

le drainage des talus par la technique des éperons

évaluation par simulations tridimensionnelles de l'efficacité de la méthode et impact sur la stabilité

embankment draining by the drainage spurs method
evaluation of the efficiency of the method through threedimensionnal simulation
and assesment of the gained stability

P. AIGLE, Chercheur
F. DESNOUVAUX, Assistant
J.-P. PROST, Maître de Conférences
Equipe de Géologie Appliquée au Génie Civil, Université de Nancy I *

Résumé

Les principaux résultats d'un ensemble de travaux portant sur le drainage des terrains par la méthode des éperons sont présentés.

Pour des jeux d'hypothèses très variées, notamment pour diverses pentes de talus et distances d'alimentation, la forme de la surface de l'écoulement souterrain permanent, induit à long terme par un système d'éperons parallèles de profondeur et d'espacement donnés, associés à une tranchée longitudinale, a été déterminée sur un modèle analogique tridimensionnel de conception originale, bien adapté à la recherche des surfaces libres.

Une étude quantitative détaillée a été menée au niveau du plan vertical de symétrie de deux ouvrages. L'évolution de la ligne phréatique, en fonction des caractéristiques géométriques des éperons, a été systématiquement relevée. Le choix de paramètres quantifiant l'efficacité du drainage d'un double point de vue, hydraulique (intensité des déplacements moyens de la ligne phréatique) et mécanique (gain de stabilité obtenu), permet diverses interprétations et la construction d'abaques spécifiques.

Il est montré par ailleurs que l'évolution latérale de ces paramètres répond à une loi unique dont la connaissance conduit à la définition de valeurs moyennes, très utiles au dimensionnement raisonnable d'un dispositif drainant de ce type.

Abstract

In this article, the first results of a number of research works are presented, dealing with the drainage of grounds by the drainage spurs method.

For a very wide range of hypotheses, particularly for various embankment slopes and various distances of a recharging boundary, the shape of the surface of steady groundwater flows, induced in the long term by a series of parallel drainage spurs of given depth and spacing, and coupled with a drainage ditch, has been determined on an originally designed analog model, well suited to the location and assessment of water tables.

A detailed quantitative study has been carried out over the vertical plane of symmetry of two drainage spurs. The evolution of the water table curve, in relation with the geometrical characteristics of the spurs, has been systematically recorded. Selecting the parameters that allow a quantitative estimate of the draining efficiency both from a hydraulic (scale of average water drawdown) and mechanical point of view (gained stability) give rise to various interpretations and to the drawing of specific design charts.

Besides, it is shown that the lateral evolution of these parameters conforms to a single law, the knowledge of which leads to the definition of average values used to great advantage for a sensible sizing of draining systems of this type.

1. GENERALITES

1.1. Introduction

Les problèmes posés par la stabilité des pentes naturelles ou des talus artificiels (déblais, remblais, digues...) revêtent en Géotechnique une particulière importance qui tient, d'une part à la fréquence et à l'ampleur souvent considérable des travaux de terrassement contemporains, d'autre part à la multitude des sinistres constatés (détériorations, glissements et ruptures), enfin aux prix de revient élevés des systèmes de prévention et des chantiers de remise en état.

Autre aspect bien connu du problème, les désordres sont dus, dans leur très grande majorité, aux effets statiques et dynamiques de l'eau dans les sols. En déblais notamment, là où ils se révèlent les plus nombreux et les plus onéreux, ils apparaissent généralement à long terme, liés directement aux nouvelles caractéristiques des écoulements permanents induits par les travaux.

Le drainage, par l'ensemble de ses effets dans les sols (rabattement, détournement des lignes de courant, réduction des pressions interstitielles), est l'un des moyens privilégiés de stabilisation des pentes. Il implique toutefois des dispositifs suffisamment coûteux pour qu'il convienne d'en évaluer les caractéristiques minimales. Or, si les ouvrages continus (tranchées, tapis et masques) ne posent que peu de problèmes de calcul puisqu'ils donnent lieu à des écoulements souterrains généralement bidimensionnels, il n'en va pas de même pour les systèmes discontinus (drains subhorizontaux, éperons). Ceux-ci, en dépit de leur fréquence et de leur efficacité reconnue, n'ont été jusqu'ici que peu étudiés : aux difficultés habituelles liées à l'hétérogénéité du milieu et à l'incertitude sur les conditions réelles d'alimentation s'ajoute en effet la complexité d'écoulements devenant autour de ces ouvrages typiquement tridimensionnels, donc difficilement analysables ou modélisables.

Cet article a pour objet de présenter une part importante des résultats de recherches effectuées en laboratoire sur le drainage des déblais par le moyen d'éperons parallèles associés à une tranchée longitudinale de pied, procédé couramment utilisé notamment en Géotechnique routière (fig. 1), pour la confortation des talus de moyenne hauteur (F. DESNOUVAUX — 1983).

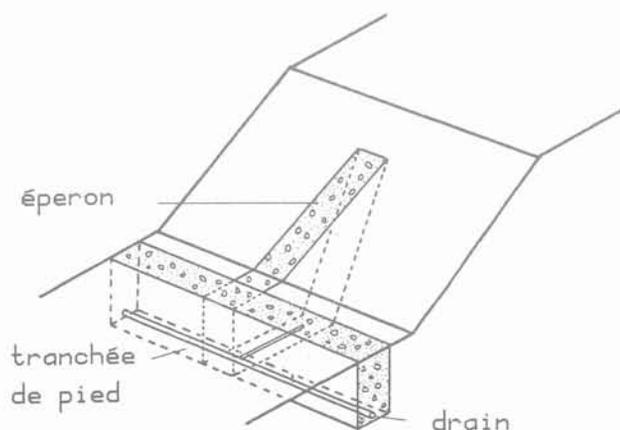


Fig. 1 — Éperon en talus de déblai.

Seront successivement abordés : la détermination, sur un modèle analogue à trois dimensions, des propriétés principales des écoulements vers une série d'éperons, la quantification de l'efficacité du drainage en fonction de paramètres variés et ses conséquences sur la stabilité des pentes.

1.2. Brève revue des travaux antérieurs

Au sein d'une bibliographie peu fournie sur ce sujet, quelques articles tentent une synthèse sur l'ensemble des problèmes du drainage : ceux notamment de J.-N. HUTCHINSON (1977) et de M. RAT (1970-1976). S'ils constituent une base à cette étude, ils ne donnent toutefois que peu d'indications de calcul dans le cas particulier des dispositifs discontinus, dont on cherche surtout à définir deux caractéristiques : profondeur de mise en place et espacement.

1.2.1. Les drains subhorizontaux

Il s'agit d'ouvrages apparus pendant la première moitié de ce siècle et décrits depuis par de nombreux auteurs. En l'absence de théorie rigoureuse, leur dimensionnement s'effectue couramment par des méthodes approchées fondées sur le choix d'hypothèses simplificatrices diverses : assimilation à une ligne de puits (M. RAT — 1976), à un système d'aiguilles filtrantes (G.-A. LEONARDS — 1968), à un écoulement bidimensionnel vers un tapis filtrant (M. RAT — 1970).

Mais il faut citer aussi une approche par méthode de simulation, due à T.C. KENNEY et al. (1977) : les auteurs, expérimentant sur modèles réduits à trois dimensions, ont, pour une pente de talus unique de 1/3, procédé à des mesures systématiques de la baisse de la pression interstitielle induite par des drains de longueur et d'écartement variés et calculé à l'aide de la méthode de Bishop la variation relative correspondante du coefficient de sécurité du talus. Ainsi les abaques qu'ils présentent tiennent-ils effectivement compte de la complexité réelle des écoulements dans l'espace. C'est une démarche sensiblement analogue que nous allons suivre, mais pour un autre type d'ouvrages (les éperons), et à l'aide d'une autre technique (l'analogie électrique).

1.2.2. Les éperons drainants

Ce terme est actuellement plus ou moins lié au confortement des talus artificiels, par opposition, pour les pentes naturelles, aux tranchées transversales d'allongement plus important.

Peu de choses sur le dimensionnement : J.-N. HUTCHINSON (1977) pour les tranchées et M. RAT (1976) pour les éperons proprement dits ont proposé chacun une méthode approchée, fondée sur une large schématisation des écoulements.

2. HYPOTHESES DE L'ETUDE EXPERIMENTALE

Soit un système constitué par un talus de grande longueur, équipé en pied d'une tranchée longitudinale et recoupé par une série d'éperons transversaux parallèles.

les entre eux, en nombre suffisant pour que l'écoulement dans le massif se reproduise identique à lui-même d'ouvrage en ouvrage.

Avec ces hypothèses le volume étudié peut ainsi être réduit à une tranche de massif unique limitée par deux plans parallèles de symétrie paire, donc imperméables (fig. 2) :

- le plan de symétrie entre deux éperons successifs : médian (M) ;
- le plan de symétrie de l'éperon lui-même : axial (A).

L'expérimentation a été menée en fonction de conditions géométriques et hydrauliques très variées. Les valeurs de chacun des paramètres correspondants ont été choisies en conformité avec les ordres de grandeur réellement retenus sur chantier. Quant à la précision parfois illusoire de certaines grandeurs, notamment due aux contraintes de la mise en modèle, elle a été conservée telle quelle dans l'énoncé des résultats de simulation, mais ceux-ci ont été généralisés dans un second temps par l'emploi systématique de variables relatives.

Pour la définition des hauteurs, des profondeurs et des potentiels, le plan horizontal de référence a été placé au niveau du fond de tranchée.

2.1. Définition des paramètres de l'expérimentation (fig. 2)

Ce sont des variables ou des constantes décrivant soit la géométrie des ouvrages (talus et système drainant), soit la nature de l'alimentation ou les propriétés des matériaux.

Si l'on excepte, dans un premier temps, un certain nombre d'extensions dont il sera question plus loin, les valeurs les plus usuelles adoptées pour ces paramètres sont les suivantes :

2.1.1. Géométrie des ouvrages

Le talus est défini par sa cote en crête H_t (9,0 m) et par sa pente M dont on a retenu trois valeurs successives (1/1,5 ; 1/2 ; 1/2,5).

Les éperons, de section trapézoïdale ou triangulaire, supposés constitués par un matériau de forte perméabilité, ont été caractérisés par :

- leur profondeur P mesurée horizontalement au niveau du plan de référence et que l'on a fait croître jusqu'à une dizaine de mètres (quatre valeurs distinctes : 3,5 ; 5,2 ; 7,1 et 10,6 m),
- leur espacement entre deux plans axiaux E , variant jusqu'à 24 m, ou entre bords internes E' ,
- leur largeur l_e qui n'a que peu d'influence sur l'efficacité du drainage (1,2 m) et leur hauteur H_e prise égale à H_t (9,0 m).

Quant à la tranchée longitudinale, elle présente une largeur l_t (0,5 m) et un encastrement dans le sol de fondation D (1,5 m).

2.1.2. Autres facteurs

L'hypothèse de base a été celle d'un écoulement permanent en un massif monocouche, homogène et isotrope, reposant sur un substratum horizontal rigide et imperméable.

L'alimentation se produit latéralement par l'arrière du massif, selon une surface d'entrée verticale, de potentiel H (9,0 m), située à une distance R du pied de talus. Deux distances ont été envisagées, l'une proche (21,25 m), l'autre plus lointaine (31,25 m).

Le substratum se situe en fond de tranchée, soit une profondeur S nulle.

2.2. Nature des phénomènes étudiés

Le principal objectif a été la recherche des surfaces libres, dans la mesure où leur localisation permet de juger de l'efficacité du drainage, de circonscrire les volumes immergés, d'en déduire l'extension éventuelle des zones de suintement sur talus et d'estimer en tout point du massif la valeur de la pression interstitielle.

Les écoulements, de nature typiquement tridimensionnelle, conduisent à des surfaces libres gauches, dont les intersections avec des plans verticaux parallèles aux épe-

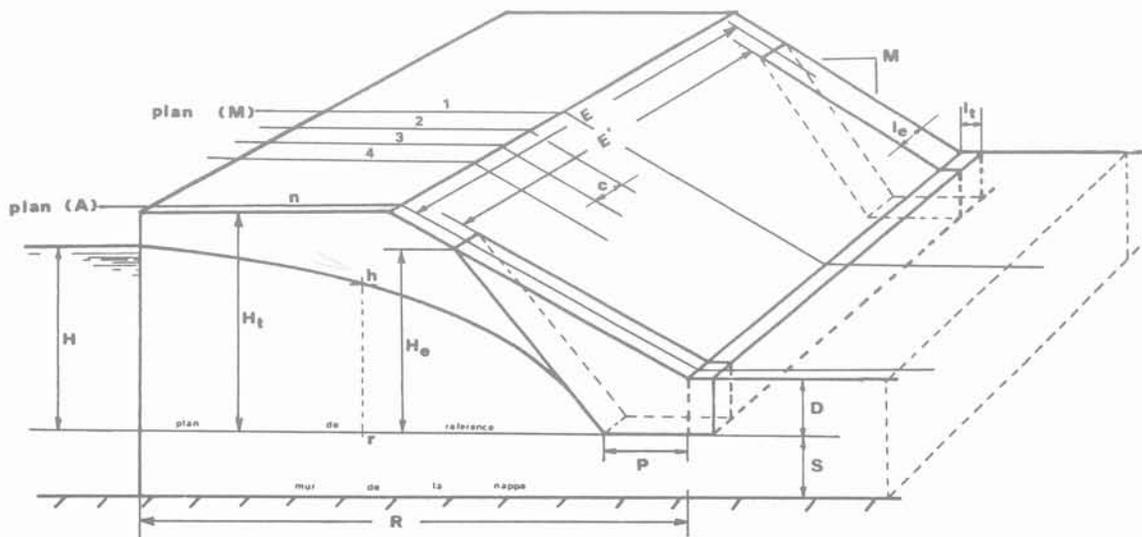


Fig. 2 — Rappel des paramètres expérimentaux.

rons varient d'une position basse selon le plan axial à une position haute, plus défavorable, dans le plan médian (fig. 3). Par ailleurs, elles demeurent comprises entre deux surfaces cylindriques enveloppes correspondant respectivement, l'une à un talus sans autre ouvrage drainant que la tranchée (éperons infiniment espacés : $E' = \infty$), l'autre à un talus drainé par un masque continu (éperons jointifs : $E' = 0$).

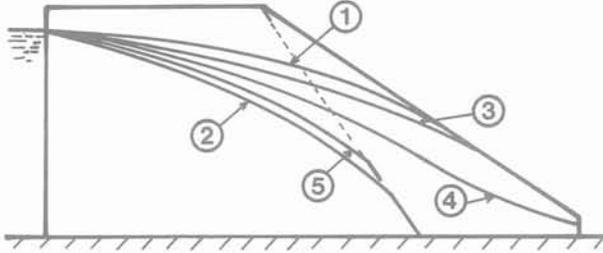


Fig. 3 — Nature des surfaces libres étudiées.

Cas limites : 1. surface libre avant drainage par éperons
2. surface libre due à un drainage par masque

Lignes phréatiques induites par un système d'éperons

3. surface libre dans le plan médian (M)
4. surface libre intermédiaire
5. surface libre dans le plan de l'éperon (A)

Ont donc été tracées de façon systématique :

— par simulation bidimensionnelle, la surface libre se rapportant à tous les couples de cas limites évoqués ci-dessus,

— par simulation tridimensionnelle, la ligne phréatique relative à l'écoulement dans le plan médian (M) entre éperons, et cela pour toutes combinaisons des principaux paramètres de l'étude,

— par simulation tridimensionnelle, mais seulement dans quelques cas particuliers, la forme complète de la surface libre entre éperons, dans le but de définir les caractéristiques d'un écoulement moyen et de les comparer à celles de l'écoulement médian.

La géométrie des réseaux d'écoulement et la répartition entre le talus, la tranchée et les éperons des débits d'exhaure ont été également déterminées dans un grand nombre de cas.

Après une courte description de la technique utilisée (paragraphe 3), l'exposé des résultats principaux et de leur interprétation fera l'objet du paragraphe 4, axé sur l'interprétation des mesures dans le plan médian. Le paragraphe 5 traitera des propriétés latérales de la surface libre entre ouvrages et de la définition d'un plan de calcul moyen. Le paragraphe 6 conclura et fera rapidement le point sur quelques extensions qui complètent ces travaux.

3. METHODOLOGIE

La méthode choisie a été celle de l'analogie électrique. En effet le laboratoire est équipé d'une installation ori-

ginale, spécialement conçue pour la représentation aisée des écoulements tridimensionnels à surface libre.

Cette solution était donc très largement compétitive par rapport à la modélisation mathématique qui fait appel dans ce cas à des programmes de mise en œuvre malaisée, ou par rapport à la pratique lourde et peu précise des modèles réduits tels que les utilisa T.-C. KENNEY (1977) dans son étude sur les drains.

3.1. L'appareillage

On sait que l'analogie électrique, ayant pour fondement l'identité de formulation mathématique des équations de l'hydraulique souterraine et de la circulation du courant, consiste à remplacer le phénomène physique réel par un écoulement électrique dans un milieu conducteur de même forme que le domaine aquifère, et, pour cela, à faire correspondre deux à deux les potentiels (hydraulique H et électrique U), les conductivités (perméabilité K et conductivité électrique Co), les distances (réelle D et réduite d) et les flux (débit Q et intensité I).

L'analogie peut être définie de façon unique par le choix des échelles des trois grandeurs fondamentales (U/H , Co/K , d/D), les flux étant alors liés par une équation monomiale appelée résultat de similitude, de la forme :

$$Q / (K.H.D) = I / (Co.U.d)$$

L'expérimentation a donc été menée sur une installation spécifique, conçue, mise au point et construite au Laboratoire en 1977, dont on trouvera une description plus précise dans un article paru dans Sciences de la Terre (J.-L. BLIN-LACROIX et al. — 1977).

Il s'agit d'un modèle mixte associant deux techniques distinctes : Papier Conducteur et Réseaux de Résistances. Il procède d'une représentation du domaine aquifère par une série de coupes parallèles, d'orientation quelconque. Celles-ci, sur le modèle, sont matérialisées par des plans de papier, donc par un matériau bidimensionnel continu. L'écoulement électrique dans la troisième direction s'établit dans un réseau unidimensionnel de résistances pures, reliant deux à deux les nœuds homologues d'un maillage régulier implanté sur chaque coupe.

Ainsi, avec les notations de la figure 4, les principales formules de mise en modèle, permettant le calcul des diverses résistances en fonction des données (perméabilités, espacement entre coupes, maillage) s'écrivent :

$$\begin{aligned} R_p &= R/K_p \cdot 2ap/(ar+a'r) \\ R_r &= R/K_r \cdot ar/ap \\ R'r &= R/K'r \cdot a'r/ap \end{aligned}$$

Quant au résultat de similitude entre les flux, il devient :

$$Q / (K.H) = I.R_r/U \cdot ap^2/ar = I.R_p/U \cdot ar$$

3.2. La technique expérimentale

3.2.1. Mise en modèle

Les coupes, au nombre de dix, ont généralement été choisies verticales, perpendiculaires à l'allongement du talus. La première coïncide avec le plan médian de symétrie entre deux éperons, et la dixième avec le plan axial d'un ouvrage. Ainsi la recherche des surfaces libres est-elle largement facilitée, puisqu'elle s'effectue avec précision selon les plans de papier conducteur, c'est-à-

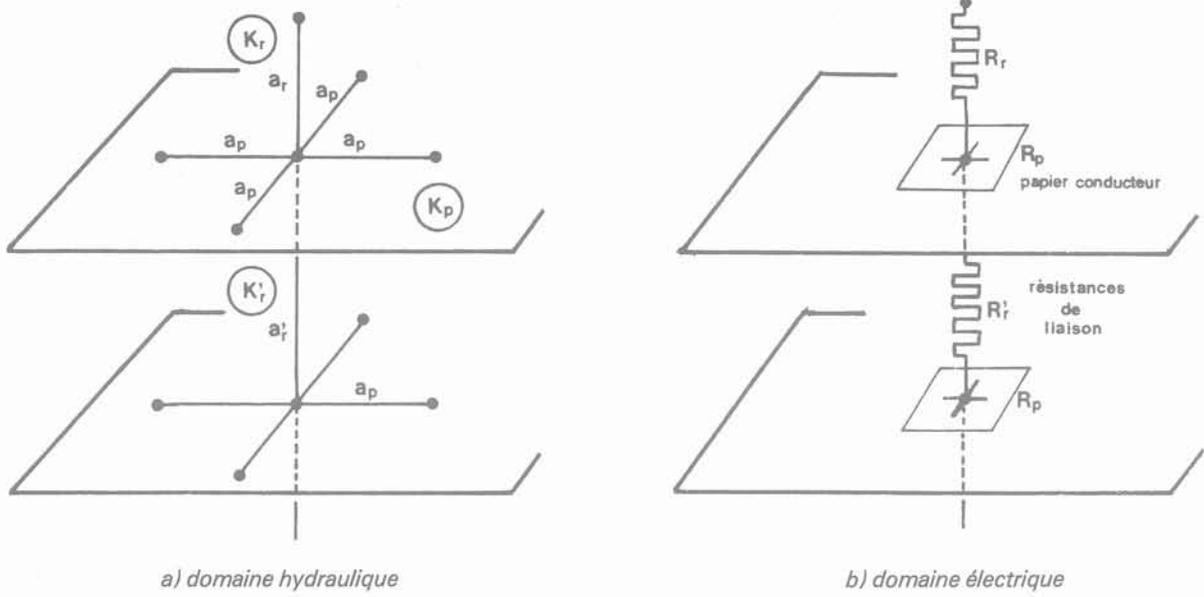


Fig. 4 — Notations utilisées pour la mise en modèle.

dire sur un domaine continu. Par ailleurs, l'espacement entre coupes peut être réglé par le choix des résistances du réseau unidimensionnel, conformément aux formules données ci-dessus.

Les principales conditions aux limites sont : en entrée, une électrode amont qui, figurant l'alimentation, apparaît sur chaque coupe ; en sortie, les divers suintements,

sur l'éperon (au niveau de la coupe axiale), sur le talus et la tranchée (pour chacune des autres coupes).

La figure 5 donne en exemple l'ensemble des caractéristiques d'une mise en modèle correspondant, pour une alimentation à 21,25 m, à un talus de pente 2/3, recoupé par des éperons profonds de 5,2 m et distants d'environ 22 m.

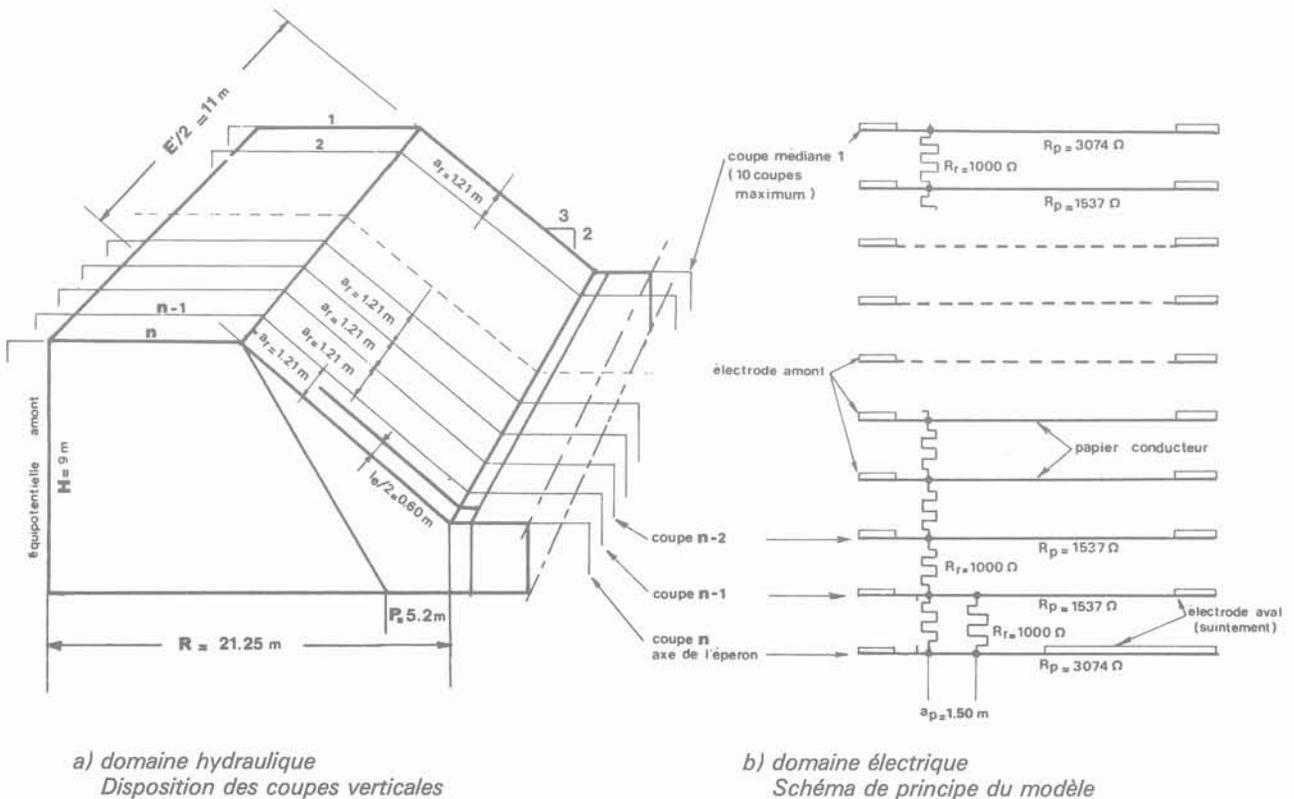


Fig. 5 — Exemple de mise en modèle.

3.2.2. Manipulation

La recherche des lignes phréatiques s'effectue, plan après plan, selon le mode opératoire habituel, itératif des modèles bidimensionnels continus. La variation de l'écartement E s'obtient par la suppression progressive des plans de papier intermédiaires, ce qui le fait à chaque fois décroître d'une valeur égale à la maille ar.

Lorsque la surface libre est entièrement déterminée, connue par sa trace sur chacune des dix coupes verticales, elle est relevée ainsi que le réseau des équipotentielles et la valeur des flux.

L'ensemble des mesures est centralisé, regroupé sur support magnétique et traité automatiquement par une chaîne de programmes spécifiques « ÉPERON » qui les éditent sous forme de tableaux ou de figures, les interprètent, calculent les principaux paramètres et tracent en fin de compte les abaques résultants. Pour ce faire, le modèle mixte est associé à un système Hewlett-Packard 3052, composé d'un ensemble électronique (scanner, instruments de mesure) piloté par un calculateur HP-9825T programmé en HPL.

4. RESULTATS DANS LE PLAN MEDIAN

Tenter de caractériser le drainage par ses effets dans le plan de symétrie de deux éperons successifs, plan médian (M), se justifie pleinement puisque la nappe y étant la plus haute, les résultats présentés sont, pour une famille donnée d'hypothèses, les plus défavorables possibles.

Seront successivement décrites, d'une part les propriétés hydrauliques des écoulements vers le système drainant, d'autre part leurs conséquences mécaniques sur la tenue du talus.

4.1. Résultats hydrauliques

4.1.1. Mécanisme de l'écoulement vers un éperon

Le premier facteur dont on étudie l'influence est l'espacement entre deux éperons (E, E'), à profondeur P constante, pour des valeurs bien définies des autres paramètres.

Pour cinq à neuf coupures distinctes de la variable E' les lignes phréatiques médianes sont construites, numérisées par les coordonnées (r, h) d'un certain nombre de leurs points qui sont enregistrées dans des fichiers. Les programmes d'application éditent ensuite un tableau des mesures et une représentation graphique de l'abaissement de la surface libre quand l'espacement décroît. Les équations de ces lignes sont calculées par une routine d'interpolation polynomiale et leurs coefficients conservés pour une réutilisation ultérieure, par le logiciel de stabilité de talus notamment.

A titre d'exemple, pour une pente de 2/3, des éperons de 5,2 m de profondeur et une distance d'alimentation de 21,25 m, les résultats analytiques se présentent sous la forme du tableau I, pour un espacement E variant de 21,8 m à 2,4 m. Ils permettent le tracé automatique de la figure 6 qui, dans le but de s'affranchir des valeurs expérimentales, est établie à l'aide de grandeurs relati-

Tableau I. — Résultats analytiques.

EVOLUTION DE LA SURFACE LIBRE DU PLAN MEDIAN EN FONCTION DE L'ECARTEMENT E															
P = 5,18 m E variable M = 0,67 R = 21,25 m S = 0,00 m Ksv/Ksh = 1,0															
COORDONNEES (r, h) DES POINTS DE LA SURFACE LIBRE MEDIANE (VALEURS EXPERIMENTALES EN METRES)															
E	r	h	0,00	4,43	8,12	11,49	14,17	16,36	18,10						
infini	r	h	0,00	4,43	8,12	11,49	14,17	16,36	18,10						
	r	h	9,00	8,10	7,20	6,30	5,40	4,50	3,60						
21,78	r	h	0,00	4,19	7,44	10,34	12,99	15,25	17,66	19,43	20,67	21,08	21,25		
	r	h	9,00	8,10	7,20	6,30	5,40	4,50	3,60	2,70	1,80	1,35	1,08		
19,36	r	h	0,00	4,07	7,25	10,14	12,80	15,06	17,30	19,25	20,55	20,98	21,25		
	r	h	9,00	8,10	7,20	6,30	5,40	4,50	3,60	2,70	1,80	1,35	0,90		
16,94	r	h	0,00	4,02	7,20	10,05	12,64	14,88	17,07	18,90	20,31	20,85	21,25		
	r	h	9,00	8,10	7,20	6,30	5,40	4,50	3,60	2,70	1,80	1,35	0,85		
14,52	r	h	0,00	3,90	7,10	9,71	12,17	14,35	16,52	18,54	20,15	20,70	21,25		
	r	h	9,00	8,10	7,20	6,30	5,40	4,50	3,60	2,70	1,80	1,35	0,54		
11,50	r	h	0,00	3,87	7,00	9,63	11,96	14,00	16,10	18,01	19,85	20,50	21,25		
	r	h	9,00	8,10	7,20	6,30	5,40	4,50	3,60	2,70	1,80	1,35	0,45		
9,20	r	h	0,00	3,80	6,91	9,51	11,75	13,76	15,65	17,65	19,52	20,21	20,81	21,25	
	r	h	9,00	8,10	7,20	6,30	5,40	4,50	3,60	2,70	1,80	1,35	0,90	0,40	
6,90	r	h	0,00	3,75	6,85	9,21	11,37	13,29	14,94	16,59	18,69	19,84	20,52	21,25	
	r	h	9,00	8,10	7,20	6,30	5,40	4,50	3,60	2,70	1,80	1,35	0,90	0,30	
4,64	r	h	0,00	3,72	6,64	8,98	11,10	12,89	14,41	15,59	17,33	18,66	20,06	21,25	
	r	h	9,00	8,10	7,20	6,30	5,40	4,50	3,60	2,70	1,80	1,35	0,90	0,18	
2,36	r	h	0,00	3,66	6,60	8,90	10,92	12,57	13,91	15,06	16,31	17,07	18,54	20,61	21,25
	r	h	9,00	8,10	7,20	6,30	5,40	4,50	3,60	2,70	1,80	1,35	0,90	0,45	0,18
masque	r	h	0,00	3,60	6,38	8,74	10,69	12,40	13,64						
	r	h	9,00	8,10	7,20	6,20	5,40	4,50	3,60						

EVOLUTION DE LA SURFACE LIBRE DU PLAN MEDIAN en fonction de l'ecartement E

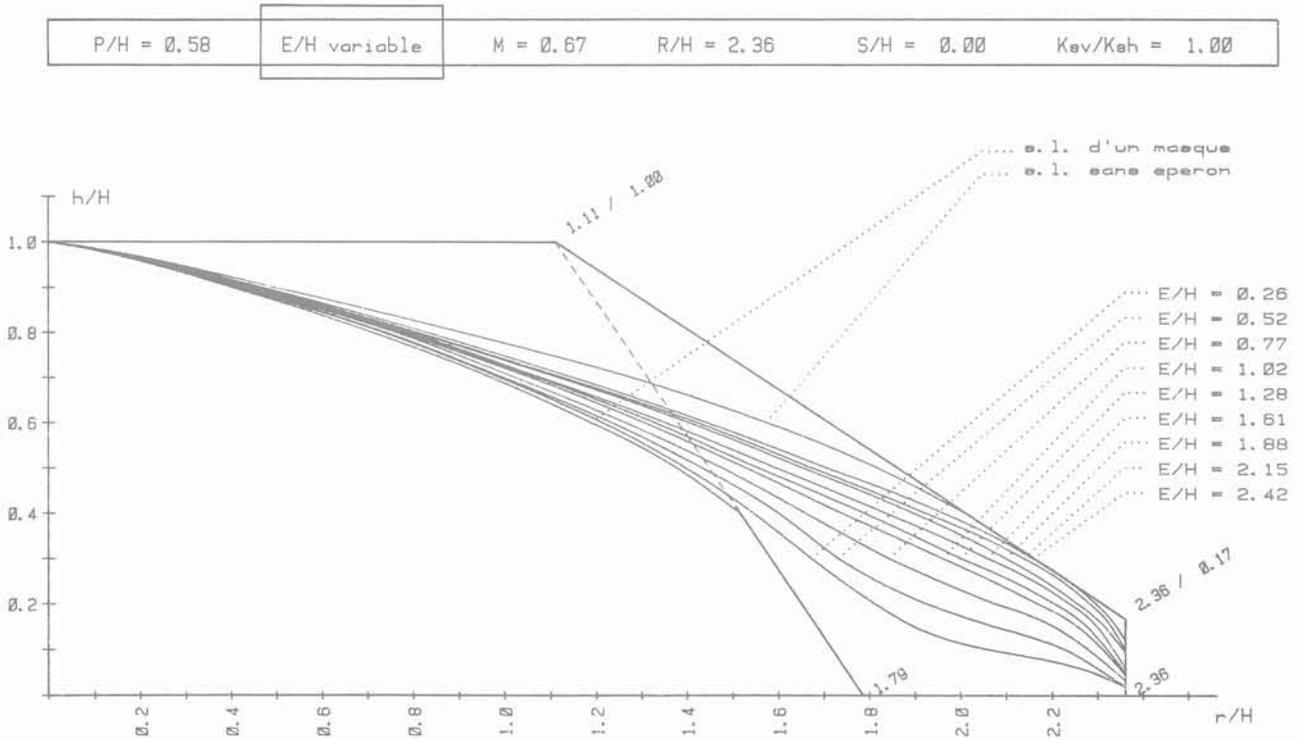


Fig. 6 — Évolution de la surface libre dans le plan médian en fonction de l'écartement des éperons.

ves correspondant à l'unité de hauteur d'alimentation (grandeurs P/H, R/H, S/H et E/H).

Par ailleurs, tableau et figure incluent également les deux cas limites dont il a été question précédemment : limite haute pour un espacement infini (tranchée drainante sans éperon), limite basse pour un espacement E' nul (masque), déterminées toutes deux sur des modèles à deux dimensions.

Ces deux types de documents ont été systématiquement produits pour toutes les combinaisons possibles des données numériques initiales.

4.1.2. Notion de paramètres d'efficacité

Si le type de graphe de la figure 6 permet de parfaitement visualiser au droit du plan médian les effets du drainage, il reste toutefois à les quantifier par la définition d'un ou de plusieurs paramètres représentatifs, appelés paramètres d'efficacité. Ils permettront l'établissement d'abaques.

Divers paramètres ont été retenus. Provenant de mesures effectuées automatiquement sur les courbes de la figure 6 à partir d'un état origine, celui de la ligne phréatique limite de l'écoulement sans éperon, ils expriment soit l'intensité du déplacement (vertical, horizontal ou oblique) de cette ligne phréatique au droit d'un certain nombre de points de repère, soit l'ampleur relative des surfaces dénoyées par le drainage, soit encore diverses valeurs dérivées (moyennes).

A titre d'exemple, il n'en sera présenté qu'un seul, très

explicite : « VS2 ». Exprimé en mètres à partir de la surface dénoyée verticale S2 (fig. 7) par la relation $VS2 = S2/L$, il permet d'estimer de façon suffisamment précise la baisse moyenne de la nappe sous le talus, c'est-à-dire dans la zone la plus sensible, intéressée par les calculs de stabilité.

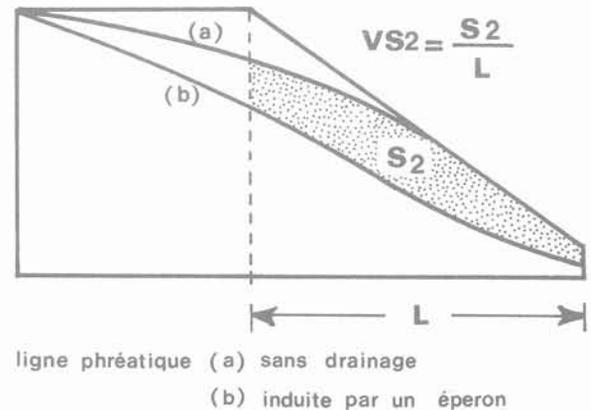


Fig. 7 — Paramètre d'efficacité VS2.

La figure 8 traduit l'évolution du paramètre en fonction de la variable E', pour les quatre profondeurs d'éperons envisagées (3,5 m ; 5,2 m ; 7,1 m et 10,6 m). On obtient ainsi un abaque d'efficacité :

- pour un espacement nul E' les diverses courbes ont pour origine respective un point limite A correspondant au cas d'un masque ;
- quand E' augmente, l'efficacité décroît tout d'abord fortement (branche AB) pour un intervalle en abscisse toujours faible, ici voisin du mètre ;
- puis, jusqu'à une vingtaine de mètres, l'efficacité évolue de façon quasi linéaire (branche BC) avant de tendre vers 0 quand l'espacement E' augmente indéfiniment.

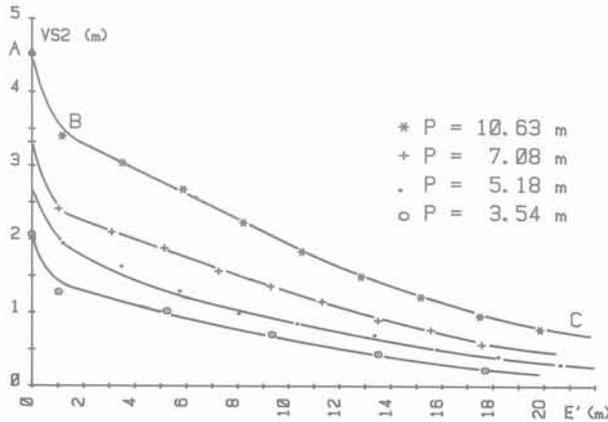


Fig. 8 — Abaque d'efficacité VS2 : variation du paramètre en fonction de l'écartement pour 4 profondeurs d'éperons.

On notera enfin que l'intensité du drainage croît fortement avec la profondeur atteinte par l'éperon dans le massif et qu'à une efficacité donnée, reportée en ordonnée sur l'abaque, correspondent plusieurs géométries possibles du système drainant.

4.1.3. L'abaque de dimensionnement

L'abaque de la figure 8 présente les inconvénients de dépendre étroitement des données numériques de l'expérimentation, notamment des profondeurs P , de ne pas suffisamment mettre en évidence l'ensemble des couples (P, E') conduisant à un degré d'efficacité donné et de ne pas permettre un choix parmi les solutions possibles. Aussi d'autres représentations ont-elles été recherchées, auxquelles a été donné le nom d'abaques de dimensionnement.

L'une des meilleures solutions possibles est le tracé de courbes d'égale efficacité, en fonction des deux variables P et E' , portées l'une en abscisse (P), l'autre en ordonnée (E'). C'est l'objet de la figure 9 sur laquelle ont été reportées, avec un pas de 0,5 m, les iso-VS2 comprises entre 0,5 et 3,0 m. L'origine de chacune est un point évidemment situé sur l'axe des profondeurs, puisqu'il correspond au cas du masque ($E' = 0$). Quant à l'axe des espacements, il correspond à la courbe particulière $VS2 = 0$.

Ce graphe peut être aussi construit à l'aide de grandeurs relatives $P/H, E'/H, VS2/H$. Il permet la détermination commode, par lecture directe sur les deux axes, des couples de caractéristiques (P, E') .

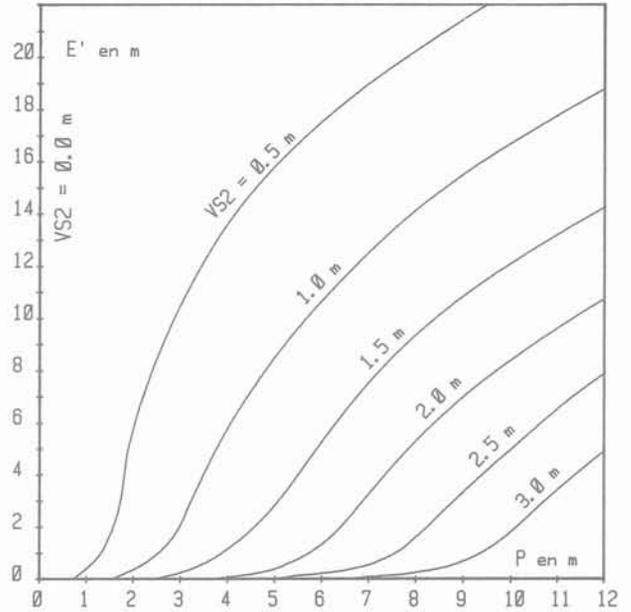


Fig. 9 — Abaque de dimensionnement en isorabattement.

4.1.4. Les abaques d'optimisation

Vouloir aller plus loin, c'est rechercher, parmi toutes ces valeurs, la solution optimale, du double point de vue de l'efficacité et du coût. C'est un problème difficile qui dépend de facteurs multiples liés en particulier aux contraintes de chantier ou aux caractéristiques des matériels et qui, de ce fait, échappent totalement à cette expérimentation.

Une réponse partielle peut lui être donnée par la définition d'un nouveau paramètre, dit de dimensionnement d' :

$$d' = P/E' \text{ (sans dimension)}$$

Il exprime la profondeur d'éperon à mettre en place par mètre linéaire de talus. Donc, toutes choses étant par ailleurs égales, de faibles valeurs de d' , pour une efficacité donnée, déterminent des volumes cumulés moindres de matériau drainant, donc des prix de revient théoriquement plus faibles. C'est pour le projeteur un critère possible parmi d'autres.

Une étude en fonction de ce nouvel élément conduit à la figure 10 qui s'affranchit en outre des valeurs expérimentales de P . Il s'agit de l'ensemble des courbes d'égale paramètre de dimensionnement ($d' = cste$) tracées dans un repère où les profondeurs figurent en abscisse et l'efficacité ($VS2$) en ordonnée. Elles ont toutes même forme, partant de l'origine pour passer par un maximum plus ou moins accentué.

L'optimisation s'en déduit donc : elle consiste à sélectionner la courbe (existante ou intermédiaire) dont le maximum se trouve sur une horizontale passant par l'ordonnée désirée (courbe $d'o$) ; l'abscisse de ce point est P_o et l'espacement vaut $E_o = P_o/d'o$. Il n'y a parfois pas de maximum accessible, car les abaques ont été limités à des profondeurs d'une dizaine de mètres que ne dépassent en général jamais les ouvrages courants : dans ce cas, il y a lieu de s'arrêter sur la branche ascendante de plus petit paramètre d' .

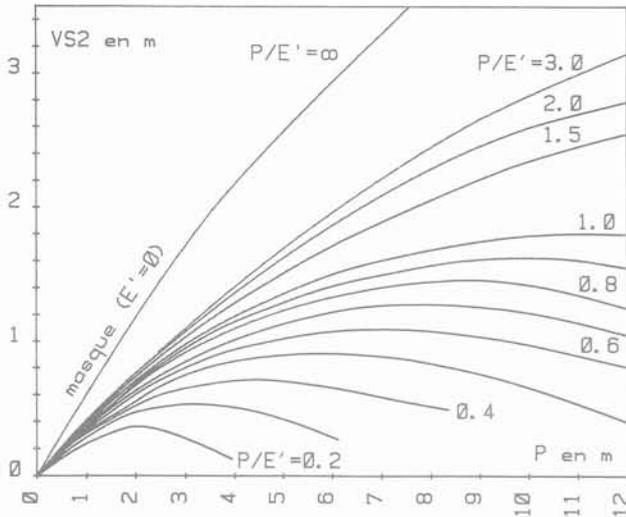


Fig. 10 — Abaque généralisé de dimensionnement.

Autre possibilité, la connaissance de tous les maximums permet de tracer point par point la courbe optimale. C'est une représentation commode qui permet de regrouper sur un même abaque plusieurs cas différents. C'est ce qui est fait sur la figure 11 pour les trois pentes étudiées.

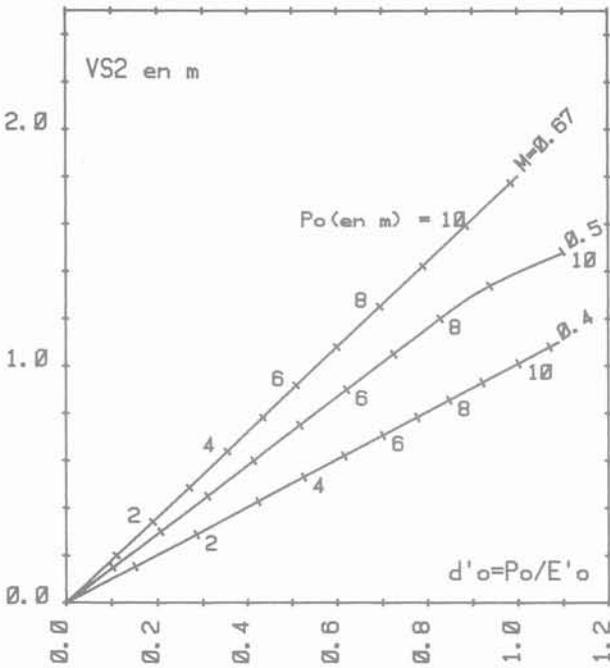


Fig. 11 — Abaque généralisé de dimensionnement optimal en fonction du rabattement recherché (plan médian).

4.2. Conséquences mécaniques

La réalisation d'éperons dans un massif sous talus qui induit une modification du régime des écoulements souterrains avec baisse de la surface libre et diminution des pressions interstitielles, a pour conséquence directe l'amélioration de l'équilibre des terres. L'étude précé-

dente, purement hydraulique peut donc être complétée par une estimation des effets mécaniques du drainage.

En particulier, un talus est caractérisé par un coefficient de sécurité F, étroitement lié à la géométrie de la nappe. Il devient désormais possible, pour chacun des tracés expérimentaux de la ligne phréatique médiane, de calculer ce coefficient et d'en relier la valeur (ou la variation) aux deux grandeurs (P et E') définissant le système drainant : cela conduit à un nouvel ensemble d'abaques, fondés cette fois sur un critère d'efficacité mécanique : le gain de stabilité.

C'est exactement la démarche qu'adopta T.-C. KENNEY (1977) dans ses travaux sur les drains, où il ne produisit que des abaques de ce dernier type.

4.2.1. Hypothèses et méthodologie

L'étude de stabilité a été menée dans le cadre bien précis d'un certain nombre d'hypothèses simplificatrices particulières.

Elle ne concerne que le domaine compris entre deux éperons successifs, ne prend donc pas en compte les effets mécaniques secondaires dus à leur présence. La rupture, en tout point simultanée, s'y produit selon une surface que l'on a assimilée à un cylindre et dont on étudie la trace circulaire dans le plan médian : la nappe y étant la plus haute (hypothèse pessimiste), c'est là le lieu des coefficients F les plus faibles, que l'on appellera coefficients médians FM.

Les autres principales données géométriques et numériques sont résumées par la figure 12 :

- un milieu homogène et isotrope parcouru par une nappe en mouvement que situent les coordonnées de quelques points de sa surface ;
 - en mur un substratum rigide et en pied de talus une zone stable (tranchée et chaussée), ce qui exclut toute possibilité de rupture profonde ;
 - une hauteur de talus H_t égale au niveau amont de la nappe H ;
 - un sol de nature marno-argileuse, caractérisé par un poids spécifique saturé de 19 kN/m^3 , une cohésion C' de 10 kPa et un angle de frottement interne ϕ' de 25° .
- Seules les caractéristiques à long terme du matériau ont été retenues, puisqu'elles correspondent aux conditions mêmes de l'expérimentation.

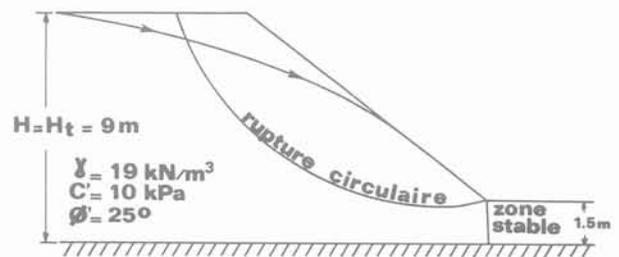


Fig. 12 — Hypothèses de l'étude de stabilité.

Les calculs ont été effectués selon la méthode des tranches de Bishop. Chaque coefficient de sécurité a été déterminé par voie informatique, à l'aide du programme Stabtal de notre laboratoire, mis en œuvre sur un ordinateur de bureau Hewlett-Packard.

4.2.2. Résultats et interprétations

Il convient d'abord de remarquer que tous les coefficients de sécurité restent nécessairement compris entre deux limites, l'une inférieure F_0 relative au talus sans éperons (nappe haute), l'autre supérieure F_1 relative à un massif sans nappe. Toutes deux sont fonction de la géométrie du domaine, donc de la pente du talus, mais la première F_0 dépend aussi des conditions hydrauliques initiales. Dans l'exemple que nous avons choisi, elles valent respectivement 1,16 et 1,52.

Quant à l'écart ($F_1 - F_0$), il chiffre le gain maximum possible de sécurité que l'on puisse attendre du drainage. Cette différence, qui dans le cas précédent vaut 0,36, oscille en général entre 0,25 et 0,80 ; c'est une fourchette tout à fait réaliste puisque l'on compte habituellement, par ces dispositifs, sur des augmentations réelles de l'ordre de quelques dixièmes.

Pour un système donné d'hypothèses numériques, le coefficient médian FM lorsque l'espacement entre éperons diminue donc que la nappe baisse, augmente depuis la valeur F_0 (E' infini) jusqu'à une limite théorique FM_1 correspondant à une tranche de terrain infiniment mince entre ouvrages jointifs ($E' = 0$). Selon que le volume de sol instable est entièrement dénoyé ou non, cette limite est égale ou reste inférieure à la valeur F_1 .

L'interprétation est identique à ce qui a été exposé pour les paramètres hydrauliques, ceux-ci étant remplacés par le coefficient F .

Des abaques d'efficacité sont tracés, avec l'espacement E' en abscisse, le coefficient F en ordonnée et diverses courbes, une par profondeur expérimentale P . D'où la figure 13, établie pour une pente de 2/3 et une distance d'alimentation de 21,25 m ;

- pour des éperons peu profonds (3,5 m), la forme de la courbe représentative est très voisine de celles de la figure 8, avec des limites analogues (point de départ FM_1 , asymptote F_0) ;
- au contraire, avec des éperons profonds (10,6 m) induisant un rabattement beaucoup plus intense, la zone des cercles critiques se trouve rapidement dénoyée et le coefficient FM devient égal à sa limite supérieure. La courbe se trouve ainsi écrêtée à la valeur F_1 ;
- entre ces extrêmes, des formes intermédiaires (5,2 m ; 7,1 m).

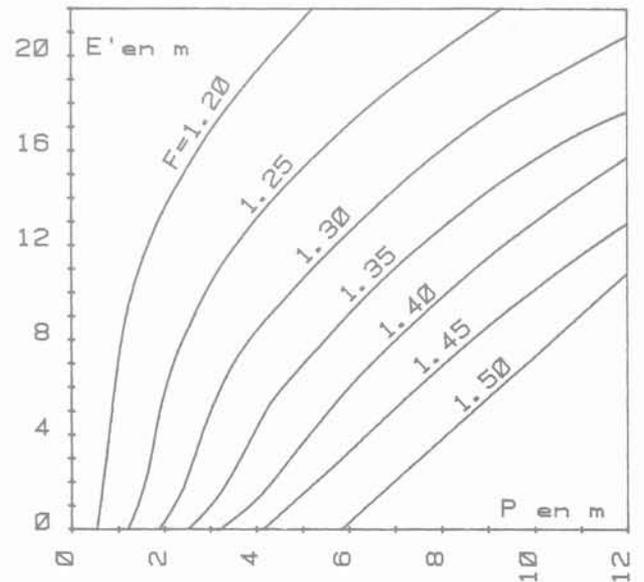


Fig. 14 — Abaque de dimensionnement en iso-coefficient F .

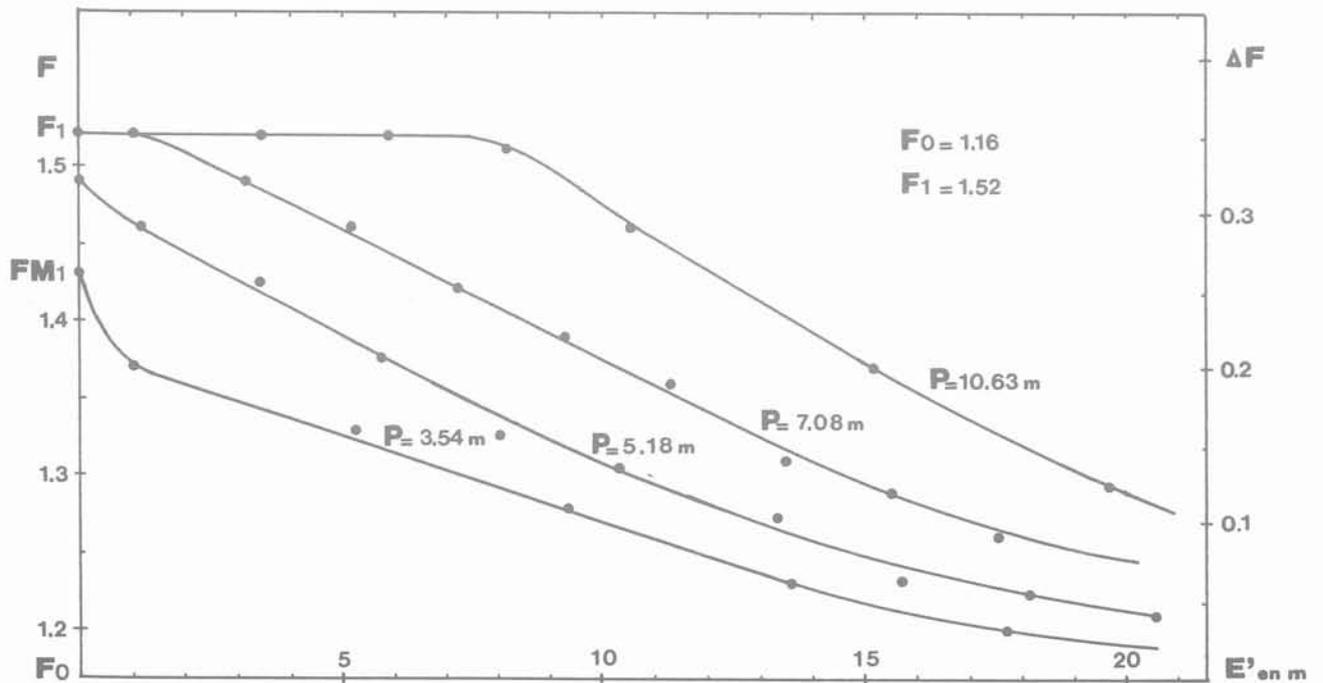


Fig. 13 — Abaque d'efficacité mécanique pour quatre profondeurs d'éperons.

On en retiendra, entre autres choses, qu'il devient parfois inutile de rapprocher les ouvrages en-deçà d'une certaine limite.

Il ne reste plus qu'à présenter l'abaque de dimensionnement en courbes d'iso-sécurité ($FM = cste$) ou d'isogain ($FM-F_0 = cste$), ainsi que les divers abaques d'optimisation avec passage au paramètre de dimensionnement d' . D'où la figure 14 et, après recherche des maximums, la figure résultante 15 sur laquelle, pour l'alimentation à 21,25 m, ont été reportés les résultats des trois pentes considérées.

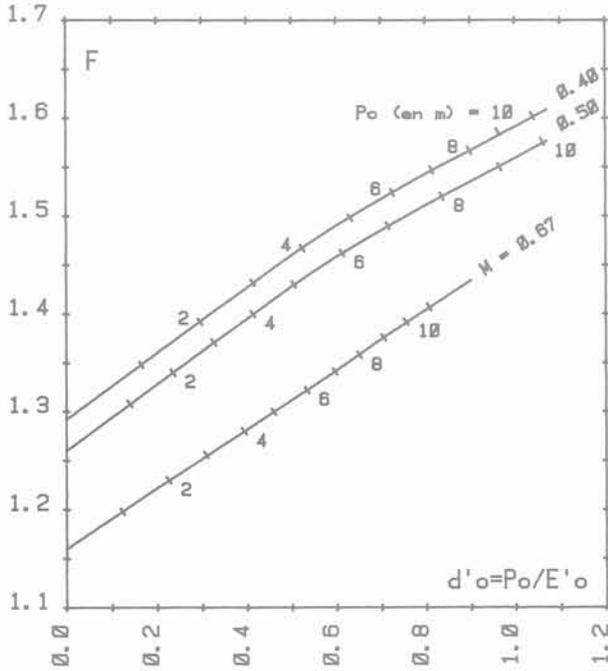


Fig. 15 — Abaque généralisé de dimensionnement optimal en fonction du coefficient de sécurité choisi (plan médian).

5. NOTION DE CARACTERISTIQUES MOYENNES ENTRE EPERONS

Tous ces résultats sont toutefois directement liés à une interprétation partielle, pessimiste des phénomènes. On peut en effet considérer à juste titre qu'un drainage conçu en fonction du seul plan médian risque d'être trop efficace (donc inutilement onéreux) puisque, de part et d'autre de ce plan, la nappe sera plus basse et de ce fait moins dangereuse.

Il est donc intéressant de tenter de caractériser la variation latérale d'une part de la forme de la surface libre, d'autre part des grandeurs qui s'y rattachent, dans le but de chercher à définir une notion de moyenne entre ouvrages, susceptible d'entraîner un dimensionnement moindre.

5.1. Résultats hydrauliques

5.1.1. Forme à trois dimensions de la surface libre

Recherchée dans un grand nombre de cas, elle a été définie comme l'ensemble des lignes phréatiques obtenues par son intersection avec la série des plans verticaux parallèles distants chacun d'environ 1 m (c), du plan médian 1 au plan axial n (fig. 2). Les coordonnées (r, h) des points des diverses lignes ont été relevées : c'est l'exemple du tableau II obtenu pour une pente de 2/3, une alimentation à 21,25 m et un espacement entre ouvrages de 22 m.

La figure 16 s'en déduit, construite en fonction de grandeurs relatives ($r/H, h/H$), après quotient par la hauteur d'alimentation amont H. Elle montre que les premières courbes (2 à 5), toutes convexes vers le haut, sont encore très proches de leur tracé médian (1) : la pente latérale de la surface libre reste faible, l'efficacité

$P/H = 0.58$	$E/H = 2.42$	$M = 0.67$	$R/H = 2.36$	$S/H = 0.00$	$K_{ev}/K_{eh} = 1.00$
--------------	--------------	------------	--------------	--------------	------------------------

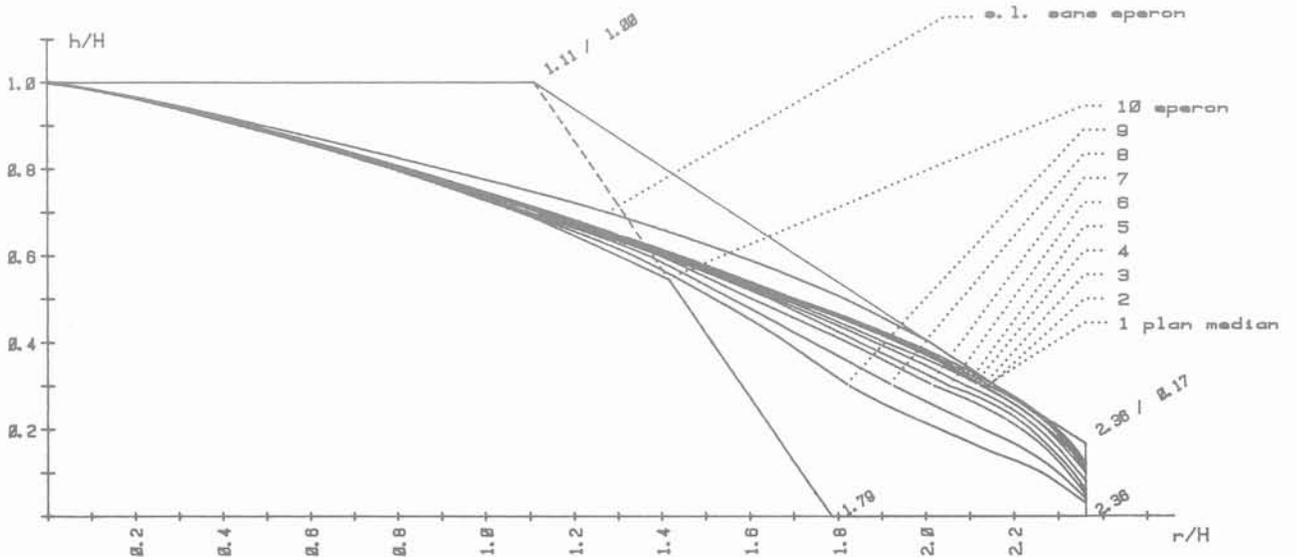


Fig. 16 — Forme de la surface libre entre deux éperons.

Tableau II. — Résultats analytiques.

FORME DE LA SURFACE LIBRE ENTRE DEUX ÉPERONS POUR UN ÉCARTEMENT E CONSTANT													
P = 5.18 m			E = 21.78 m			M = 0.67		R = 21.25 m		S = 6.00 m		Ksv/Ksh = 1.0	
numero	COORDONNEES (r,h) DES POINTS DES SURFACES LIBRES (VALEURS EXPERIMENTALES EN METRES)												
infini	r	0.00	4.43	8.12	11.49	14.17	16.36	18.10	état initial sans éperon				
	h	5.00	8.10	7.20	6.30	5.40	4.50	3.60					
1	r	0.00	4.19	7.44	10.34	12.99	15.35	17.66	19.43	20.67	21.00	21.25	plan médian (M)
	h	9.00	8.10	7.20	6.30	5.40	4.50	3.60	2.70	1.80	1.35	1.08	
2	r	0.00	4.15	7.40	10.30	12.87	15.30	17.54	19.31	20.61	21.02	21.25	
	h	9.00	8.10	7.20	6.30	5.40	4.50	3.60	2.70	1.80	1.35	1.06	
3	r	0.00	4.10	7.38	10.25	12.81	15.20	17.45	19.19	20.49	20.96	21.25	
	h	9.00	8.10	7.20	6.30	5.40	4.50	3.60	2.70	1.80	1.35	0.98	
4	r	0.00	4.06	7.36	10.20	12.76	15.09	17.19	19.13	20.46	20.88	21.25	
	h	9.00	8.10	7.20	6.30	5.40	4.50	3.60	2.70	1.80	1.35	0.90	
5	r	0.00	4.04	7.35	10.15	12.67	14.94	16.98	18.84	20.31	20.75	21.25	
	h	9.00	8.10	7.20	6.30	5.40	4.50	3.60	2.70	1.80	1.35	0.72	
6	r	0.00	4.02	7.32	10.10	12.64	14.84	16.66	18.50	20.15	20.60	21.00	21.25
	h	9.00	8.10	7.20	6.30	5.40	4.50	3.60	2.70	1.80	1.35	0.90	0.54
7	r	0.00	4.00	7.30	9.90	12.58	14.47	16.42	18.19	19.96	20.50	20.90	21.25
	h	9.00	8.10	7.20	6.30	5.40	4.50	3.60	2.70	1.80	1.35	0.90	0.45
8	r	0.00	3.98	7.20	9.80	12.35	14.06	15.71	17.36	19.19	20.08	20.70	21.25
	h	9.00	8.10	7.20	6.30	5.40	4.50	3.60	2.70	1.80	1.35	0.90	0.36
9	r	0.00	3.96	7.10	9.70	12.05	13.70	15.18	16.45	18.31	19.31	20.37	21.25
	h	9.00	8.10	7.20	6.30	5.40	4.50	3.60	2.70	1.80	1.35	0.90	0.27
10	r	0.00	3.43	8.62	12.05	12.76	plan axial (A)						
	h	9.00	8.24	6.75	5.25	4.90							

du drainage varie peu. Puis les courbes s'écartent, se creusent, devenant partiellement concaves vers le haut (6 à 9), ce qui traduit une augmentation importante du gradient de drainage.

Une observation essentielle est que cette évolution latérale répond à une règle unique, indépendante de la géométrie choisie (pente du talus, profondeur ou espacement des éperons). C'est ce qu'exprime la figure 17 : dans un repère gradué en pourcentages (pourcentages de l'espacement en abscisse et de la hauteur piézométrique médiane maximale en ordonnée) la forme

de l'intersection de différentes surfaces libres par un plan vertical quelconque, parallèle à la tranchée, reste invariante. Ce sera le fondement même de la définition d'un plan d'écoulement moyen.

5.1.2. Variation latérale des paramètres d'efficacité

Si l'on cherche à exprimer le mode de variation latérale des paramètres d'efficacité précédemment définis (par exemple, du rabattement moyen VS2), il résulte bien évidemment de ce qui vient d'être dit de la forme de la surface libre l'existence d'une loi d'évolution invariante.

Soit p le paramètre étudié,

et soit le système de coordonnées suivant :

— en abscisse, la distance latérale e au plan axial de l'éperon, exprimée en pourcentage de 0 (plan axial) à 50 % (plan médian),

— en ordonnée, le rapport (en %) $f = (p - pM) / (pA - pM)$ avec : p valeur variable du paramètre à la distance e, pA valeur du paramètre dans le plan axial (maximum), pM valeur du paramètre dans le plan médian (minimum).

L'ensemble des reports, pour des espacements, profondeurs, pentes et distances à l'alimentation variables, se regroupent effectivement sur une seule et même courbe, ce que montre la figure 18 établie pour le paramètre VS2.

La notion de valeur moyenne s'en déduit immédiate-

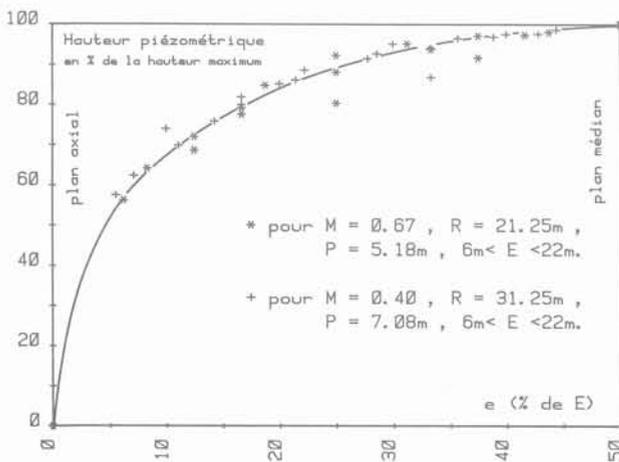


Fig. 17 — Loi de variation latérale de la piézométrie dans un plan vertical parallèle au talus.

ment, ainsi que la position du plan vertical où elle peut s'observer :

$$f_m \# 20 \%$$

$$e_m \# 17,5 \%$$

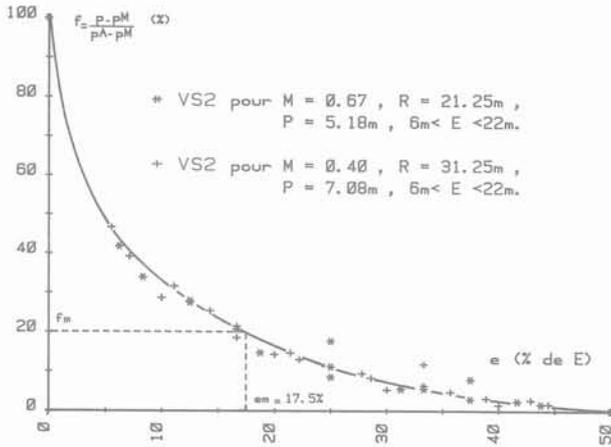


Fig. 18 — Loi de variation latérale des paramètres d'efficacité hydraulique.

Le plan d'écoulement moyen, tel qu'il vient d'être fixé, est donc unique et parfaitement localisé.

Dans la pratique, ce sont toujours les caractéristiques du plan médian (M) qui ont été principalement relevées sur les modèles, mais dont on a dit qu'elles étaient pessimistes. Il n'est donc pas sans intérêt de chercher à déduire de ces minimums pM connus des valeurs moyennes pm, ce que rend possible la propriété précédente.

Il vient en effet :

$$f_m = (p_m - p_M) / (p_A - p_M)$$

$$p_m = p_M (1 - f_m) + f_m \cdot p_A$$

En remarquant que la quantité $f_m \cdot p_A$ ne varie que très peu, la relation précédente est quasi linéaire, de pente $(1 - f_m)$ voisine de 0,8. Le calcul ne nécessite plus que la connaissance du paramètre pA dans le plan axial de l'éperon (ce que l'on peut également mesurer) ou, à défaut, de la valeur proche engendrée par un masque.

Ainsi, avec les données de l'exemple précédent, le rabattement moyen pA au droit de l'éperon vaut 2,57 m, et le rabattement créé par un masque 2,63 m. L'équation approchée peut donc s'écrire :

$$p_m = 0,8 p_M + 0,51$$

ou à défaut :

$$p_m = 0,8 p_M + 0,53$$

5.2 Approche mécanique

Le coefficient de sécurité F augmentant latéralement de part et d'autre du plan médian en raison de la baisse de la nappe, il est tentant de chercher à définir de façon analogue un coefficient Fm qui caractérise un état de stabilité moyenne entre ouvrages et à le calculer à partir de sa valeur FM dans le plan (M).

Cela peut se faire de deux façons distinctes :

- soit en étudiant la variation du coefficient F et en estimant sa valeur moyenne F'm,
- soit en le calculant directement dans le plan hydraulique moyen F'm.

5.2.1. Variation latérale du coefficient de sécurité F

La figure 19 propose, pour deux exemples différents, une représentation graphique des résultats trouvés.

En règle générale, la loi de variation latérale de la grandeur F est très voisine de celle qui caractérise les para-

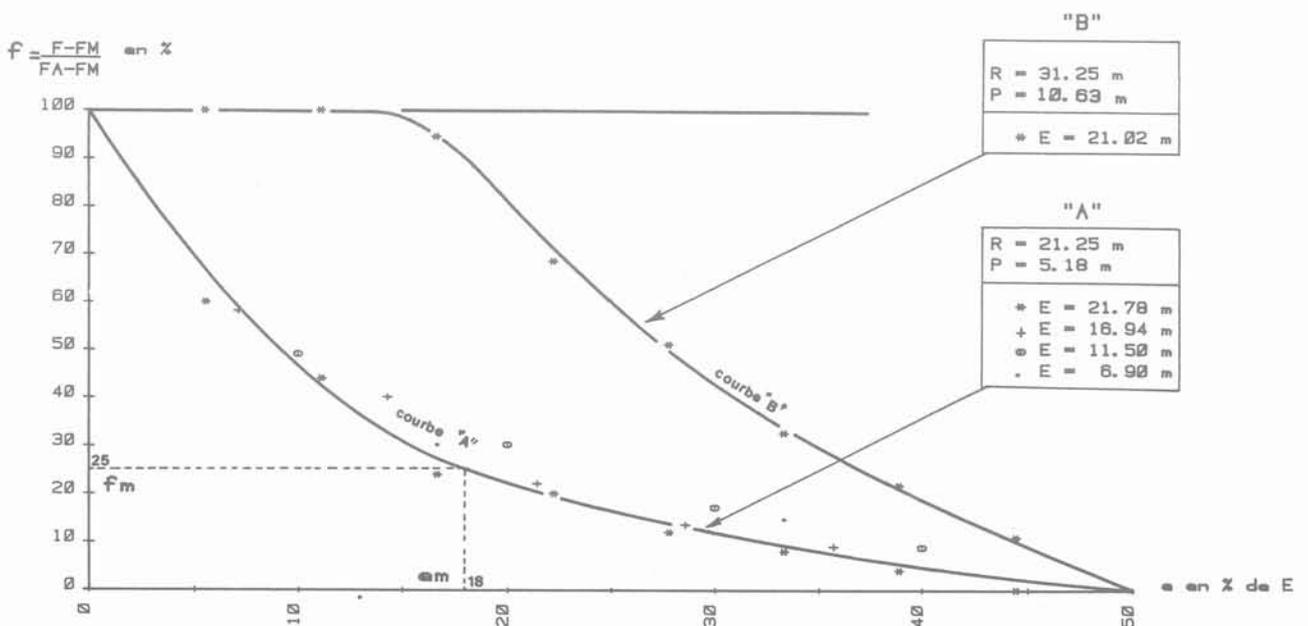


Fig. 19 — Lois de variation latérale du coefficient de sécurité F.

mètres hydrauliques (courbe « A »). Elle conduit aux moyennes suivantes :

- fm # 25 %
- em # 18 %

En appelant FA le coefficient théorique correspondant à la ligne phréatique du plan axial, la relation approchée liant F'm à FM s'écrit alors :

$$F'm = FM (1 - fm) + fm \cdot FA$$

soit

$$F'm = 0,75 FM + 0,25 FA$$

et, en observant que la grandeur FA généralement inconnue est toujours très voisine de FM1, coefficient de sécurité connu relatif à des éperons jointifs :

$$F'm = FM (1 - fm) + fm \cdot FM1$$

soit

$$F'm = 0,75 FM + 0,25 FM1$$

Toutefois, dans certains cas particuliers, lorsque la nappe est initialement basse et le drainage intense, la zone à risques de glissement peut se trouver dénoyée sur une certaine distance de part et d'autre du plan (A). Le coefficient F prend alors la valeur constante F1 (coefficient de sécurité limite d'un massif sans nappe), ce qui se traduit sur la courbe par une branche horizontale plus ou moins développée (courbe « B »).

Il s'en suit que le rapport moyen fm augmente jusqu'à des taux généralement compris entre 40 et 60 %, selon la manière dont il est défini.

Mais en pratique, les coefficients obtenus avec ces divers pourcentages (25 ; 40 ou 60 %) ne diffèrent entre eux que de quelques centièmes (tab. III). La recherche d'une sécurité suffisante conseille donc de s'en tenir, dans tous les cas, à la solution la plus simple et la plus pessimiste : fm = 25 %.

Tableau III. — Comparaison entre différentes évaluations du coefficient de sécurité F.

COURBE "A"	M = 2/3	R = 21,25 m	P = 5,18 m	E = 21,78 m
	FM = 1,21	FA = 1,46	FM1 = 1,49	
	- F'm calculé avec FA pour fm = 0,25	1,27		
	- F'm calculé avec FM1 pour fm = 0,25	1,28		
- F'm calculé au niveau du plan hydraulique moyen	1,28			
COURBE "B"	M = 2/3	R = 31,25 m	P = 10,63 m	E = 21,02 m
	FM = 1,43	FA = 1,52	FM1 = 1,52	
	- F'm calculé pour fm = 0,25	1,45		
	- F'm calculé pour fm = 0,40	1,47		
- F'm calculé pour fm = 0,60	1,48			
- F'm	1,50			

5.2.2. Coefficient de sécurité relatif au plan hydraulique moyen

Le même tableau III montre là encore une très bonne concordance entre ce nouveau coefficient F'm et les valeurs F'm précédemment calculées.

Cela confirme donc la validité de la loi proposée, dans sa formulation définitive par défaut :

$$F'm = FM (1 - fm) + fm \cdot FM1 \text{ avec } fm = 0,25$$

5.3. Conséquences sur le dimensionnement

Tous les abaques de dimensionnement et d'optimisation définis ci-dessus peuvent être retracés à partir de valeurs moyennes aisément calculables.

Ce sont par exemple les deux abaques d'optimisation des figures 20 et 21, relatifs respectivement à chacun des deux paramètres VS2 et F.

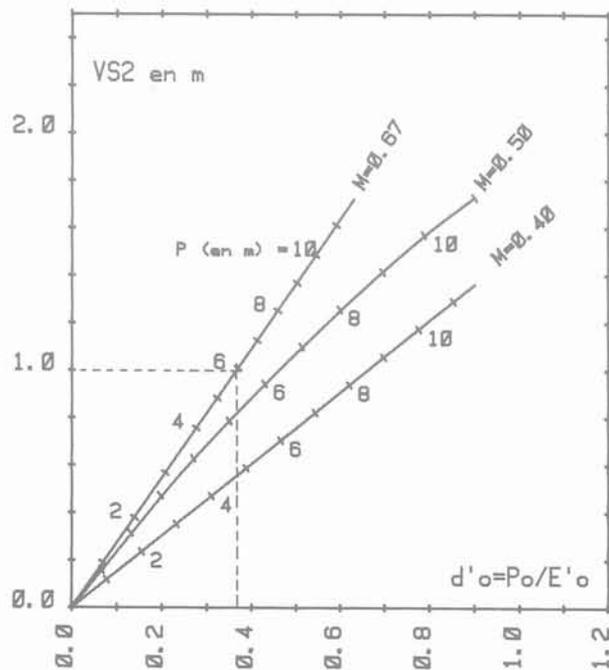


Fig. 20 — Abaque généralisé de dimensionnement optimal en fonction du rabattement recherché (plan moyen).

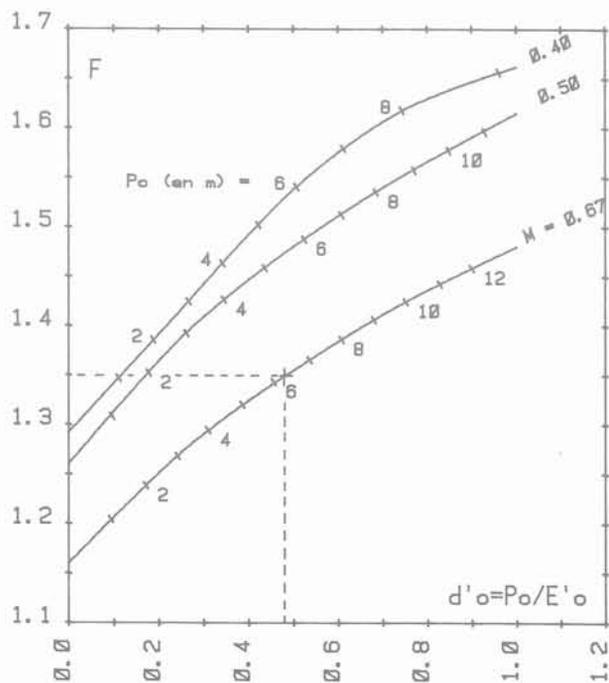


Fig. 21 — Abaque généralisé de dimensionnement optimal en fonction du coefficient de sécurité choisi (plan moyen).

Ils montrent que, sous un talus de pente 2/3 :

— une baisse moyenne de 1 m de la nappe exige des éperons de 5,8 m distants de 16,0 m, alors qu'un rabattement analogue au niveau du plan médian nécessiterait des profondeurs de 6,5 m et des espacements de 11,9 m,

— l'obtention d'un coefficient de sécurité de 1,35 demande la mise en place d'éperons de 7,5 m tous les 12,0 m, ou de 6,3 m tous les 13,2 m, selon qu'il est recherché au niveau du plan médian ou du plan moyen.

6. CONCLUSIONS

Un acquis essentiel de cette étude est évidemment la possibilité de construire des abaques qui répondent à un besoin réel, dans la mesure où ils permettent un dimensionnement des systèmes de drainage par éperons parallèles. Toutefois, il ne faudrait pas perdre de vue qu'ils sont fondés sur un ensemble d'hypothèses simplificatrices permettant la simulation de schémas théoriques, mais s'éloignant de ce fait de la complexité des données naturelles. Aussi diverses extensions ont-elles été traitées, dans le but de faciliter l'extrapolation des résultats présentés.

La limite de validité la plus sérieuse provient très certainement de la nature du massif que l'on a supposé homogène et isotrope. C'est une hypothèse souvent en défaut et des simulations effectuées avec un rapport d'anisotropie K_{sv}/K_{sh} de 0,1 ont montré que ce facteur était défavorable à l'obtention d'un drainage efficace. Dans un tel cas, les abaques devront être utilisés avec prudence. Quant au contraste de perméabilité entre le filtre et le sol, il est généralement suffisamment grand pour n'introduire aucune perturbation sensible.

Le choix d'une limite d'alimentation arrière peut être discuté. Des manipulations ont toutefois montré que dans la zone du talus les réseaux d'écoulements obtenus étaient très voisins de ceux que donnerait une alimentation par infiltration verticale.

Des profondeurs de substratum variables (de 0 à 40 m) ont également été envisagées : ce facteur n'a en réalité qu'une faible importance et le cas de la profondeur nulle conduit de surcroît aux résultats les plus pessimistes.

En fin de compte, la connaissance du comportement de la nappe dans le plan vertical médian, sis à mi-distance des deux éperons successifs, associée à l'existence d'un plan moyen bien défini dont les propriétés sont désormais connues, permet une approche réaliste du dimensionnement de ces ouvrages.

Ainsi ce travail souhaite-t-il apporter quelques informations quantitatives utiles dans un domaine où l'empirisme était jusqu'ici de règle.

ANNEXE

7. NOTATIONS

(A) plan axial d'un éperon

ap	côté réel de la maille sur papier (modèle tri-dimensionnel)
ar, a'r	espacements réels entre coupes (modèle tri-dimensionnel)
c	écartement entre les coupes verticales transverses
C'	cohésion à long terme du sol
Co	conductivité électrique
d, D	dimensions, sur modèle, réelle
d', d'o	paramètre de dimensionnement d'un éperon (P/E'), optimal (Po/E'o)
D	encastrement d'un éperon dans le sol
e	abscisse par rapport au plan axial d'un plan vertical transverse
em	abscisse du plan vertical transverse moyen
E, E'	espacements entre deux éperons (entre axes, entre bords internes)
Eo, E'o	espacements optima des éperons
f	expression relative d'un paramètre d'efficacité p
fm	expression relative moyenne d'un paramètre d'efficacité p
F	coefficient de sécurité d'un talus
Fm	coefficient de sécurité moyen
F'm	valeur issue d'une moyenne de coefficients de sécurité
F''m	valeur issue d'un calcul dans le plan hydraulique moyen
FA, FM	coefficients de sécurité dans le plan axial, médian
FM1	coefficients de sécurité maximum dans le plan médian
Fo, F1	coefficients de sécurité limites (talus sans éperons, sans nappe)
h	ordonnée d'un point courant d'une ligne phréatique (abscisse r)
H	potentiel hydraulique, en particulier d'alimentation amont
He, Ht	hauteur d'un éperon drainant, d'un talus
I	intensité électrique
K	perméabilité
Kp	perméabilité définie selon chaque plan de coupe
Kr, K'r	perméabilités définies perpendiculairement à chaque plan de coupe
Ksh, Ksv	perméabilité horizontale, verticale du sol en place
le, lt	largeur d'un éperon, d'une tranchée drainante
L	longueur horizontale de la ligne de plus grande pente d'un talus
M	pente d'un talus
(M)	plan médian de symétrie entre éperons
n	nombre de coupes verticales transverses
p	paramètre d'efficacité
pm	valeur moyenne d'un paramètre d'efficacité
pA, pM	valeur d'un paramètre d'efficacité dans le plan axial, médian
P, Po	profondeur d'un éperon dans un massif, profondeur optimale
Q	débit
r	abscisse d'un point courant d'une ligne phréatique (ordonnée h)
R	rayon d'action (distance à l'alimentation amont)

R	résistance électrique
R _p	résistivité « bidimensionnelle » du papier conducteur
R _r , R' _r	résistances du réseau de part et d'autre de chaque coupe
S	profondeur d'un substratum imperméable
S ₂	surface dénoyée partielle, limitée à la zone du talus
U	potentiel électrique
VS ₂	rabattement moyen de la nappe dans la zone du talus
γ	poids spécifique du sol en place
ϕ'	angle de frottement interne à long terme du sol

BIBLIOGRAPHIE

1. BLIN-LACROIX J.-L., BOUDON A., DEFEZ J., PROST J.-P. (1977), *Un modèle analogique mixte pour la résolution des problèmes d'écoulement à trois dimensions*. Sciences de la Terre — tome XXI, n° 4 — Nancy (décembre 1977) — pages 357-373.
2. DESNOUVAUX F. (1983), *Drainage et stabilisation des pentes par la technique des éperons — Simulation du mécanisme des écoulements sur modèles tridimensionnels analogiques*. Thèse présentée à l'Université de Nancy I, soutenue le 4 novembre 1983, pour obtenir le grade de Docteur de 3^e cycle.
3. HUTCHINSON J.N. (1977), *Assessment of the effectiveness of corrective measures in relation to geological conditions and types of slopes movement*. Bull. I.A.E.G. — n° 16 — Krefeld (décembre 1977) — pages 131-155.
4. KENNEY T.C., PAZIN M., CHOI W.S. (1977), *Design of horizontal drains for soils slopes*. Journ. of the Geotech. Enginr. Div. — A.S.C.E. (novembre 1977) — pages 1311-1323.
5. LEONARDS G.-A. et al. (1968), Chap. 3 : *Drainage — Les fondations*. Dunod — Paris — pages 237-346.
6. RAT M. (1970), *Drainage et Rabattement : étude théorique*. Hydraulique des sols — Bull. Liaison des Labos P. et Ch. — Numéro spécial N — Paris (Avril 1970) — pages 113-126.
7. RAT M. (1976), *Drainages — Stabilité des Talus*. Bull. Liaison des Labos P. et Ch. — Numéro spécial III — Paris (décembre 1976) — pages 151-160.