
2	-.337	3	5.2	6.799	-1.719
2	-.464	1.4	1.8	7.502	-.806

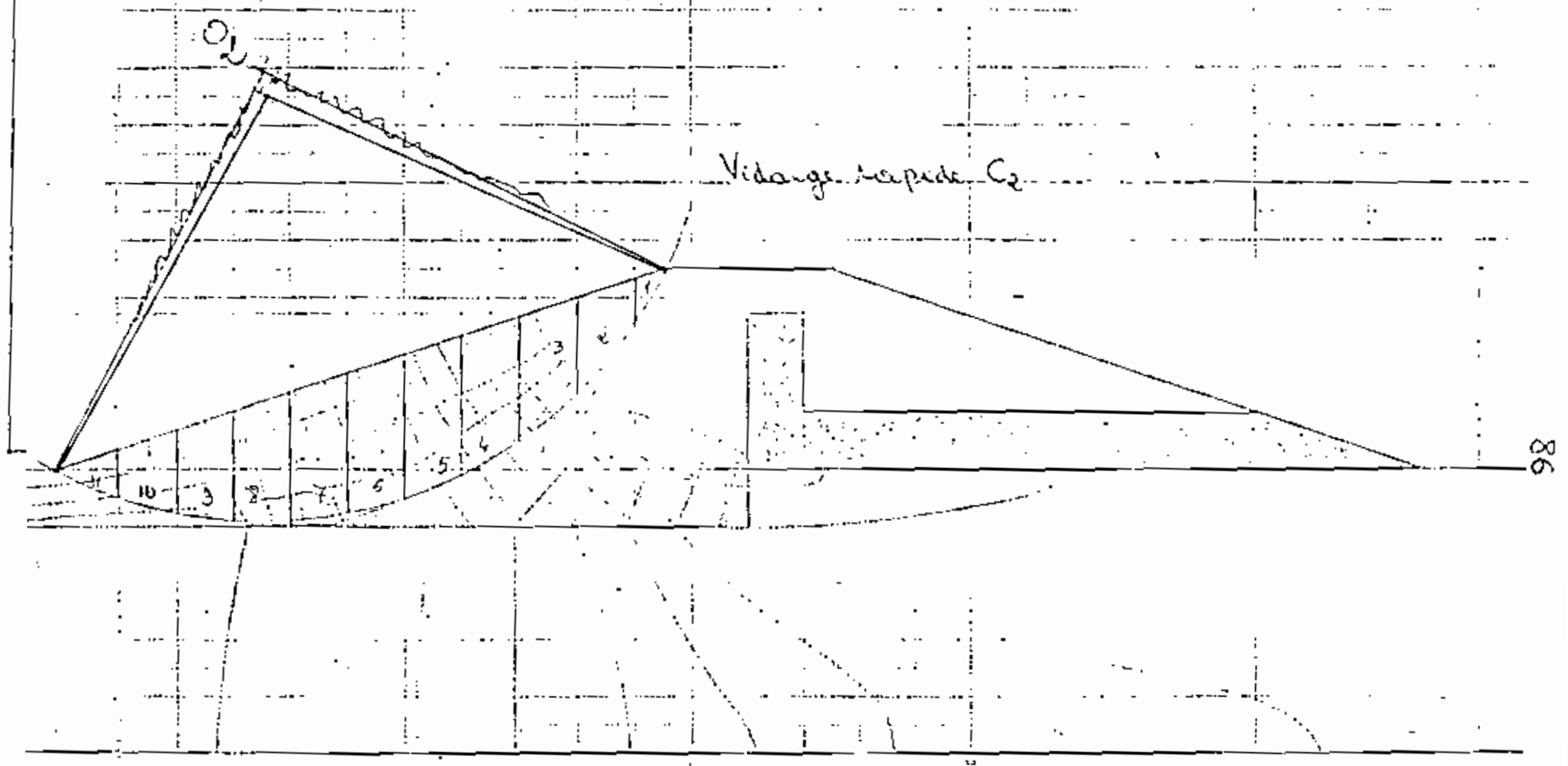
ITERATION 3 F= 1.280

2	1.144	0	7.6	12.844	6.918
2	.833	0	18.43	15.276	13.637
2	.611	6.3	17.8	8.163	10.212
2	.54	6.9	14.46	6.072	7.434
2	.38	7.1	12.6	-.674	4.674
2	.149	7.1	12.4	-.985	1.841
2	.1	6.8	11.5	-1.167	1.148
2	0	6.2	10.7	-.982	0
2	-9.97E-2				
		5.4	9.45	-.821	-.941
2	-.291	4.3	7.6	-.698	-2.181
2	-.337	3	5.2	6.810	-1.719
2	-.464	1.4	1.8	7.521	-.806

ITERATION 4 F= 1.277

COEFFICIENT DE SEC. DU CERCLE: F FINAL= 1.277

Tranche n°	C'	(P-Q)ca	B	A	U	W
1	3	0,419	1	0,60	0,8	2,8
2	3	0,419	2	0,876	2,5	8,74
3	3	0,419	2	0,576	4	9,32
4	3	0,419	2	0,423	4,9	8,28
5	3	0,419	2	0,406	5	8,92
6	3	0,419	1	0,245	5,1	9
7	3	0,419	2	0,187	4,8	8,64
8	3	0,419	2	0	4,8	7,56
9	3	0,419	2	-0,148	3,5	6,12
10	3	0,419	2	-0,245	2,5	4,23
11	3	0,419	2	-0,281	0,2	1,53



F INITIAL= 2

Cercle C2

LARGEUR	ALPHA	PRESS.	POIDS	NUMERATEUR	DENOMINATEUR
1	.611	0	2.7	4.439	1.549
2	.876	0	8.74	12.194	6.714
2	.576	4	9.92	7.141	5.403
2	.423	4.9	8.28	5.306	3.399
2	.406	5	8.82	5.438	3.483
2	.245	5.1	9	5.337	2.183
2	.197	4.8	8.64	5.441	1.691
2	0	4.2	7.56	5.626	0
2	-.148	3.5	6.12	5.865	-.902
2	-.245	2.5	4.23	6.175	-1.026
2	-.291	.7	1.53	6.776	-.439

ITERATION 1 F= 3.162

1	.611	0	2.7	4.670	1.549
2	.876	0	8.74	13.218	6.714
2	.576	4	9.92	7.489	5.403
2	.423	4.9	8.28	5.489	3.399
2	.406	5	8.82	5.619	3.483
2	.245	5.1	9	5.442	2.183
2	.197	4.8	8.64	5.527	1.691
2	0	4.2	7.56	5.626	0
2	-.148	3.5	6.12	5.792	-.902
2	-.245	2.5	4.23	6.044	-1.026
2	-.291	.7	1.53	6.602	-.439

ITERATION 2 F= 3.243

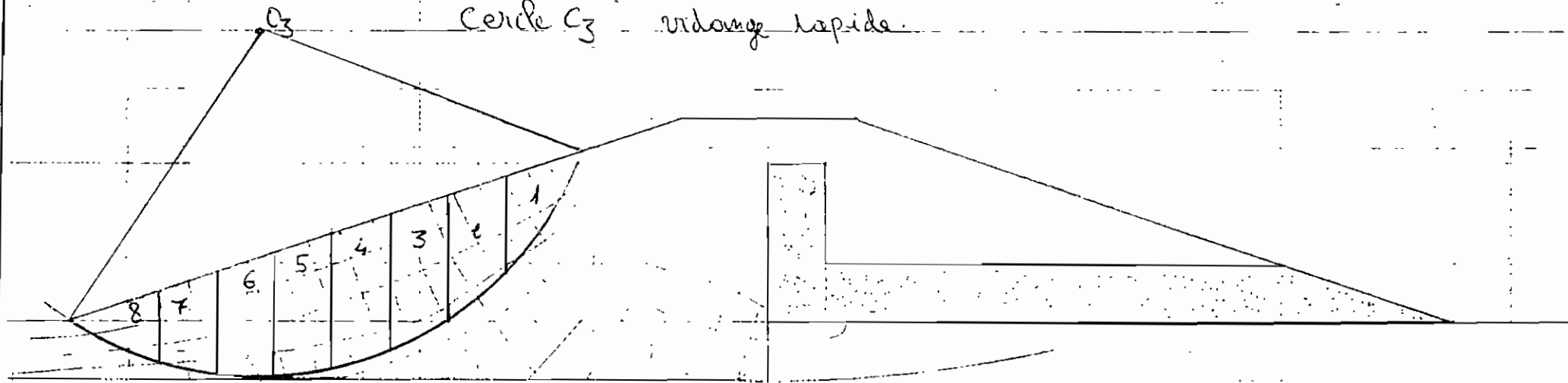
1	.611	0	2.7	4.681	1.549
2	.876	0	8.74	13.266	6.714
2	.576	4	9.92	7.505	5.403
2	.423	4.9	8.28	5.498	3.399
2	.406	5	8.82	5.627	3.483
2	.245	5.1	9	5.447	2.183
2	.197	4.8	8.64	5.531	1.691
2	0	4.2	7.56	5.626	0
2	-.148	3.5	6.12	5.789	-.902
2	-.245	2.5	4.23	6.039	-1.026
2	-.291	.7	1.53	6.595	-.439

ITERATION 3 F= 3.246

COEFFICIENT DE SEC. DU CERCLE: F FINAL= 3.246

Tranche N°	ϵ	$P(\rho)$	B	$\sigma(\rho)$	U	W
1	3	0,419	2,4	1,13	2,2	2,9
2	3	0,419	2	0,76	3,9	6,75
3	3	0,419	2	0,46	4,6	8,2
4	3	0,419	2	0,23	4,9	8,46
5	3	0,419	2	0,215	4,6	8,1
6	3	0,419	2	0	4	7,3
7	3	0,419	2	-0,197	3	5,7
8	3	0,419	3	-0,675	1,3	3,4

cercle C_3 - udongz lapide.



F INITIAL= 2

Cercle C₃

LARGEUR	ALPHA	PRESS.	POIDS	NUMERATEUR	DENOMINATEUR
2.4	1.13	2.2	2.9	9.776	2.623
2	.76	3.9	6.75	6.299	4.650
2	.46	4.6	8.2	5.583	3.640
2	.29	4.9	8.46	5.287	2.419
2	.245	4.6	8.1	5.380	1.965
2	0	4	7.3	5.688	0
2	-.197	3	5.7	6.260	-1.116
2	-.675	1.9	3.4	9.075	-2.125

ITERATION 1 F= 4.425

2.4	1.13	2.2	2.9	11.860	2.623
2	.76	3.9	6.75	6.966	4.650
2	.46	4.6	8.2	5.905	3.640
2	.29	4.9	8.46	5.474	2.419
2	.245	4.6	8.1	5.540	1.965
2	0	4	7.3	5.688	0
2	-.197	3	5.7	6.105	-1.116
2	-.675	1.9	3.4	8.111	-2.125

ITERATION 2 F= 4.616

2.4	1.13	2.2	2.9	11.947	2.623
2	.76	3.9	6.75	6.991	4.650
2	.46	4.6	8.2	5.916	3.640
2	.29	4.9	8.46	5.481	2.419
2	.245	4.6	8.1	5.546	1.965
2	0	4	7.3	5.688	0
2	-.197	3	5.7	6.100	-1.116
2	-.675	1.9	3.4	8.081	-2.125

ITERATION 3 F= 4.624

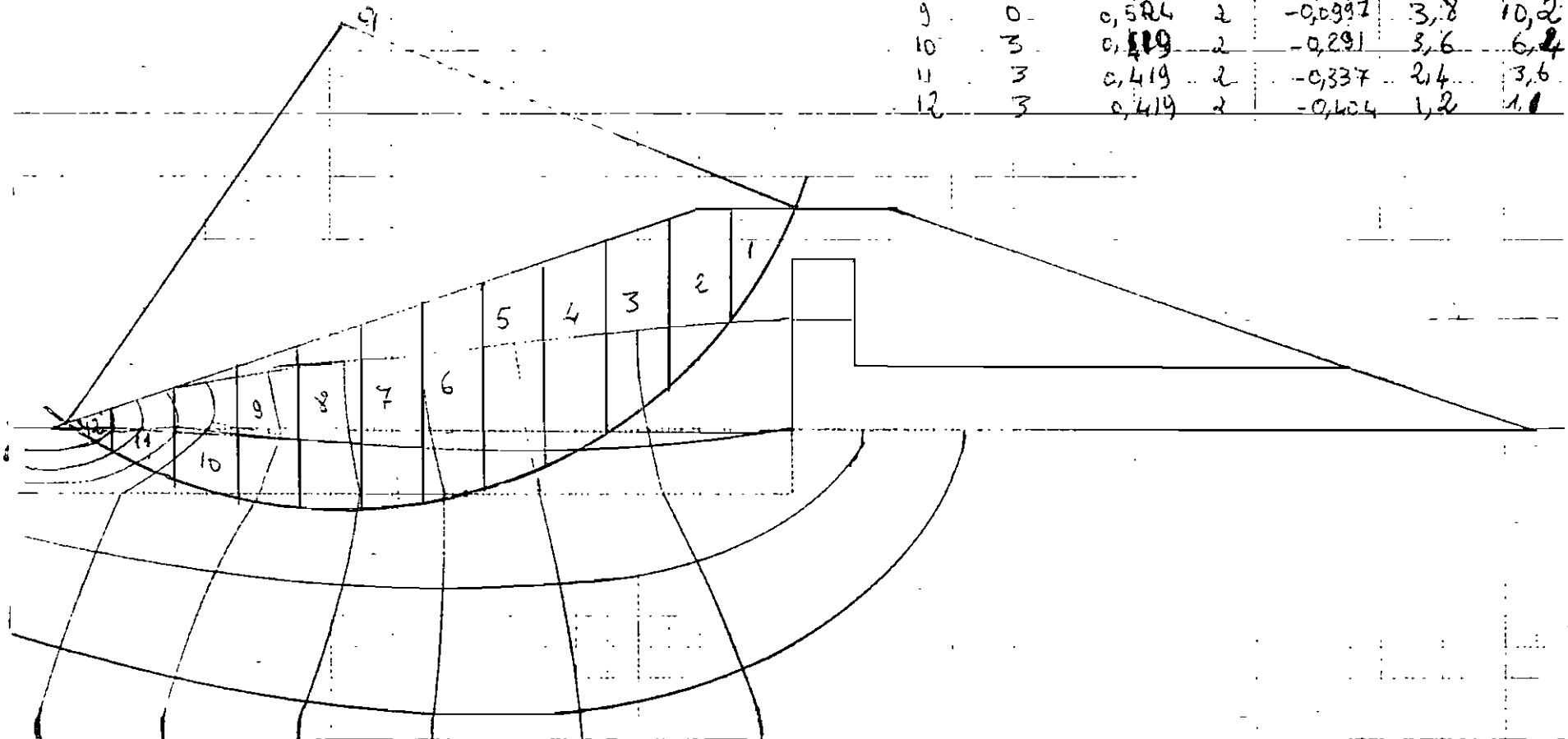
COEFFICIENT DE SEC. DU CERCLE: F FINAL= 4.624

ANNEXE 6

HYPOTHESE DU TALUS AVAL

IMMERGE

Tranche N°	c'	(P-Q)nd	B	α (rad)	u	W
1	3	0,419	2	1,144	0	6,84
2	3	0,419	2	0,833	1	15,01
3	3	0,419	2	0,611	2,4	16,57
4	3	0,419	2	0,56	3,4	16,19
5	3	0,419	2	0,38	4,1	15,4
6	3	0,419	2	0,149	4,3	14,2
7	0	0,524	2	0,0997	4,3	13
8	0	0,524	2	0	4,4	10,7
9	0	0,524	2	-0,0997	3,8	10,2
10	3	0,419	2	-0,291	3,6	6,4
11	3	0,419	2	-0,337	2,4	3,6
12	3	0,419	2	-0,404	1,2	1,1



F INITIAL= 2

Cercle C₁

LARGEUR	ALPHA	PRESS.	POIDS	NUMERATEUR	DENOMINATEUR
2	1.144	0	6.84	14.670	6.226
2	.833	1	15.01	14.084	11.107
2	.611	2.4	16.57	11.873	9.506
2	.54	3.4	16.19	10.473	8.324
2	.38	4.1	15.4	9.104	5.712
2	.149	4.3	14.8	3.472	2.197
2	.1	4.3	13	2.483	1.298
2	0	4.3	10.7	1.214	0
2	-9.97E-2				
		3.8	10.2	1.555	-1.015
2	-.291	3.6	6.4	6.312	-1.836
2	-.337	2.4	3.6	6.281	-1.190
2	-.404	1.2	1.1	6.516	-.432

ITERATION 1 F= 2.207

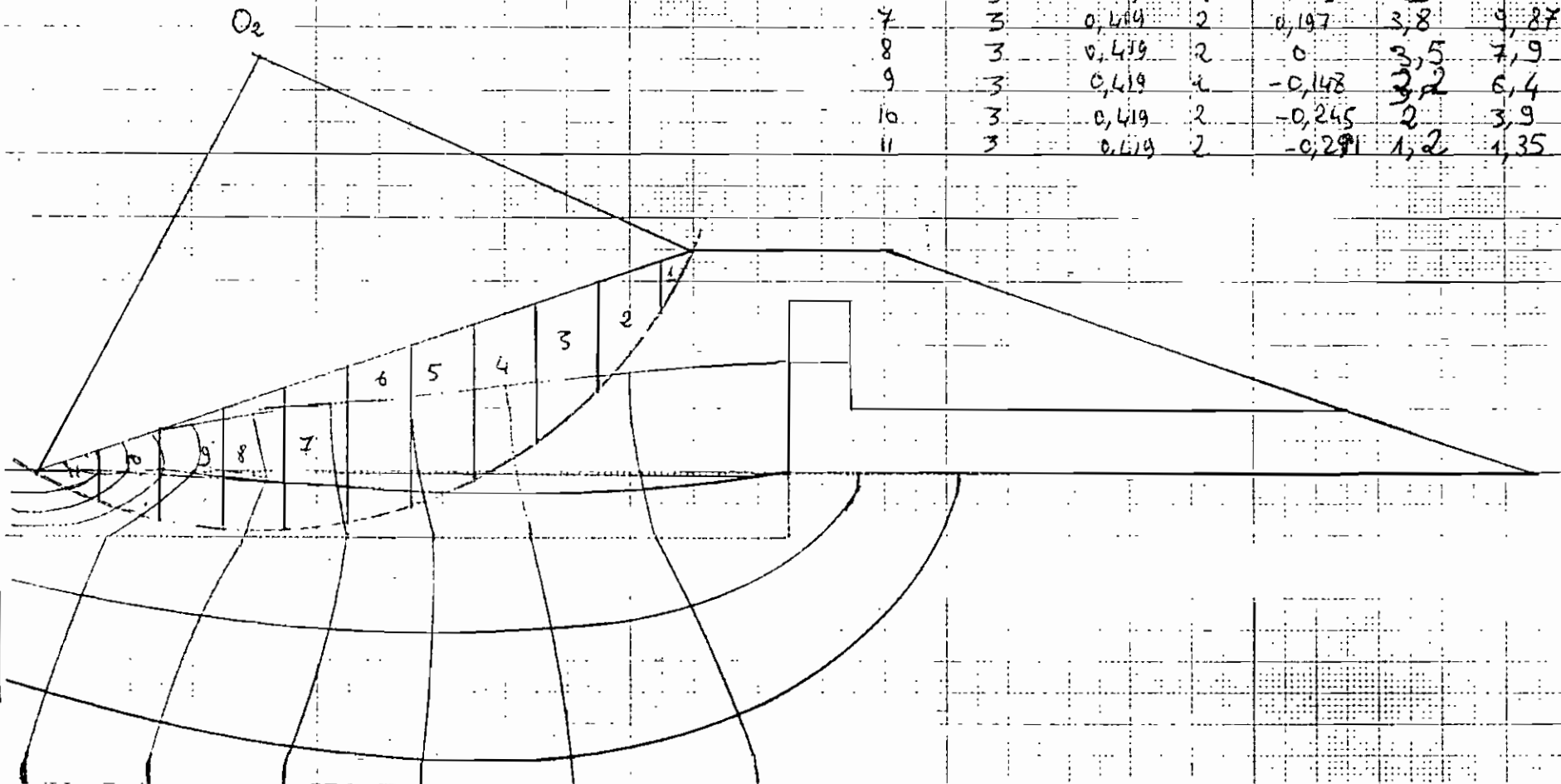
2	1.144	0	6.84	15.136	6.226
2	.833	1	15.01	14.348	11.107
2	.611	2.4	16.57	12.025	9.506
2	.54	3.4	16.19	10.590	8.324
2	.38	4.1	15.4	9.174	5.712
2	.149	4.3	14.8	3.486	2.197
2	.1	4.3	13	2.490	1.298
2	0	4.3	10.7	1.214	0
2	-9.97E-2				
		3.8	10.2	1.551	-1.015
2	-.291	3.6	6.4	6.270	-1.836
2	-.337	2.4	3.6	6.232	-1.190
2	-.404	1.2	1.1	6.452	-.432

ITERATION 2 F= 2.230

2	1.144	0	6.84	15.185	6.226
2	.833	1	15.01	14.376	11.107
2	.611	2.4	16.57	12.041	9.506
2	.54	3.4	16.19	10.602	8.324
2	.38	4.1	15.4	9.182	5.712
2	.149	4.3	14.8	3.487	2.197
2	.1	4.3	13	2.491	1.298
2	0	4.3	10.7	1.214	0
2	-9.97E-2				
		3.8	10.2	1.550	-1.015
2	-.291	3.6	6.4	6.266	-1.836
2	-.337	2.4	3.6	6.227	-1.190
2	-.404	1.2	1.1	6.446	-.432

ITERATION 3 F= 2.232
 COEFFICIENT DE SEC.DU CERCLE: F FINAL= 2.232

Mancha no	C'	(P-P) ad	B	α	U	W
1	3	0,419	1	6,61	0	2,7
2	3	0,419	2	0,876	0	9,31
3	3	0,419	2	0,576	1,1	8,07
4	3	0,419	2	0,423	2,3	12,6
5	3	0,419	2	0,406	2,9	12,5
6	3	0,419	2	0,265	3,3	11,43
7	3	0,419	2	0,197	3,8	9,87
8	3	0,419	2	0	3,5	7,9
9	3	0,419	2	-0,148	3,2	6,4
10	3	0,419	2	-0,245	2	3,9
11	3	0,419	2	-0,291	1,2	1,35



F INITIAL= 2

Cerde C₂

LARGEUR	ALPHA	PRESS.	POIDS	NUMERATEUR	DENOMINATEUR
1	.611	0	2.7	4.439	1.549
2	.876	0	9.31	12.506	7.152
2	.576	1.1	8.07	8.974	4.396
2	.423	2.3	12.6	9.532	5.172
2	.406	2.9	12.5	8.925	4.937
2	.245	3.3	11.43	7.959	2.772
2	.197	3.8	9.87	6.845	1.932
2	0	3.5	7.9	6.401	0
2	-.148	3.2	6.4	6.275	-.944
2	-.245	2	3.9	6.501	-.946
2	-.291	1.2	1.35	6.188	-.387

ITERATION 1 F= 3.298

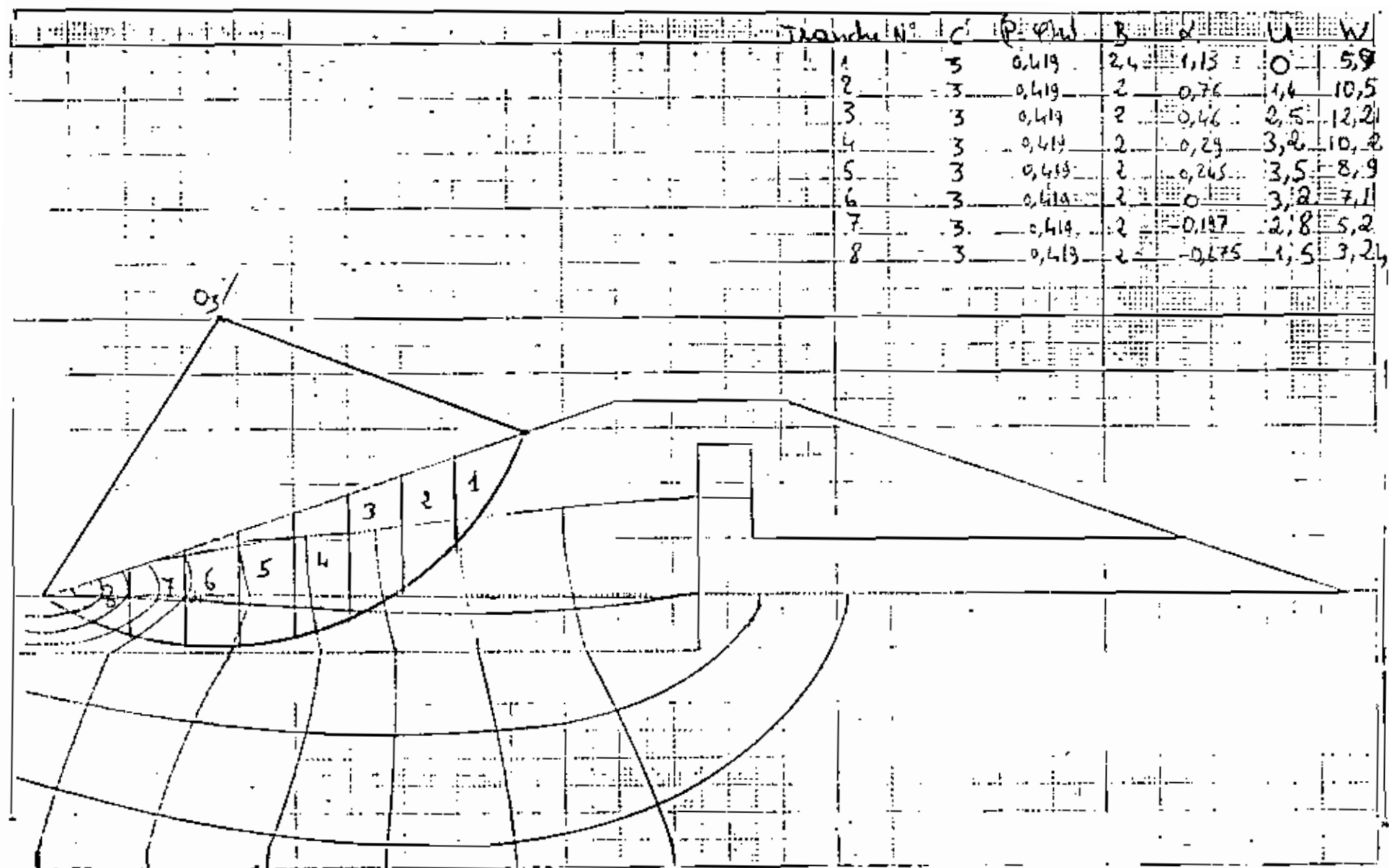
1	.611	0	2.7	4.687	1.549
2	.876	0	9.31	13.638	7.152
2	.576	1.1	8.07	9.444	4.396
2	.423	2.3	12.6	9.886	5.172
2	.406	2.9	12.5	9.242	4.937
2	.245	3.3	11.43	8.128	2.772
2	.197	3.8	9.87	6.962	1.932
2	0	3.5	7.9	6.401	0
2	-.148	3.2	6.4	6.191	-.944
2	-.245	2	3.9	6.353	-.946
2	-.291	1.2	1.35	6.019	-.387

ITERATION 2 F= 3.392

1	.611	0	2.7	4.699	1.549
2	.876	0	9.31	13.691	7.152
2	.576	1.1	8.07	9.465	4.396
2	.423	2.3	12.6	9.902	5.172
2	.406	2.9	12.5	9.257	4.937
2	.245	3.3	11.43	8.135	2.772
2	.197	3.8	9.87	6.967	1.932
2	0	3.5	7.9	6.401	0
2	-.148	3.2	6.4	6.187	-.944
2	-.245	2	3.9	6.347	-.946
2	-.291	1.2	1.35	6.012	-.387

ITERATION 3 F= 3.397

COEFFICIENT DE SEC. DU CERCLE: F FINAL= 3.397



Cercle C3

F INITIAL= 2

LARGEUR	ALPHA	PRESS.	POIDS	NUMERATEUR	DENOMINATEUR
2.4	1.13	0	5.9	15.648	5.336
2	.76	1.4	10.5	10.737	7.234
2	.46	2.5	12.21	9.258	5.421
2	.29	3.2	10.2	7.527	2.917
2	.245	3.5	8.9	6.685	2.159
2	0	3.2	7.1	6.312	0
2	-.197	2.8	5.2	6.213	-1.018
2	-.675	1.5	3.24	9.519	-2.025

ITERATION 1 F= 3.591

2.4	1.13	0	5.9	18.239	5.336
2	.76	1.4	10.5	11.637	7.234
2	.46	2.5	12.21	9.685	5.421
2	.29	3.2	10.2	7.741	2.917
2	.245	3.5	8.9	6.845	2.159
2	0	3.2	7.1	6.312	0
2	-.197	2.8	5.2	6.087	-1.018
2	-.675	1.5	3.24	8.684	-2.025

ITERATION 2 F= 3.757

2.4	1.13	0	5.9	18.408	5.336
2	.76	1.4	10.5	11.692	7.234
2	.46	2.5	12.21	9.709	5.421
2	.29	3.2	10.2	7.753	2.917
2	.245	3.5	8.9	6.854	2.159
2	0	3.2	7.1	6.312	0
2	-.197	2.8	5.2	6.081	-1.018
2	-.675	1.5	3.24	8.642	-2.025

ITERATION 3 F= 3.768

COEFFICIENT DE SEC.DU CERCLE: F FINAL= 3.768