

MINISTÈRE DE L'INDUSTRIE ET DE LA RECHERCHE

BUREAU DE RECHERCHES GÉOLOGIQUES ET MINIÈRES

SERVICE GÉOLOGIQUE NATIONAL

B.P. 6009 – 45018 Orléans Cédex – Tél.: (38) 63.00.12

**EXEMPLE D'ÉTUDE DU DRAINAGE
D'UNE MINE À CIEL OUVERT**

par

B. FEUGA et R. PASQUET



**Département géologie de l'aménagement
Géotechnique**

B.P. 6009 – 45018 Orléans Cédex – Tél.: (38) 63.00.12

75 SGN 428 AME

R E S U M E

Dans le but d'entreprendre une première étude du drainage d'une mine à ciel ouvert, il faut d'abord approfondir la connaissance du site, puis réunir tous les paramètres nécessaires pour simuler le drainage à l'aide d'un modèle mathématique.

Un site minier se caractérise par sa situation topographique et climatique, par sa géologie, par les données hydrologiques (régime des précipitations, eaux de surface et de profondeur avec leurs relations : infiltration, écoulement,...) et par la disposition et l'état structural des formations géologiques qui composent le site. Pour cet exemple, l'analyse structurale consiste en un relevé, par stations sur le terrain, d'un nombre important de paramètres permettant des analyses statistiques de la structure, grâce à un traitement informatique de ces paramètres.

Connaissant la plupart des caractéristiques importantes du site, il devient possible de construire un modèle en introduisant quelques hypothèses simplificatrices : il faut limiter le massif et imposer des conditions sur ces limites, estimer par différentes méthodes les perméabilités des roches intéressées, l'anisotropie de la perméabilité, puis calculer les débits d'apport et les débits d'exhaure.

Le modèle construit, il faut vérifier qu'il correspond bien à la réalité : c'est l'objet du calage. Ensuite, il est possible, grâce à ce modèle, d'étudier rapidement toutes les solutions de drainage désirées et de comparer les résultats obtenus afin de fixer le choix sur une solution.

o
o o
o

3.3.4 - L'anisotropie de la perméabilité	10
3.3.5 - Les débits	10
3.3.6 - Conclusion	11
3.4 - LE CALAGE DU MODELE	12
3.5 - ETUDE DES DIFFERENTE SOLUTIONS DE DRAINAGE	13
4 - CONCLUSION	18

Liste des annexes

Annexe 1 : Calcul du coefficient de drainage d'une pente.

Programme CODRAI

1 - INTRODUCTION

Le présent rapport décrit à titre d'exemple une étude d'avant-projet de drainage d'une mine à ciel ouvert. Cette étude s'est déroulée en plusieurs phases : campagne géologique, hydrologique, hydrogéologique ; relevés hydrostructuraux ; étude de la fracturation, et enfin utilisation de programmes de calcul sur ordinateur pour simuler l'effet des diverses solutions de drainage envisagées et déterminer pour chacune d'elles le coefficient de drainage. Les résultats obtenus ont permis d'orienter le choix du dispositif de drainage.

2 - CONNAISSANCE DU SITE

2.1 - PRELIMINAIRE

L'étude du drainage d'une mine s'effectue à partir de données quantitatives. Le degré de précision des résultats obtenus sera fonction du degré de connaissance du site. Aussi est-il important dans les phases préliminaires de l'étude, d'acquérir des données sur le plus grand nombre possible de paramètres pouvant intervenir dans les phénomènes étudiés.

2.2 - SITUATION TOPOGRAPHIQUE

La mine se situe dans une petite vallée encaissée parcourue par un ruisseau. A son stade final, elle aura par rapport au fond de la vallée une profondeur de 300 m. La cote actuelle du sol est d'environ 650 m au-dessus du niveau de la mer, la superficie du bassin versant de la vallée jusqu'à la mine d'environ 5 km² et la surface en plan de la fosse définitive sera de 1,350 km².

Des galeries de reconnaissance sont creusées à différents niveaux du massif minéralisé.

2.3 - SITUATION CLIMATIQUE

Le climat de la région, froid, un peu humide, a deux saisons bien marquées : un été court et un hiver long assez rigoureux avec 5 à 6 mois de neige.

2.4 - SITUATION GEOLOGIQUE

Des sédiments dévoniens en plis monoclinaux de grand rayon de courbure sont percés par un corps intrusif de porphyre. A partir de ce "plug" de porphyres s'est développée une zone d'altération des sédiments avec fracturation, métamorphisme et circulation de fluides hydrothermaux donnant lieu à la formation d'un gisement de type "porphyry copper". Le minerai de cuivre s'est formé par concentration à partir des roches intrusives profondes, vers l'apex du corps intrusif et dans les sédiments environnants. Les circulations hydrothermales ont concentré le minerai en un gisement stratiforme s'insérant en concordance dans la série sédimentaire, et en gisements de cuivre dispersé. Ces derniers ont une structure de "Stockwerk". La mine à ciel ouvert exploite le gisement de "porphyry copper" distribué autour de l'apex du corps intrusif.

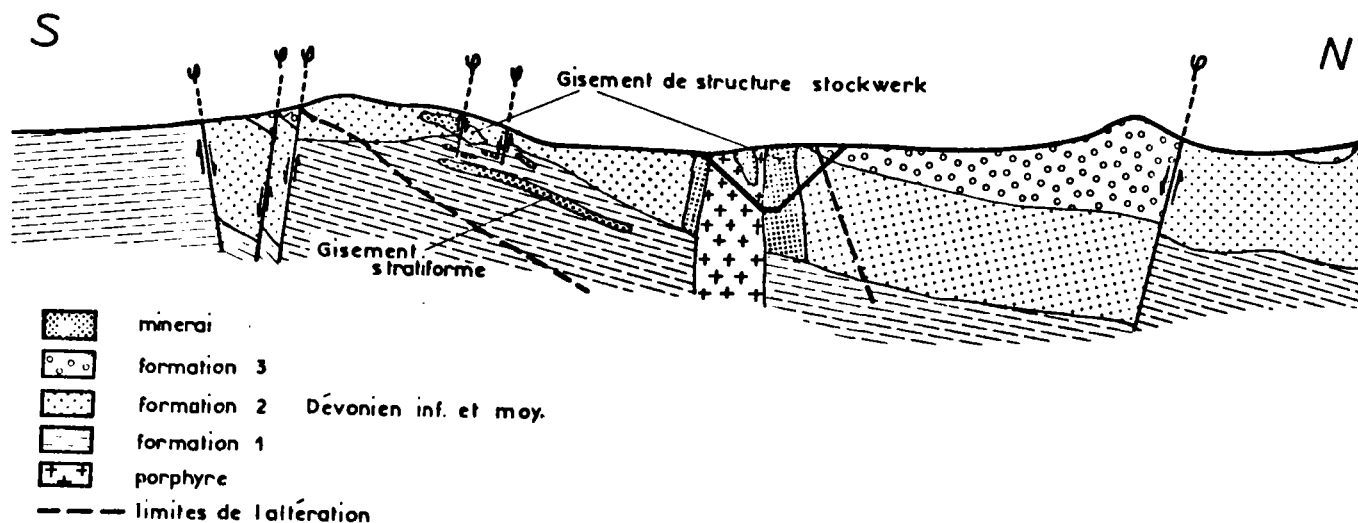


Fig. 1 - Coupe géologique simplifiée

2.5 - ETUDES HYDROLOGIQUES

2.5.1 - Définition des problèmes

L'étude du drainage de la fosse doit prendre en considération :

- les eaux de précipitation qui ruissellent vers le centre de la fosse ;
- les eaux d'infiltration emmagasinées au sein de la masse rocheuse et formant une nappe phréatique.

Des études préliminaires ont consisté à déterminer à partir d'enregistrements portant sur plusieurs années, le régime des précipitations, du ruissellement, de l'infiltration, la position et les circulations de l'eau dans la masse rocheuse.

2.5.1.1 - Les précipitations sont quantifiées par les relevés pluviométriques qui donnent la lame d'eau tombée.

2.5.1.2 - Le ruissellement et les circulations d'eau à la surface sont localisés avec précision. Des stations de jaugeage permettent la mesure des débits en fonction du temps. Il faut s'attacher à localiser les zones où l'eau ruisselée s'infiltré, en vue d'interventions limitant cette infiltration.

2.5.1.3 - Les variations de l'infiltration en fonction du temps constituent une donnée importante pour calculer les débits alimentant la nappe phréatique. La répartition dans le temps de l'infiltration est totalement différente de celle de la pluie, car, à cause du climat froid, les précipitations sont stockées en hiver sous forme de neige qui va fondre et s'infiltrer rapidement à la fin de l'hiver.

Les eaux de surface s'infiltrent à la faveur des diaclases et des fissures de la masse rocheuse. A partir d'une certaine profondeur, elles constituent une nappe généralisée qui imbibe la formation.

2.5.1.4 - La position de la nappe sera connue grâce à un réseau de piézomètres s'étendant sur tout le bassin versant de surface, et même au-delà afin de connaître les limites du bassin versant hydrogéologique.

Des cartes piézométriques synthétisent les résultats des mesures de niveau.

Il est important également de connaître les directions d'écoulement de l'eau souterraine. Cela permet de préciser les travaux de drainage à réaliser.

Les techniques de traçage utilisées dans ce but, sont diverses :

- physico-chimie des eaux : résistivité, température, dureté ;
- colorants (composé disodique de la fluorescéine) ou marqueurs radioactifs.

Des mesures de débits sont également effectuées au micromoulinet dans les galeries de reconnaissance. Elles permettent une estimation des perméabilités du massif rocheux.

2.5.2 - Conclusion

Ces études nécessitent au départ l'installation d'appareils de mesure et des relevés fréquents sur une période longue (plusieurs années), afin de pouvoir effectuer une étude statistique et déterminer des valeurs caractéristiques.

Ces travaux sont préalables aux études de drainage.

2.6 - ETUDES STRUCTURALES

2.6.1 - But de l'étude

Les propriétés mécaniques de la masse rocheuse et l'hydrologie sont fortement influencées par les propriétés structurales du massif. En particulier, les mécanismes de rupture et les perméabilités sont directement associés à la géologie structurale. C'est pour ces raisons qu'une étude structurale précède toujours les études de stabilité et de drainage.

L'étude structurale a pour but de mettre en évidence les grandes familles de fractures, leur nature, leur orientation, et de déterminer certains paramètres utiles pour l'étude du drainage.

Les directions qui correspondent aux fractures les plus importantes en nombre et en dimension seront mises en évidence par une méthode d'analyse statistique sur ordinateur.

2.6.2 - Méthode de l'étude structurale

Sur le site, le géologue choisit un certain nombre de stations de relevés

réparties dans des secteurs homogènes du point de vue de la fracturation. Le nombre et l'importance des stations sont fixés de façon à obtenir des résultats statistiques suffisamment représentatifs du massif.

Dans l'exemple de la mine à ciel ouvert, les stations furent réparties en surface et dans les galeries de reconnaissance, à différents niveaux.

- * Les longueurs des stations varient de 20 à 60 m.
- * Ne sont relevées que les fractures de longueur observée supérieure à 1 m.
- * Pour chaque fracture le géologue relève les paramètres suivants :
 - Position ;
 - Direction et pendage
 - Type de roche encaissante ;
 - Type de fracture ;
 - Continuité "C" (= rapport de la longueur de la fracture au périmètre de la galerie ou à une longueur de référence égale 10 m en surface);
 - Epaisseur "E" et nature du remplissage ;
 - Ouverture libre "O" ;
 - Présence d'eau "H" ;
 - Ecartement entre fracture de même type "E_C" ;
 - Terminaison ;
 - Rugosité.

2.6.3 - Analyse statistique de la structure

2.6.3.1 - *Les comptages statistiques*

Les paramètres précédents portés sur un bordereau approprié seront transcrits sur cartes perforées et traités par ordinateur à l'aide du programme STAF. Les plans de fractures représentés par leur rôle sur canevas de Schmidt (fig 2) font l'objet d'un comptage statistique dont les résultats sont automatiquement portés en % sur le canevas (fig. 3). Les courbes d'isodensité sont ensuite tracées à la main (fig. 4).

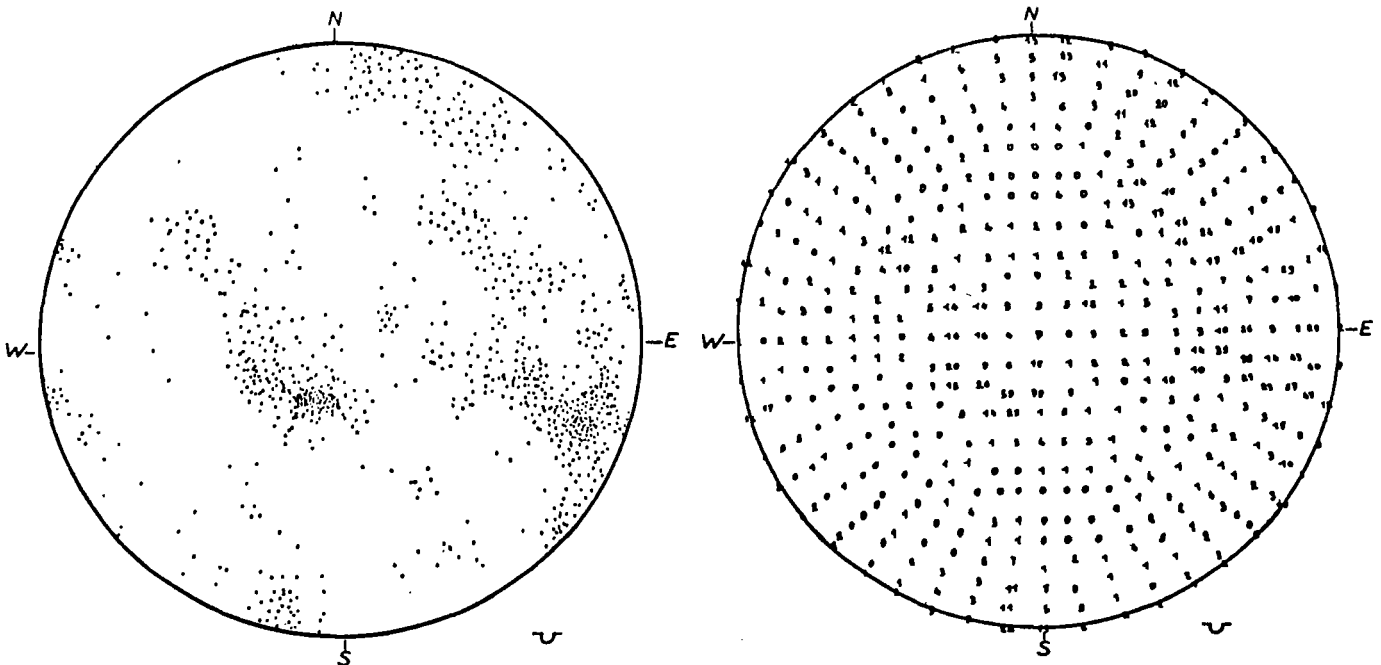


Fig. 2 : Projection stéréographique des plans relevés (canevas de Schmidt)

Fig. 3 : Résultats du comptage (densité en pour mille)

2.6.3.2 - Analyse hydrostructurale : les pondérations

D'autres comptages statistiques sont effectués avec les pondérations tenant compte des paramètres suivants :

- Pondération 1 Poids = 1 + (Cx E) ; met en valeur les fractures épaisses et de grande extension.
- Pondération 2 Poids = 1 + O + H ; sélectionne les fractures hydrauliquement efficaces.
- Pondération 3 Poids = Ec (écartement).

Les valeurs des paramètres utilisés dans les pondérations sont indiquées sur la figure 5.

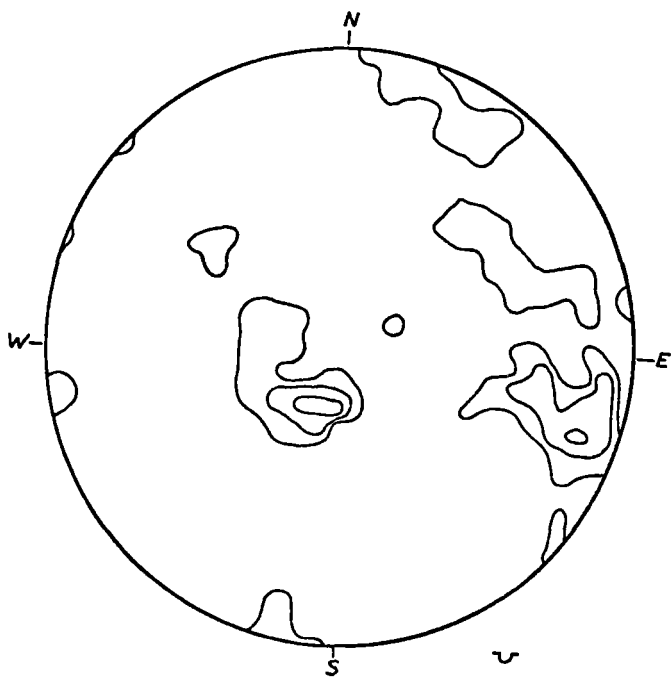


Fig. 4 : Courbes d'isodensité (canevas de Schmidt)

Continuité	0		0,15		0,45		0,95	
C		1		3		6		9

Épaisseur en mm	0		1		4		15	
E	1	2		3		6		9

Ouverture libre moyenne en mm	0		1		2			
O	1	3		6		9		

Présence d'eau	Estimation	Pas d'eau	Faible suintement	Écoulement < 6 l/min.	Écoulement > 6 l/min.
	Code	0	1	2	3
H		1	6	12	18

Écartement en m	0	0,1	0,3	0,7	2,5	5,5	9,5	
Ec	1	25	15	10	6	4	2	1

Fig. 5 : Tableau des paramètres de pondération

2.6.4 - Résultats et conclusions

Pour la commodité de l'interprétation des résultats, trois classes de fractures ont été distinguées :

- les fractures subverticales $90^\circ \geq \alpha > 60^\circ$
- les fractures obliques $60^\circ \geq \alpha > 30^\circ$
- les fractures subhorizontales $30^\circ \geq \alpha \geq 0^\circ$

Les fractures subverticales apparaissent avec un poids important. Elles correspondent à des fractures de tension.

Les fractures obliques paraissent dispersées d'une station à l'autre et d'un poids peu important. Il semble que certaines fractures obliques correspondent à des variations de pendage des fractures subverticales.

Les fractures subhorizontales les plus fréquentes correspondent aux plans de stratification. Elles ont un poids assez important, bien que la direction horizontale des stations de relevés diminue leur fréquence par rapport aux autres fractures.

On peut retenir de l'exemple étudié que :

- le gisement est lié à une intrusion dans une série sédimentaire faiblement pentue ;
- il n'y a pas de grandes fractures dans la zone de la fosse ;
- les fractures sont de natures différentes : diaclases, veines et filonnets ;
- les fractures les plus fréquentes sont distribuées autour des directions suivantes :

Ng 163°E	75°W
Ng 71°E	82°S
Ng 153°E	29°W

Elles sont représentées sur la fig. 6.

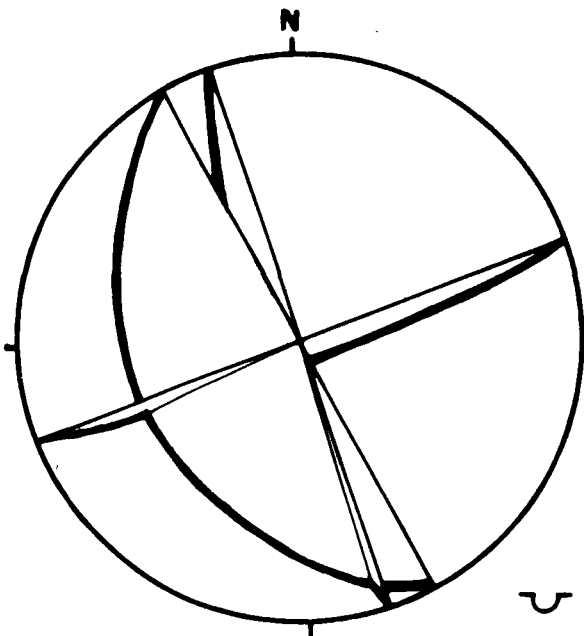


Fig. 6 - Projection stéréographique
des trois plans principaux de fracture

- En surface la structure est plus dispersée.

L'étude structurale réalisée est orientée en fonction du but poursuivi. Le problème est clairement posé au départ : mettre en évidence les familles de fractures qui jouent un rôle important sur l'hydraulique du massif. L'organisation du relevé des fractures sur bordereaux directement transformables en cartes perforées lues par l'ordinateur et traitées par un programme établi spécifiquement pour ce problème, apporte une grande rapidité d'action et diminue la part du subjectif dans l'interprétation des relevés. Toutefois, la condition nécessaire à une telle étude est d'avoir une population représentative ; ceci impose un grand nombre de relevés structuraux.

2.7 - ETUDE DE LA FRACTURATION

En vue d'estimer les valeurs relatives des perméabilités du massif, une étude de la fracturation à partir des carottes de sondages de reconnaissance a été réalisée, à l'aide d'un programme de traitement statistique sur ordinateur. Cette étude a mis en évidence le fait que la densité de fracturation (nombre de fractures par unité de longueur) ne diminuait presque pas avec la profondeur, et qu'elle était fonction essentiellement du type de roche.

3 - ETUDE SUR MODELE DU DRAINAGE DE LA MINE

3.1 - INTRODUCTION

Compte tenu des données fournies par les études préliminaires dont les résultats ont été exposés succinctement au chapitre précédent, il est possible d'envisager l'étude du drainage de la mine sur un modèle. Les résultats de l'étude sur modèle serviront à comparer l'efficacité des différents systèmes de drainage envisagés. L'étude sur modèle se fait en plusieurs phases : synthèse des données nécessaires au modèle, calage du modèle et enfin étude et comparaison des différentes solutions de drainage.

3.2 - PRINCIPE DE L'ETUDE

3.2.1 - Simulation des différentes variantes de drainage

Pour chacune des variantes de drainage étudiées a été déterminée la répartition du potentiel hydrodynamique autour de la fosse. La connaissance de cette répartition a permis d'une part, de calculer les débits à évacuer et d'autre part, d'estimer l'importance relative et la direction des forces d'écoulement s'exerçant sur les bords de la fosse. La répartition du potentiel est déterminée à l'aide d'un programme de calcul sur ordinateur (modèle mathématique).

3.2.2 - Le modèle utilisé

Les calculs ont été effectués par la méthode des différences finies à l'aide du programme CAID (voir rapport 73 SGN 150 AME) exploité sur un ordinateur IBM 370-135. Ce programme sert à simuler les écoulements permanents plans ou axisymétriques en milieu poreux avec présence d'une surface libre.

Dans le cas du drainage d'une fosse, le problème peut être considéré comme axisymétrique. Le calcul est réalisé dans un demi plan passant par l'axe de symétrie du système. Le maillage est rectangulaire et les valeurs du potentiel sont calculées au centre de chaque maille.

3.2.3 - Hypothèses simplificatrices

Le régime hydraulique est supposé permanent et la géométrie de la fosse assimilée à une surface de révolution à axe vertical. La structure géologique présente approximativement une symétrie de révolution (fig. 7) dont l'axe sera confondu avec celui de la fosse. L'analyse de la fracturation a montré que celle-ci était liée au type de roche ; elle présente donc comme les roches une répartition radiale. La perméabilité verticale est liée aux deux familles de fractures subverticales principales et la perméabilité horizontale globale est liée aux trois principales familles de fractures. Les débits d'exhaure sont répartis radialement autour de l'axe de la fosse, de même que les débits d'apport par infiltration. La piézométrie est ramenée à celle d'une nappe à écoulement radial.

3.3 - SYNTHÈSE DES DONNÉES NÉCESSAIRES AU MODÈLE

Le modèle utilisé prend en compte : la géométrie de la fosse, les conditions aux limites, les perméabilités et les débits.

3.3.1 - La géométrie du modèle

Elle correspond à un profil de fosse moyen déterminé en faisant la moyenne de quatre profils perpendiculaires. L'axe du modèle coïncide avec l'axe de la fosse. Le rayon du massif considéré est de 1 300 mètres.

3.3.2 - Conditions aux limites (fig. 7)

La limite latérale du domaine a été considérée comme étant à potentiel imposé égal à la cote de la surface libre de référence en ce point. L'axe du modèle est une limite imperméable (à cause de la symétrie radiale de révolution) de même que la limite inférieure, car la formation géologique 1 est considérée comme imperméable.

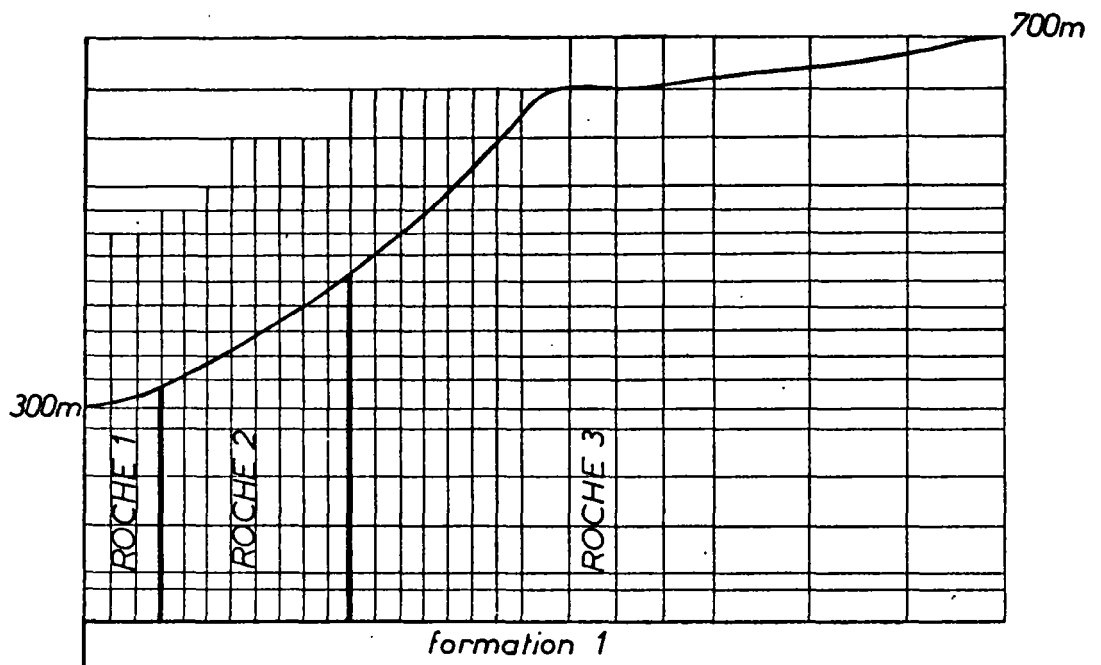


Fig. 7 - Disposition du maillage par rapport au massif

3.3.3 - Les perméabilités sont déterminées par la synthèse de trois méthodes de calcul différentes.

3.3.3.1 - *Première estimation de la perméabilité*

Sur le terrain, au vu de la fracturation, il est possible de fixer un ordre de grandeur de la perméabilité.

3.3.3.2 - *Deuxième estimation de la perméabilité*

A partir de l'analyse de la fracturation sur les carottes de sondage et sur les relevés de l'analyse structurale.

La méthode de calcul est la suivante :

-1- Estimation de l'ouverture "e" des fissures à partir des observations sur le terrain.

-2- Estimation de la conductivité hydraulique "kf" d'une fissure.

$$K_f = \frac{\kappa \cdot g \cdot e^2}{12 \cdot \nu \cdot C}$$

κ = degré de séparation de la fracture

ν = viscosité cinématique

C = coefficient de rugosité.

-3- Estimation de la perméabilité globale du massif.

La perméabilité équivalente "Ki" du massif pour une famille de fractures est proportionnelle à : la densité de fracturation "df", la conductivité hydraulique "Kfi", l'ouverture de la fissure "ei" et au pourcentage "pi" des fissures de la famille considérée.

$$K_i = df \cdot \pi_i \cdot K_{fi} \cdot e_i$$

La perméabilité globale du massif sera :

$$K = \sum K_i = df \cdot \sum \pi_i \cdot K_{fi} \cdot e_i$$

"pi" est pris égal au poids des fractures d'ouverture "ei" sur le poids total des fractures (le poids est pris égal à la somme des continuités des fractures). "df" est le résultat de l'analyse statistique de la fracturation à l'aide du programme FRACT qui permet l'exploitation des données de sondages et leur mise en forme statistique (fig. 8 et 9) (cf. paragraphe 2-7).

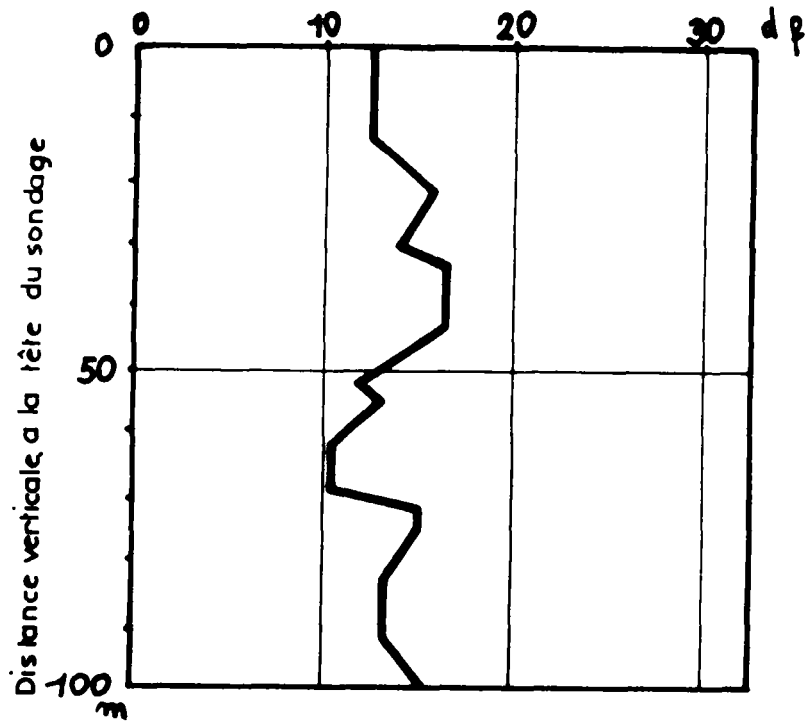


Fig. 8 - Log de densité de fracturation

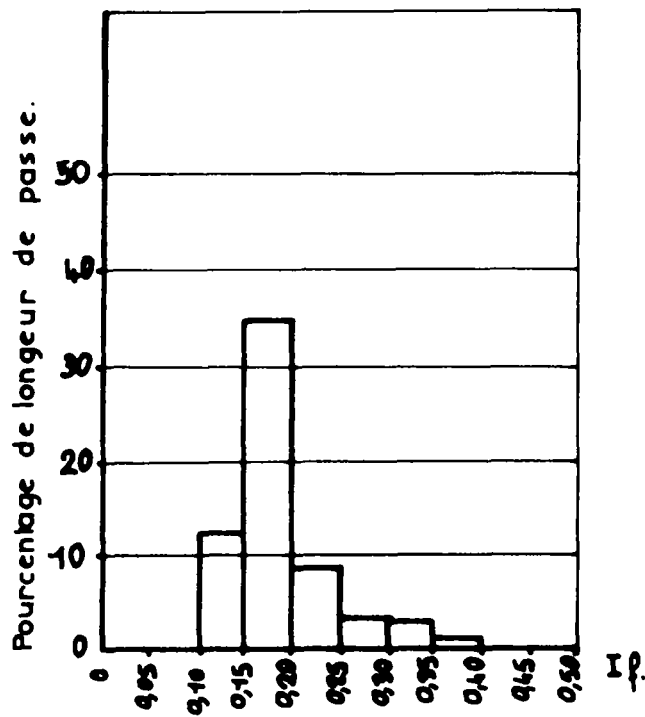


Fig. 9 - Diagramme de répartition de l'indice de fracturation

Seules les valeurs relatives des perméabilités déterminées par cette méthode seront retenues.

3.3.3.3 - Troisième estimation de la perméabilité

Elle est faite à partir des mesures des débits de l'eau drainée par les galeries de reconnaissance.

Le débit "Q" drainé par une galerie circulaire est fonction de la perméabilité "K" du terrain, de la hauteur d'eau au-dessus de la galerie "d" et du rayon "R" de la galerie (fig. 10).

$$Q = \frac{2 \pi k d}{\ln \left(\frac{d + \sqrt{d^2 + R^2}}{R} \right)}$$

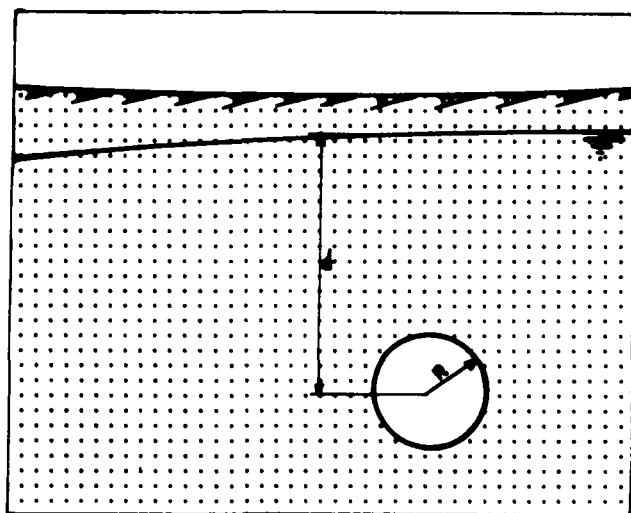


Fig. 10

d'où, en considérant que R est très petit devant d

$$K = Q \cdot \frac{\ln (2d/R)}{2 \cdot \Pi \cdot d}$$

Les valeurs de Q, d, R sont fournies pour chaque type de roche par les études précédentes.

3.3.4 - L'anisotropie de la perméabilité

En l'absence de mesures *in situ* elle est estimée à partir du poids de chacune des principales familles de fracture (pondération 2) corrigée par le facteur multiplicatif $1/\sin \alpha$ (α représente le pendage de la fracture) pour tenir compte du fait que les stations de relevés étaient horizontales.

3.3.5 - Les débits

Il faut considérer les débits entrant et les débits sortant.

Les calculs seront effectués d'une part avec des données de débits entrant moyens calculés sur plusieurs années et d'autre part avec des débits entrant maximaux pris égaux à l'infiltration mensuelle maximale répartie uniformément sur la surface.

Les débits sortant sont les débits d'exhaure des galeries de reconnaissance.

3.3.6 - Conclusion

La synthèse des données disponibles a conduit à retenir des valeurs de perméabilité pour chaque type de roche et un coefficient d'anisotropie de 1. Ces valeurs serviront de base de départ pour le calage du modèle sur un niveau piézométrique de référence. Nous avons des données en main. Il faut s'assurer qu'elles correspondent à la réalité. C'est l'objet du calage.

3.4 - LE CALAGE DU MODELE

Le calage sert à s'assurer que le modèle mis au point représente assez bien la réalité. Les perméabilités sont les données les moins sûres. Aussi, nous modifions par tâtonnement ces valeurs jusqu'à ce que la surface piézométrique calculée coïncide avec la surface piézométrique de référence.

19 passages du modèle ont été nécessaires pour parvenir à ce résultat (fig. 11).

Les valeurs des perméabilités correspondantes sont indiquées dans le tableau de la page suivante (fig. 12).

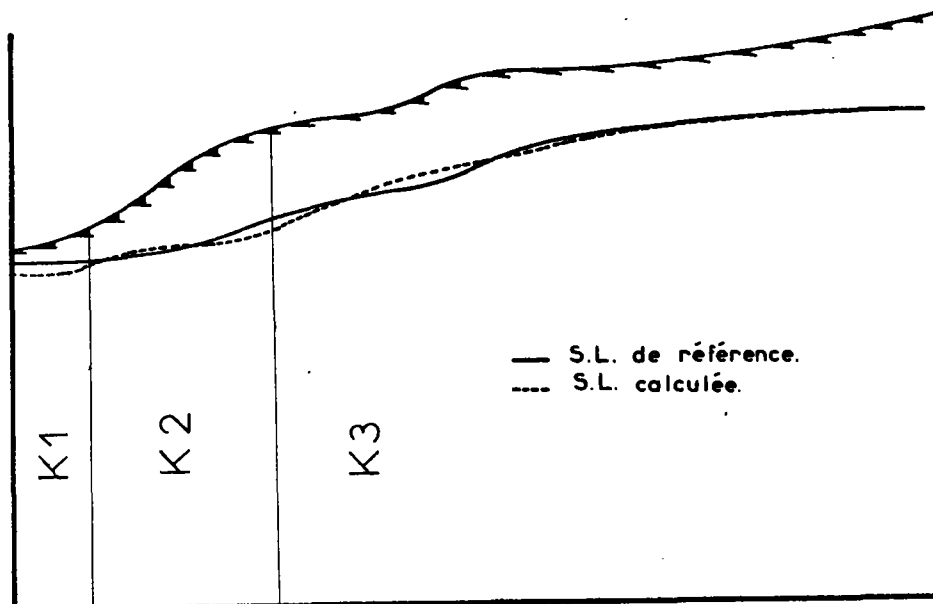


Fig. 11 - Comparaison entre la SL de référence et la SL calculée

	K1	K2	K3
VALEURS INITIALES	$7,13 \cdot 10^{-6}$	$1,74 \cdot 10^{-6}$	$1,31 \cdot 10^{-6}$
VALEURS FINALES	$20 \cdot 10^{-6}$	$2,5 \cdot 10^{-6}$	$0,65 \cdot 10^{-6}$

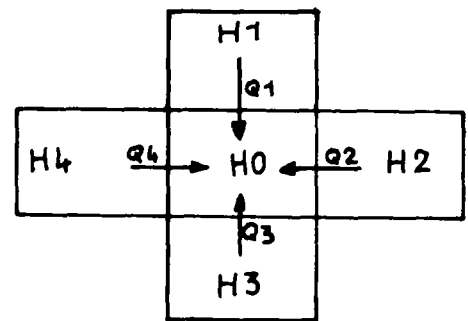
Fig. 12 - Tableau des perméabilités

Les valeurs finales des perméabilités sont retenues pour étudier les différentes solutions de drainage.

3.5 - ETUDE DES DIFFERENTES SOLUTIONS DE DRAINAGE

Pour chaque solution de drainage, le programme calcule en chaque noeud du maillage, le potentiel hydrodynamique. La surface libre est tracée à la main de même que les équipotentielles. Dans chacun des cas (fig. 14 à 20) sont calculés les débits de drainage, les débits à travers les surfaces de suintement et un coefficient de drainage destiné à fournir une estimation chiffrée de l'efficacité du dispositif.

- Calcul des débits de drainage à partir des potentiels hydrodynamiques autour d'une galerie.



$$Q = \sum_i Q_i$$

D'après la loi de DARCY :

$$Q_i = K_i \cdot S_i \cdot \Delta H_i / \Delta L_i$$

- A travers une surface de suintement le calcul du débit est identique.

- Calcul du coefficient de drainage. La zone prise en compte pour le calcul du coefficient de drainage a été délimitée à l'intérieur du talus par deux

segments qui définissent une surface critique de glissement (fig. 13).

La surface en coupe de la zone à drainer est constante :

$$A = \frac{3H^2}{4}$$

La répartition de la pression "p" de l'eau sur ses côtés est déterminée à partir du potentiel H

$$P = (H - Z) \gamma_w \quad (Z = \text{cote})$$

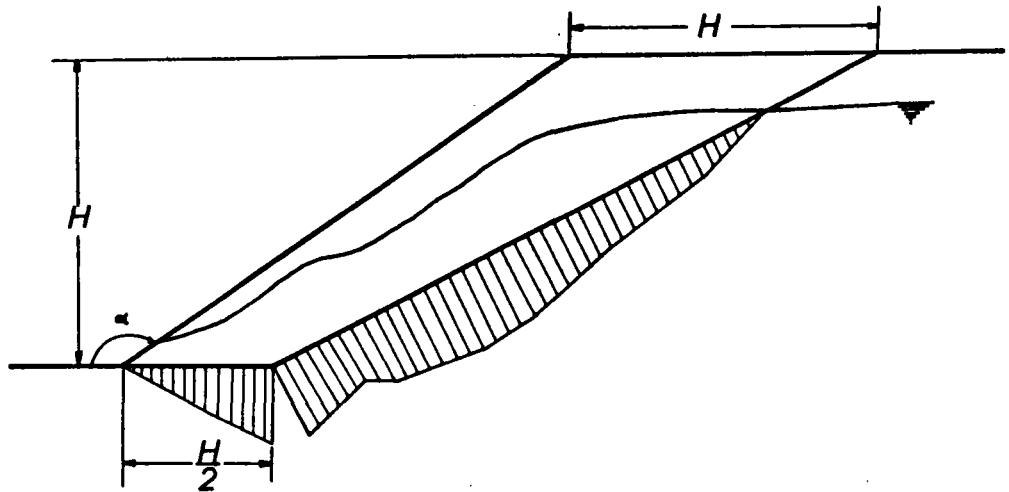


Fig. 13 - Répartition de la pression due à l'eau sur les plans de glissement

Un calcul long et fastidieux, avantageusement réalisé à l'ordinateur par le programme CODRAI dont la notice se trouve en annexe, donne pour chaque cote, la force "Fi" et le point d'application de cette force.

Un coefficient sans dimension

$$f = \frac{\gamma_w A}{|\vec{F}_1 + \vec{F}_2|}$$

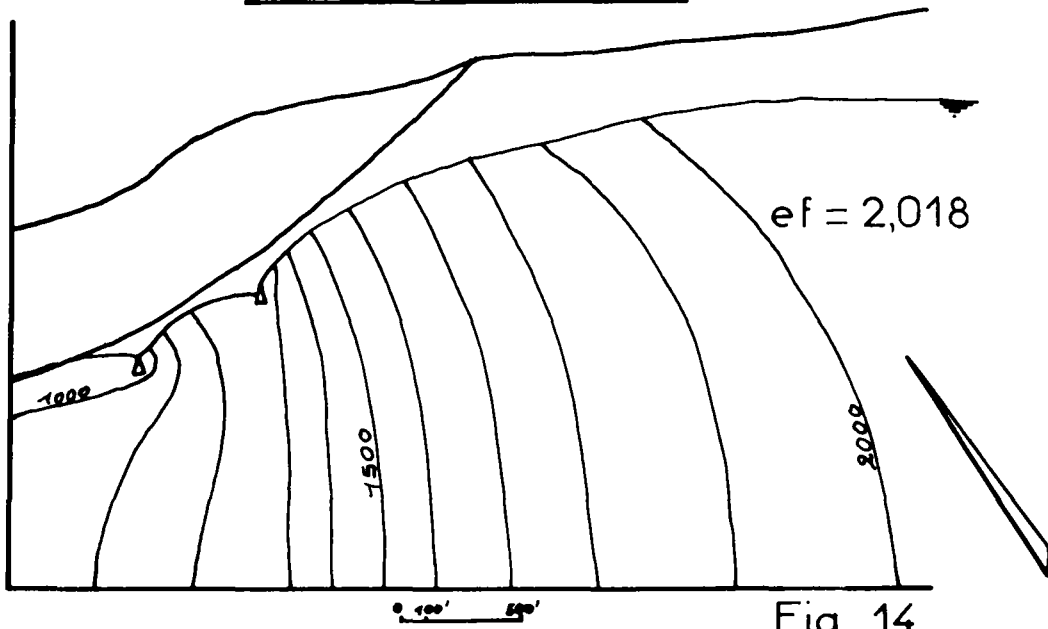
caractérise l'action du drainage dont l'efficacité peut être représentée par $\frac{1}{f} = ef$.

Les dispositifs de drainage étudiés et les résultats obtenus sont représentés sur les figures 14 à 23.

La position de la surface libre, les débits et le coefficient de drainage font partie des principaux éléments permettant de choisir la solution de drainage à adopter.

Du seul point de vue efficacité, remarquons que parmi les solutions étudiées, celle avec trois galeries est la meilleure.

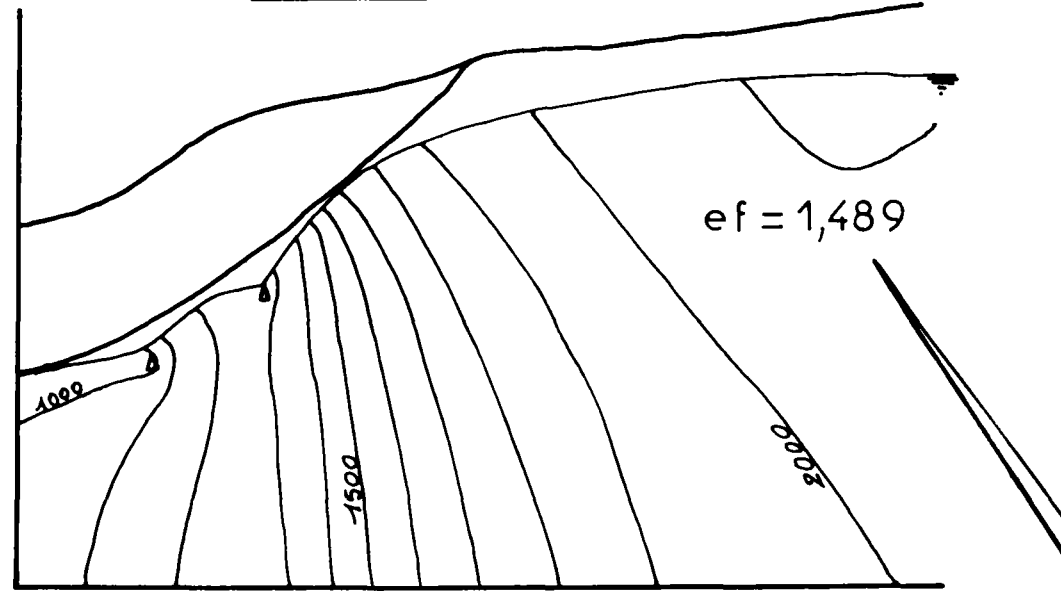
2 drains débit moyen



ef = 2,018

Fig 14

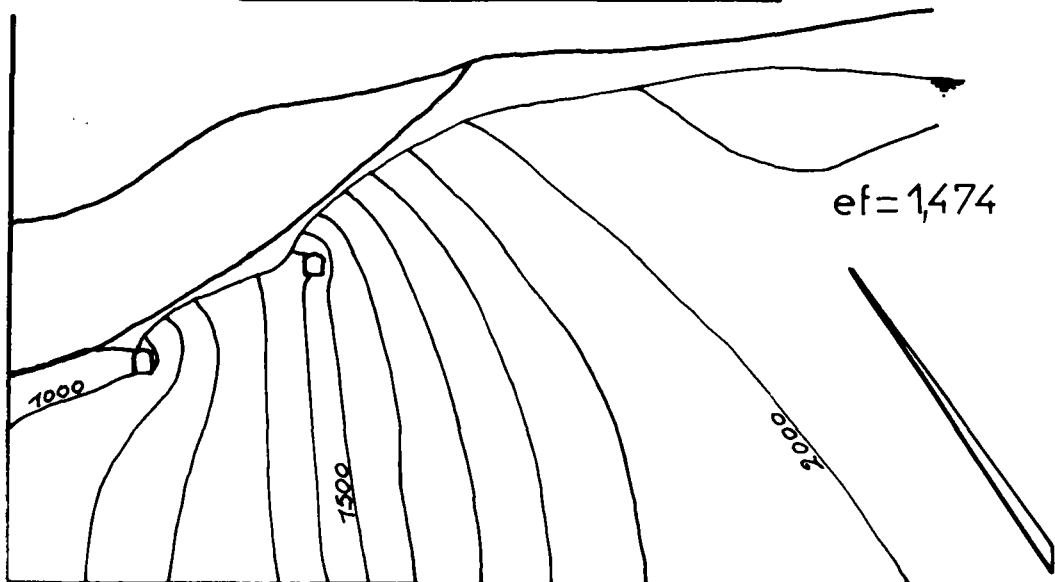
2 drains débit maximum



ef = 1,489

Fig 15

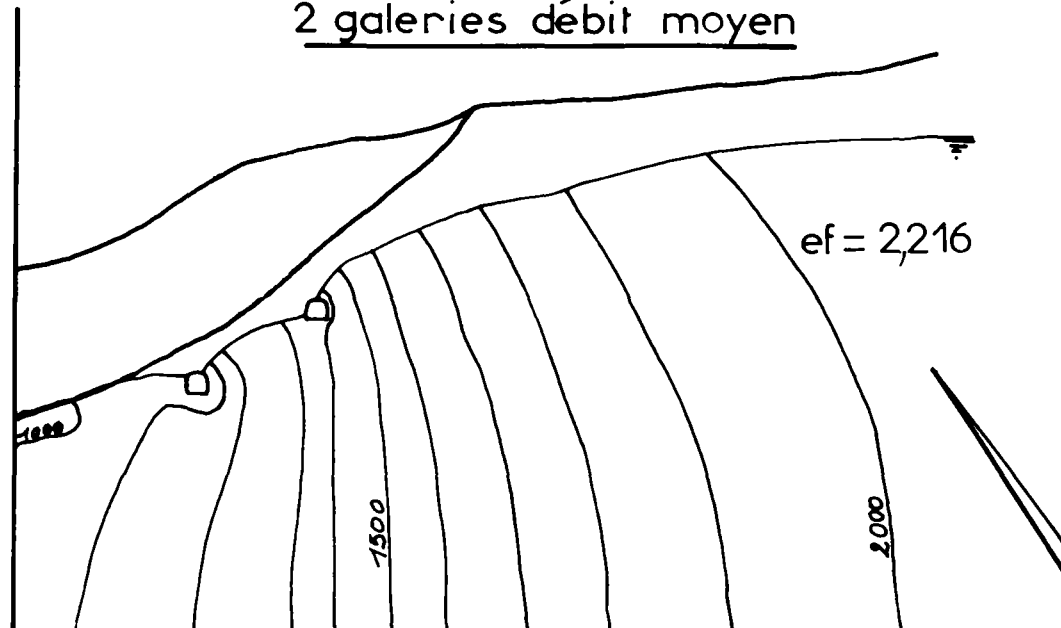
2 galeries débit maximum



ef = 1,474

Fig 16

2 galeries débit moyen



ef = 2,216

Fig 17

3 galeries débit moyen

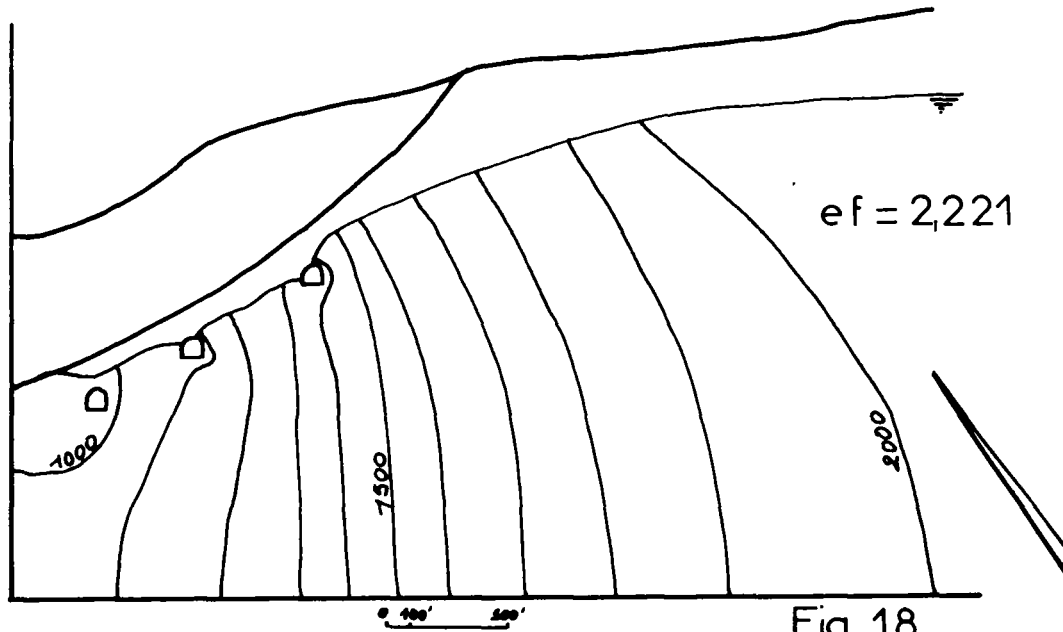


Fig 18

3 galeries débit maximum

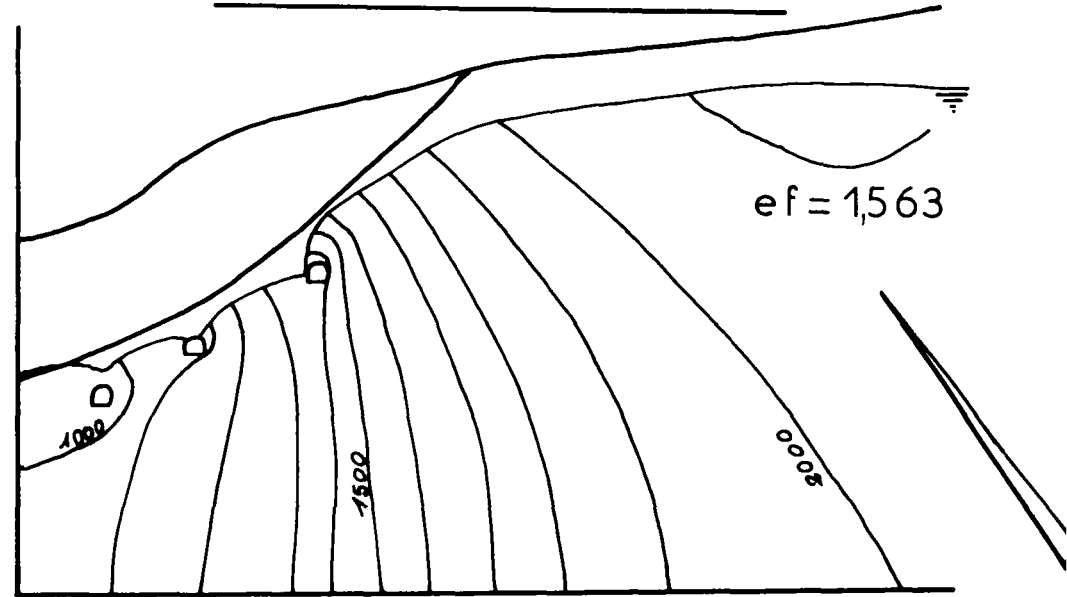


Fig 19

puits débit moyen

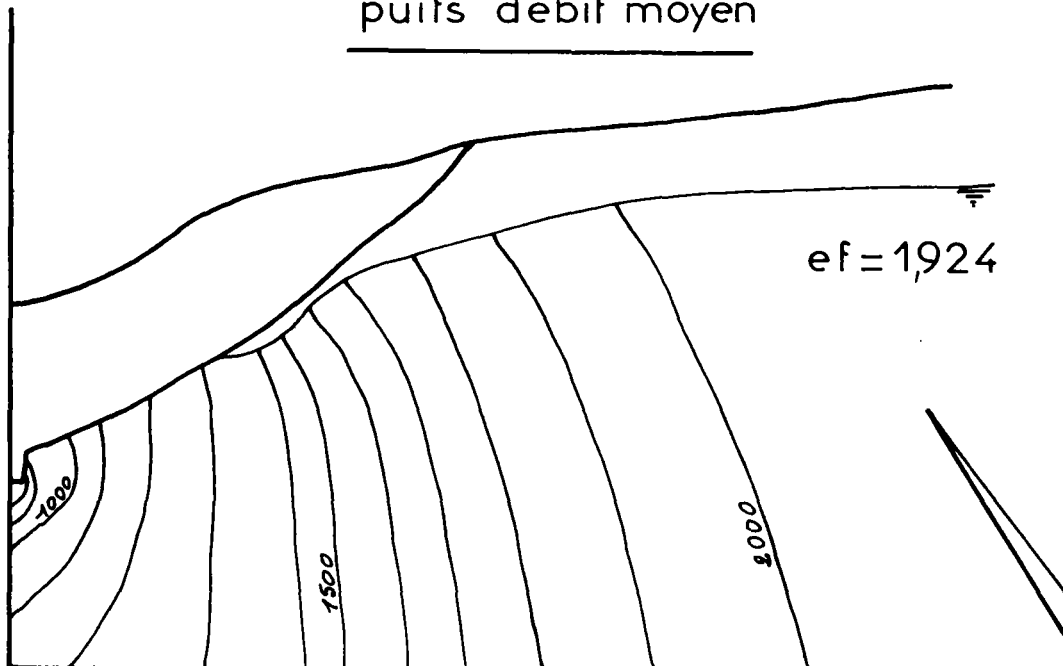


Fig 20

puits avec drain en fond de puits et à mi-pente de la fosse débit maximum

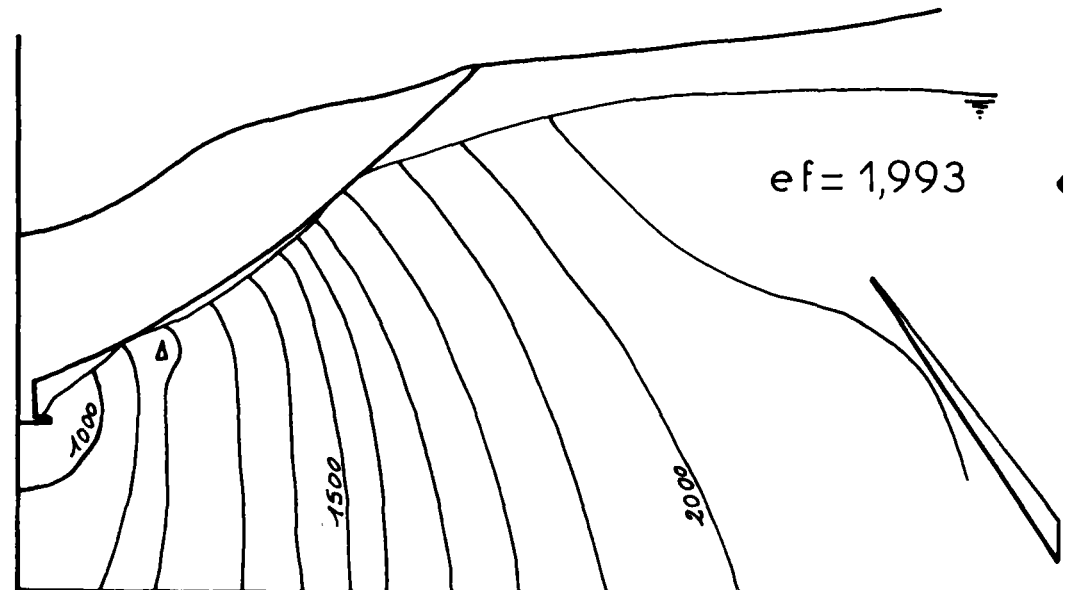


Fig 21

puits avec drain en fond de puits
débit moyen

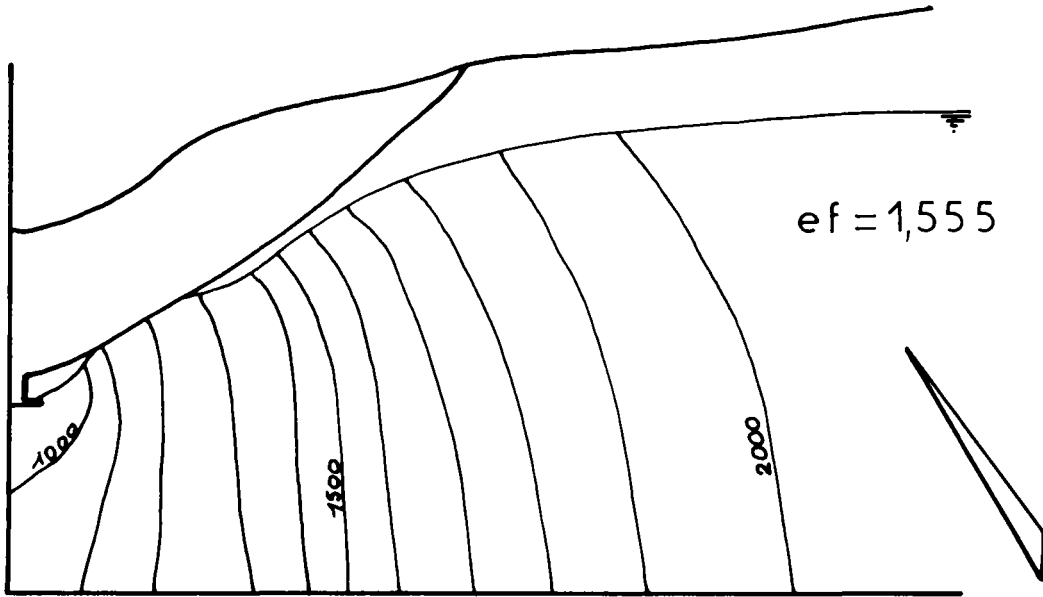


Fig 22

puits avec drain en fond de puits et à
mi-pente de la fosse. débit maximum.
perméabilités divisées par deux.

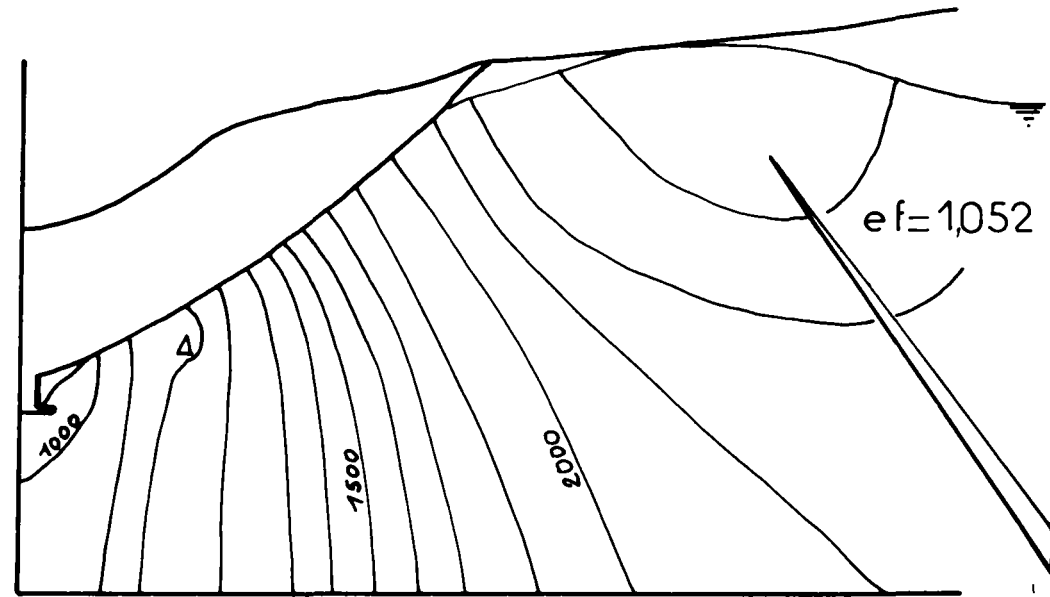


Fig 23

Echelle des forces: 0 10.10³ 30.10³ tonnes

FIGURES 14 à 23 : DISPOSITIFS DE DRAINAGE ET RESULTATS

4 - CONCLUSION

Une telle étude préliminaire ne fournit que des résultats relatifs sur l'efficacité des dispositifs de drainage. Elle atteint tout de même son but : compte tenu des contraintes économiques et techniques, il est possible de choisir une solution de drainage et de diriger les études futures, plus approfondies, vers la solution retenue.

ANNEXE 1

Calcul du coefficient de drainage d'une pente

Programme CODRAI

1 - INTRODUCTION

Le programme CODRAI calcule le coefficient de drainage dans un talus, à partir du réseau d'équipotentiellles. Au cours d'une étude des différentes solutions de drainage, ce coefficient est un élément utile pour comparer leur l'efficacité.

2 - DEFINITION DU COEFFICIENT DE DRAINAGE

Le coefficient de drainage, défini par Louis, à pour but de fournir une estimation de l'efficacité du drainage d'une pente.

Il est établi en prenant en considération une surface de glissement critique, définie sur la figure 1.

La pression de l'eau dans le massif donne lieu à des forces \vec{F}_1 et \vec{F}_2 sur les côtés de cette surface ; la résultante de ces forces est \vec{F} .

Le coefficient de drainage est égal à :

$$f = \frac{\gamma_w A}{F}$$

A étant l'aire délimitée par la surface du sol et la surface de glissement.

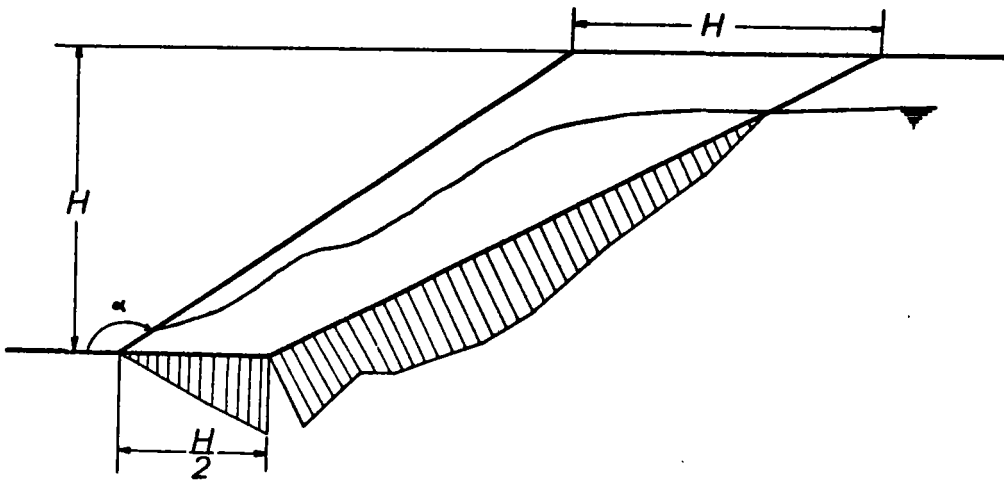


Fig. 1 - Surface de glissement

3 - METHODE DE CALCUL

Quel que soit l'angle "alpha" du talus, la surface "A" est constante.

$$A = \frac{3H^2}{4}$$

A partir du réseau des équipotentiels, la pression sur la surface de glissement est déterminée point par point (cf. fig. 2).

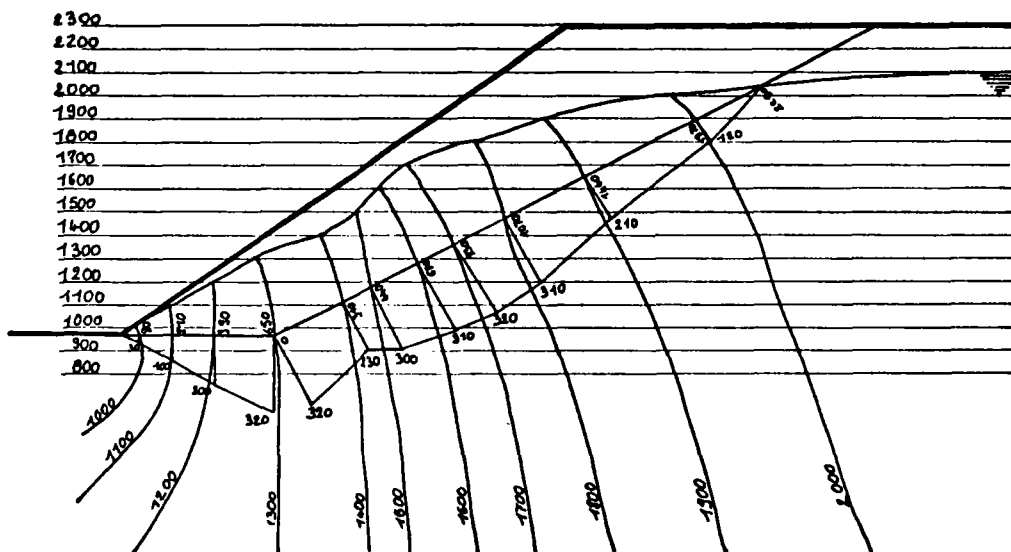


Fig. 2 - Répartition de la pression sur la surface de glissement

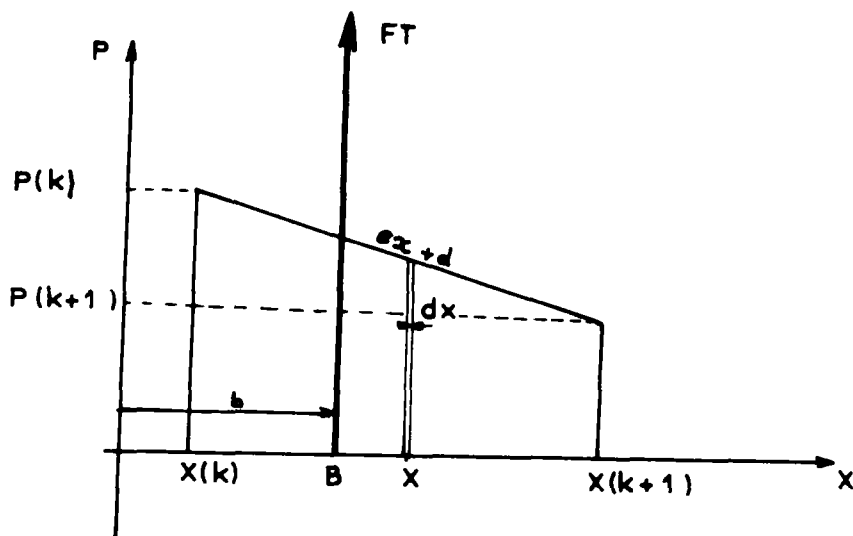


Fig. 3

La force correspondant à la pression exercée entre deux points d'abscisse $X(k)$ et $X(k+1)$ est égale à :

$$F(k) = \int_{X(k)}^{X(k+1)} P \cdot dx$$

La force résultante sur l'ensemble d'un côté de la surface de glissement sera :

$$F = \sum_K F(K)$$

Le point d'application "A" de la force F (K) satisfait à l'équation suivante :

$$\begin{array}{l} m/B \\ \text{forces à gauche} \end{array} = \begin{array}{l} m/B \\ \text{forces à droite} \end{array}$$

Le moment des forces à gauche par rapport à "B" est égal et opposé au moment des forces à droite par rapport à "B", soit :

$$\int_{x(K)}^B P(b-x) dx = \int_B^{x(K+1)} F(b-x) dx$$
$$\int_{x(K)}^B (ex+b)(b-x) cx = \int_B^{x(K+1)} (ex+d)(b-x) dx$$

La résolution de cette équation permet de déterminer le point d'application des forces dues à la pression de l'eau sur chacun des deux côtés de la surface de glissement.

4 - RESULTATS FOURNIS PAR LE PROGRAMME

Le programme fait écrire pour chaque côté de la surface de glissement :

- la force totale
- son point d'application

Pour chaque talus il fait écrire :

- la force résultante (fig. 5) "F"
- le coefficient de drainage "f"

$$f = \frac{\gamma_w A}{F}$$

- et l'efficacité du réseau de drainage.

$$ef = 1/f.$$

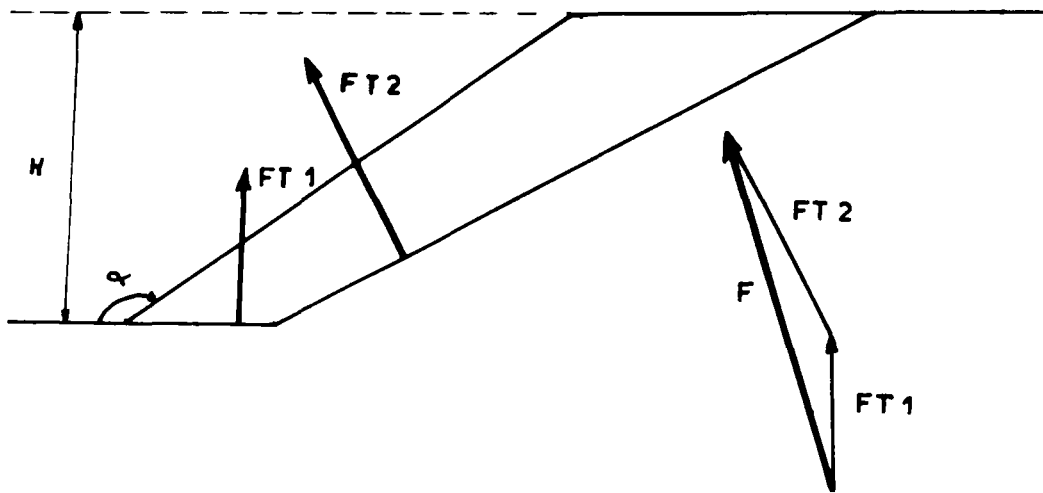


Fig. 4

5 - LES UNITES

Les calculs peuvent être faits en exprimant la pression et les longueurs en mètres ou en pieds (hauteur d'eau dans le cas des pressions).

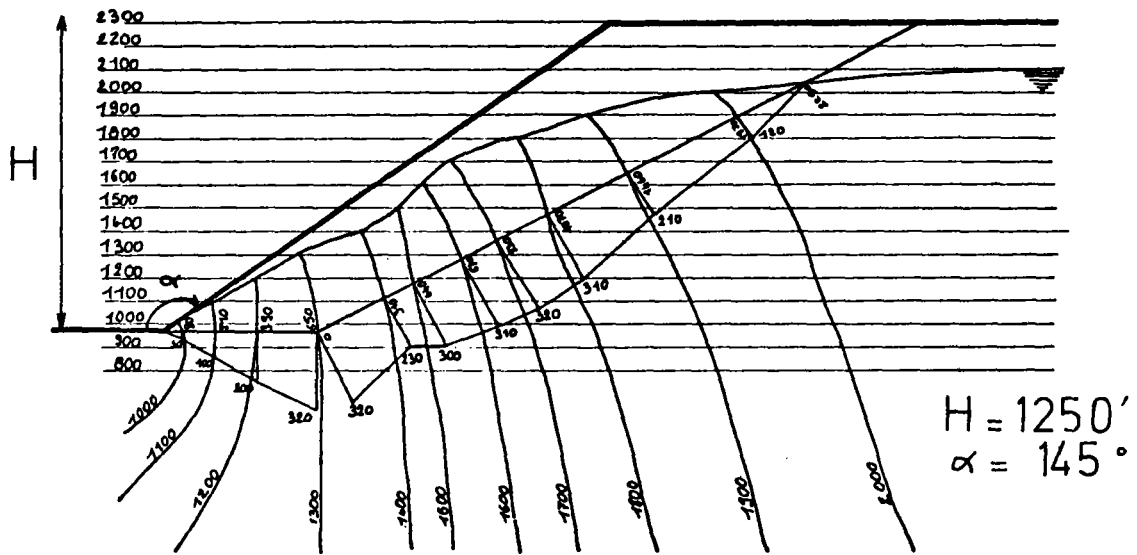
L'angle α doit être exprimé en degrés.

5 - LES CARTES DE DONNEES

N° de la carte	Signification	Colonnes	FORMAT	
1	Hauteur du talus H	1 à 6	F 6.0	
1	Angle α en degré	8 à 10	F 3.0	
1	Nombre de cas à traiter	12 à 13	I 2	
1	Spécification d'unité de mesure			
	1 pour des données en mètres	15	I 1	
	2 " " " " pieds			
1 ^{er} Cas	2	Nombre de mesures sur le premier segment	1 à 2	I 2
	3			
	4	Valeurs de la pression sur le segment		20F4.0
	5	Abscisses des points de mesure sur le segment *		20F4.0
	6	Nombre de mesures sur le deuxième segment	1 à 2	I 2
	7	Valeurs de la pression		20F4.0
	8	Abscisses		20F4.0
2 ^e Cas	9			
	10			
	11			
	12			
	13			
	etc			

* L'origine peut être choisie indifféremment à l'une ou l'autre extrémité du segment.

6 - EXEMPLE



Le cercle critique du glissement est approché par deux segments de droite.

A partir du réseau d'équipotentielles, nous mesurons point par point la valeur de la pression exercée sur les segments de glissement.

$$p = \gamma_w (H-Z)$$

de même que les abscisses des points de mesure.

Les données seront les suivantes (cf. bordereau page 9).

Carte 1 H, α , nombre de cas à traiter, codification d'unité de mesure ;

Carte 2 N : nombre de mesures sur le premier segment ;

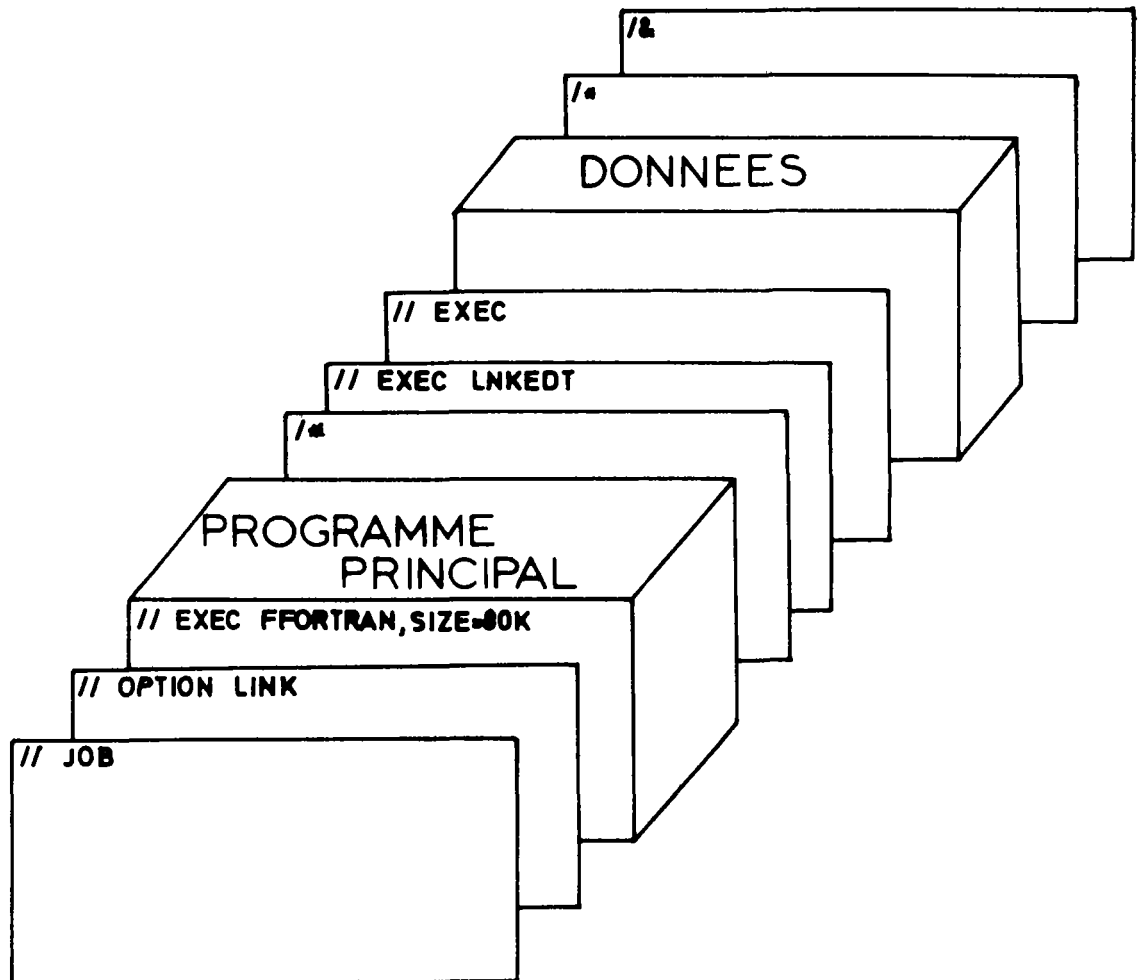
Carte 3 p (I) : valeurs de la pression ;

Carte 4 X(I) : abscisses des points de mesure.

etc.

7 - SCHEMA DE STRUCTURE DE L'ENSEMBLE DES CARTES AVEC :

- les cartes de contrôle ;
- le programme principal ;
- les cartes de données.




```
C *****
C *
C * LE PROGRAMME CODRAI CALCULE LE COEFFICIENT DE FRAINAGE *
C * DANS UN TALUS *
C *
C *****
C DIMENSION P(100),X(100),YO(100),F (100),YR(100),FR(100)
C DIMENSIONYI(100),FI(100)
C DIMENSIONFT(100),COEF(100),EFFI(100)
1000 FORMAT(F6.0,1X,F3.0,1X,I2,1X,I1)
2000 FORMAT(I2)
3000 FORMAT(20F4.0)
4000 FORMAT(1H1,' FORCE SUR CHAQUE SEGMENT ET SON POINT D APPLICATION')
5000 FORMAT(10X,F9.0,20X,F6.0)
6000 FORMAT(8X,' FORCE RESULTANTE',10X,' COEFFICIENT DE DRAINAGE',13X,
1'EFFICACITE')
7000 FORMAT(10X,F9.0,20X,F9.3,20X,F9.3)
8000 FORMAT(2X,' UNITES',8X,' TONNES',22X,' METRES')
9000 FORMAT(2X,' UNITES',8X,' TONNES')
READ( 1,1000)H,ALPHA,NCAT,INDU
NB=NCAT*2
DO 140 I1=1,NB
READ( 1,2000)N
READ( 1,3000)(P(I),I=1,N)
READ( 1,3000)(X(I),I=1,N)
IF(INDU.EQ.1) GO TO 100
DO 90 K1=1,N
P(K1)=P(K1)*.3048
X(K1)=X(K1)*.3048
HM=H*.3048
90 CONTINUE
100 M=N-1
C
C CALCUL DE LA FORCE
C
DO 120 K=1,M
F(K)=(0.5)*(P(K+1)-P(K))*(X(K+1)+X(K))-(X(K)*P(K+1)-X(K+1)*P(K))
C
C CALCUL DU POINT D APPLICATION DE LA FORCE
C
E=(P(K+1)-P(K))/(X(K+1)-X(K))
G=(-X(K)*P(K+1)+X(K+1)*P(K))/(X(K+1)-X(K))
ANUME=(1./3.)*E*(X(K+1)**3-X(K)**3)+.5*G*(X(K+1)**2-X(K)**2)
DENO=.5*E*(X(K)**2-X(K+1)**2)+G*(X(K)-X(K+1))
YO(K)=ANUME/DENO*(-1.)
120 CONTINUE
C
C CALCUL DE LA FORCE RESULTANTE SUR CHAQUE SEGMENT
C
IF (N.EQ.2) GO TO 135
L1=M-1
DO 130 L=1,L1
YI(L)=(YO(L+1)*F(L+1)+F(L)*YO(L))/(F(L)+F(L+1))
FI(L)=F(L)+F(L+1)
YO(L+1)=YI(L)
F(L+1)=FI(L)
```

```
130 CONTINUE
    YR(I1)=YI(L)
    FR(I1)=FI(L)
135 YR(I1)=YO(K)
    FR(I1)=F(K)
140 CONTINUE
```

C
C
C
C
C

```
    POUR CHAQUE TALUS, CALCUL DE LA FORCE TOTALE
                                DU COEFFICIENT DE DRAINAGE
                                DE L EFFICACITE DE DRAINAGE
```

```
    ALPHAR=(3.1416*ALPHA)/180.
    A=(3.*HM**2)/4.
    DO 150 I2=1,NB,2
    I=(I2+1)/2
    WW=(FR(I2)+(-COS(ALPHAR))*FR(I2+1))**2
    FT(I)=SQRT(WW+(SIN(ALPHAR)*FR(I2+1))**2)
    COEF(I)=FT(I)/A
    EFFI(I)=A/FT(I)
150 CONTINUE
    WRITE( 3,4000)
    WRITE( 3,8000)
    WRITE( 3,5000)(FR(I),YR(I),I=1,NB)
    WRITE( 3,6000)
    WRITE( 3,9000)
    WRITE( 3,7000)(FT(I),COEF(I),EFFI(I),I=1,NCAT)
    STOP
    END
```

RESUTATS

FORCE SUR CHAQUE SEGMENT ET SON POINT D APPLICATION

UNITES	TONNES	METRES
	9639.	134.
	46902.	274.

UNITES	FORCE RESULTANTE TONNES	COEFFICIENT DE DRAINAGE	EFFICACITE
	55076.	0.506	1.977