

la perméabilité et l'injectabilité des massifs rocheux fissurés

fissured rock masses permeability and groutability

G. LOMBARDI*

Rev. Franç. Géotech. n° 51, pp. 5-29 (avril 1990)

Résumé

Les travaux d'injection des massifs rocheux sont réalisés trop souvent d'une façon empirique et guidés par des concepts aujourd'hui révolus.

La récente mise au point d'un modèle de calcul dit FES (pour roche Fissurée, Elastique, Saturée) permet désormais de procéder à l'étude rationnelle des projets et des travaux d'injection.

On mentionne tout d'abord les principes qui ont régi l'établissement du modèle tant du point de vue du comportement statique qu'hydraulique.

On examine ensuite les paramètres qui déterminent l'écoulement le long des surfaces de discontinuité et, partant, la perméabilité du massif rocheux.

Les propriétés rhéologiques des produits d'injection et en particulier des coulis de ciment font l'objet d'un rappel.

Les conditions de pénétrabilité de ces coulis dans un massif rocheux en découlent, qui sont fonction d'un certain nombre de variables. Le problème de l'hydrofracturation est mentionné au passage.

On étudie ensuite le déroulement des opérations d'injection tout en formulant un certain nombre de recommandations.

On indique enfin les limites pratiques de l'injection de coulis de ciment dans les massifs rocheux.

Abstract

Rock masses grouting are too often made in an empiric way using past concepts.

The new model of calculation named FES (for Fissured Elastic Saturated rock mass) allows us to make rational study for designs and grouting works.

At the beginning the principles for the model stating are presented for static behaviour and for hydraulic behaviour. Then flow parameters along discontinuity surfaces are investigated and therefore the rock mass permeability. Rheological properties of grouting materials and particularly of cement grouts are just recalled.

Penetrability conditions of those grouts in a rock mass are given as functions of different variables. Mention of hydraulic fracturing is made. The process of grouting is studied and recommandations are given. At last cement grouts practical limits are given for rock masses grouting.

* Visa Ciseri, Locarno 6601, Suisse.

1. INTRODUCTION

Au sujet de l'injection des massifs rocheux les opinions les plus disparates ont cours, alors qu'une unanimité devrait pouvoir se faire sur la base de certaines considérations de nature scientifique.

Il est de notre propos aujourd'hui d'examiner les problèmes liés à la perméabilité des massifs rocheux fissurés ainsi que les possibilités qui existent de la modifier dans le but de contribuer si possible à un rapprochement des points de vue.

Ce faisant, nous trouverons d'une part confirmation d'un certain nombre de faits bien connus des « injecteurs » depuis fort longtemps, encore qu'établis de façon purement empirique, mais d'autre part nous pourrions également découvrir quelques aspects nouveaux du problème.

Dans cette étude, nous devons nous limiter à un choix particulier de roches tant le nombre de cas différents rencontrés dans la nature est grand. Nous éliminerons ainsi de nos soucis les roches sujettes à phénomènes karstiques, mais aussi les roches dont la matrice elle-même est susceptible de contribuer de manière déterminante à la perméabilité de l'ensemble. C'est donc la perméabilité par fissuration qui sera l'objet de cet exposé.

Les granites, les gneiss ou les calcaires correspondent bien au type de roche que nous voulons examiner. Ils ne sont pas, et de loin, les seuls à satisfaire au modèle idéalisé que nous avons ainsi indirectement défini.

Signalons encore que bien des résultats obtenus s'appliquent également à l'injection de masses de béton fissurées tels des barrages anciens à conforter.

2. LE MODÈLE FES POUR MASSIF ROCHEUX ÉLASTIQUE FISSURÉ SATURÉ

Le modèle mathématique appelé FES pour « roche fissurée élastique saturée », mis au point récemment, se prête fort bien à l'étude des problèmes de perméabilité du massif rocheux fissuré, tout particulièrement en relation avec des projets de génie civil*. Il n'est pas dans nos intentions d'établir aujourd'hui ce modèle, qui a été présenté en d'autres circonstances (2), mais simplement d'en montrer son applicabilité aux questions qui nous occupent. Pour construire ce modèle, certaines hypothèses restrictives ont dû être faites, qu'il convient de rappeler brièvement.

Nous étudions donc un massif rocheux fissuré, mais nous ne considérerons que des roches dont la matrice présente, dans le domaine d'efforts considéré, un comportement suffisamment élastique pour nous autoriser à négliger les phénomènes de plasticité et de viscosité de la roche elle-même.

Ainsi que nous venons de le signaler, nous supposons encore que la perméabilité de la matrice rocheuse peut être négligée.

Il est bien connu que toute masse rocheuse est naturellement subdivisée par un ou plusieurs systèmes de discontinuités, telles que surfaces interstratigraphiques, de schistosité et fissures de divers types. Par définition, donc, notre massif est composé d'un certain nombre de blocs rocheux séparés les uns des autres par des surfaces que l'on peut supposer planes, au moins localement — mais rugueuses et ondulées —. Un élément essentiel pour le comportement des massifs rocheux découle de la présence ou non d'eau dans les fissures ou discontinuités.

Ceci étant, il convient tout d'abord d'examiner ce qu'est une fissure. Il serait certes un peu simpliste de s'imaginer — encore que parfois il faille en faire l'hypothèse — que la fissure est un volume vide, c'est-à-dire rempli d'air ou d'eau, d'une étendue infinie et d'une épaisseur très faible, mais constante. Nous devons au contraire nous imaginer une fissure comme un accident ou une solution de continuité de la masse rocheuse. Le long de cette surface, les épontes de la fissure sont souvent en contact, car les contraintes présentes dans le massif doivent se transmettre d'un côté à l'autre de la discontinuité. Par contre, certaines zones de cette même surface ou plan sont réellement ouvertes, les deux épontes étant séparées par un vide. Nous négligerons ici par simplicité — mais cela peut évidemment être pris en compte dans les calculs — qu'il peut exister, le long de telles discontinuités, des remplissages d'argile, de mylonite ou de dépôts minéraux dont les caractéristiques mécaniques diffèrent de celles de la matrice rocheuse. De même, une certaine épaisseur de roche le long des épontes peut être plus ou moins altérée et présenter donc des caractéristiques mécaniques différentes de celles de la roche mère. Pour ce qui est de la topologie de la surface, nous avons été amenés à admettre que les diverses zones en contact représentent des flots, tandis que les zones ouvertes sont jointives. On pourrait même dire qu'en général, on a affaire à une seule zone ouverte continue, mais à connexions multiples. Dans le cas contraire, la discontinuité serait représentée par une série de « poches » vides, fermées et isolées les unes des autres ; elle ne serait alors pas perméable à l'eau et ne nous intéresserait pas ici. La figure 1 représente la vue en plan et une coupe d'une telle structure que l'on appellera génériquement « fissure ». Parfois, on parlera des zones en contact comme de « ponts de matière ».

On conçoit aisément que l'étendue des zones en contact peut varier en fonction de la charge qui est transmise à travers le plan de la discontinuité. On passe d'une fissure entièrement ouverte où, par définition, seuls quelques points des deux épontes se touchent, à une fissure entièrement fermée, par application d'une compression suffisamment élevée, ainsi que l'indique la figure 2. Le degré de fermeture ou de serrage de la fissure passe ainsi de « 0 » à « 1 ». (Pour le faire parfaitement, il faudra parfois dépasser la limite

* Dans le domaine des mines et dans le domaine pétrolier des points de vue différents peuvent prévaloir.

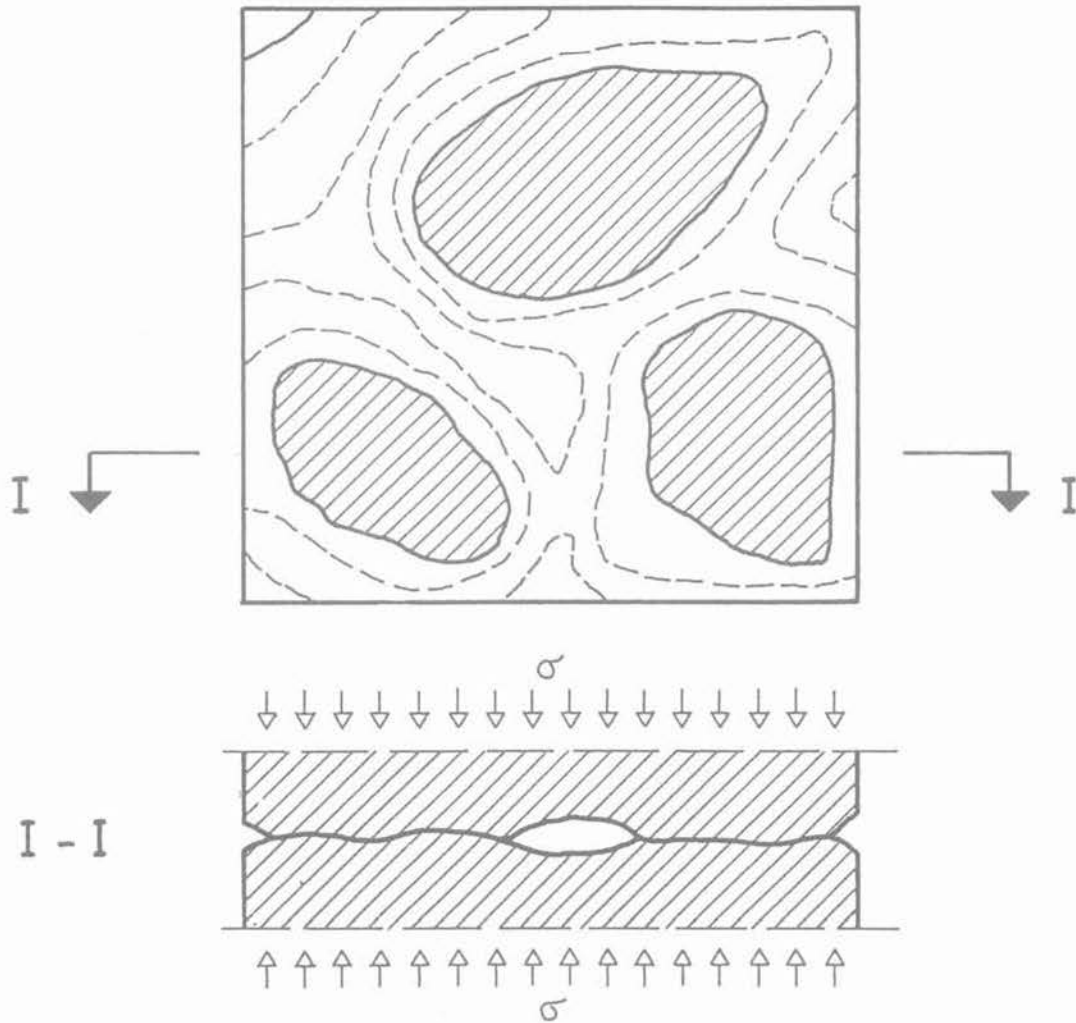


Fig. 1. — Massif élastique fissuré. - Plan topographique et coupe d'une fissure soumise à compression.
 Fig. 1. — Fissured elastic solid mass. - Plan and cross section of a fissure subjected to compression.

élastique et prendre en compte des déformations non réversibles). La figure 3 montre, à titre d'exemple, la façon selon laquelle une surface ondulée d'un corps élastique peut être aplatie par l'application d'une contrainte de compression. Si l'on établit par calcul la relation entre la contrainte de compression et la déformation de la zone de roche encaissant une fissure, on obtient le graphique de la figure 4 qui est valable en l'absence de pression d'eau interstitielle et qui se compose essentiellement de trois sections :

- le tronçon D-O correspond à une fissure entièrement ouverte sans aucun point de contact entre les deux épontes ; ce n'est qu'au point O qu'un premier contact entre les deux épontes s'établit ;
- du point O au point A, nous constatons une relation d'allure parabolique, qui met en évidence une augmentation progressive de la rigidité de l'ensemble en fonction de la contrainte appliquée ; au point A, la fissure est théoriquement entièrement fermée et,

— à partir de ce point en direction de B, le massif suit approximativement une loi linéaire définie par les propriétés élastiques de la matrice rocheuse. La fissure complètement fermée ne joue plus aucun rôle.

En fait, il s'agit du phénomène bien connu — et souvent constaté lors d'essais — de la fermeture progressive ou du serrage des fissures dans un massif rocheux comprimé.

Si nous prenons en compte maintenant le fait que les fissures peuvent être remplies d'eau et que celle-ci peut se trouver sous une pression dite neutre, nous pouvons alors, à partir du graphique de la figure précédente, construire facilement le modèle complet FES pour un massif rocheux élastique fissuré, ainsi que cela ressort de la figure 5.

Le modèle représenté par cette figure met en relation les 4 variables fondamentales du comportement du massif rocheux, et plus exactement :

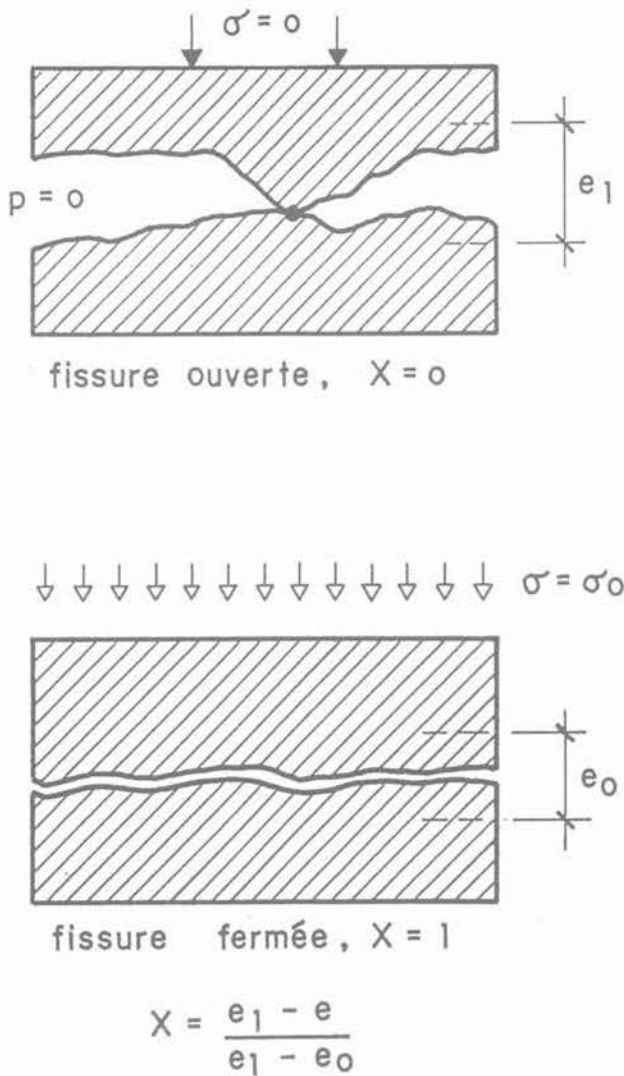


Fig. 2. — Degrés x de fermeture de la fissure (Serrage).
Fig. 2. — Relative closing x of the fissure.

- la contrainte totale « σ » qui s'applique au massif ;
- la déformation totale du massif « ϵ » ;
- la pression neutre interstitielle « p » et ;
- le degré de fermeture des fissures « x ».

Chaque point du graphique représente un état de contrainte caractérisé par les valeurs des 4 paramètres ou variables que nous venons de nommer. On constate alors que, à gauche de la ligne O-C, les fissures sont complètement ouvertes, tandis qu'elles se ferment progressivement à partir de cette ligne vers la droite et qu'elles le sont complètement le long de A-B. La courbe DOAB représente le comportement de la roche sèche, ainsi que nous venons de le voir*. Chaque courbe semblable à celle-ci, indiquée dans la figure, mais décalée vers la droite et vers le haut, correspond à une valeur constante de la pression neutre. Nous pouvons aisément nous rendre compte que le modèle FES ainsi représenté permet de saisir intuitivement et très facilement nombre de propriétés inté-

ressantes même fort complexes des massifs rocheux fissurés.

On peut en particulier définir, en chaque point de la figure 5, quatre directions spécialement significatives, ainsi que cela ressort de la figure 6 :

- tout mouvement dans la direction (1) correspond à une variation de la contrainte totale dans le massif non drainé. La déformation a lieu à peu près selon le module d'élasticité de la matrice rocheuse. Il se produit une variation évidemment concomitante de la pression neutre ; la pression effective reste constante ;
- une variation selon la direction (2) correspond à un changement de la contrainte totale, à pression neutre constante. Le module de déformabilité est alors beaucoup plus faible que dans le cas précédent. On retrouve là une explication de la différence sensible souvent constatée entre les modules d'élasticité statique et dynamique d'un massif rocheux saturé ;
- une variation dans la direction (3) représente un drainage du massif à charge totale constante. C'est le cas, désormais classique, du tassement de la région du barrage de Zeuzier en Suisse à la suite de l'effet drainant de la galerie du Rawyl (5) ;
- la direction (4) représente une variation concomitante de la contrainte de compression et de la pression neutre, de sorte que la déformation reste constante ; c'est une variation d'état qui a souvent lieu dans le sens horizontal à une certaine profondeur sous la surface du terrain.

La combinaison des directions (1) et (3) pour obtenir la direction (2) est représentée dans la même figure pour le point I ; il s'agit d'une variation d'état que l'on peut définir comme une « consolidation » du massif.

Les applications pratiques et théoriques de ce modèle sont fort nombreuses et intéressantes, mais nous allons délaisser ces aspects et nous concentrer — conformément au sujet de notre exposé — sur les problèmes hydrauliques de perméabilité et d'injectabilité.

3. LA PERMÉABILITÉ D'UN MASSIF ROCHEUX FISSURÉ

Alors que nous venons d'examiner le comportement statique du massif dans le sens perpendiculaire à la surface de discontinuité, il va de soi que les phénomènes de percolation ont lieu, eux, essentiellement selon la direction des plans de discontinuité eux-mêmes. Pour pouvoir rendre ces phénomènes accessibles au calcul, il est indispensable de procéder à une certaine modélisation de la surface de discontinuité dans son plan. On a choisi la configuration indiquée à la figure 7. Les zones de contact sont supposées être de forme hexagonale, régulièrement espacées et séparées les unes des autres par des canaux où l'eau peut circuler. Il est bien évident qu'aucune roche réelle ne correspond à un schéma aussi simplifié, régulier et géométrique, mais on peut se rendre aisément que ce modèle permet néanmoins d'obtenir d'excellents résultats ou, pour le moins, de se faire

* En fait, cette courbe vaut également en présence d'eau aussi longtemps que le massif n'est pas totalement saturé.

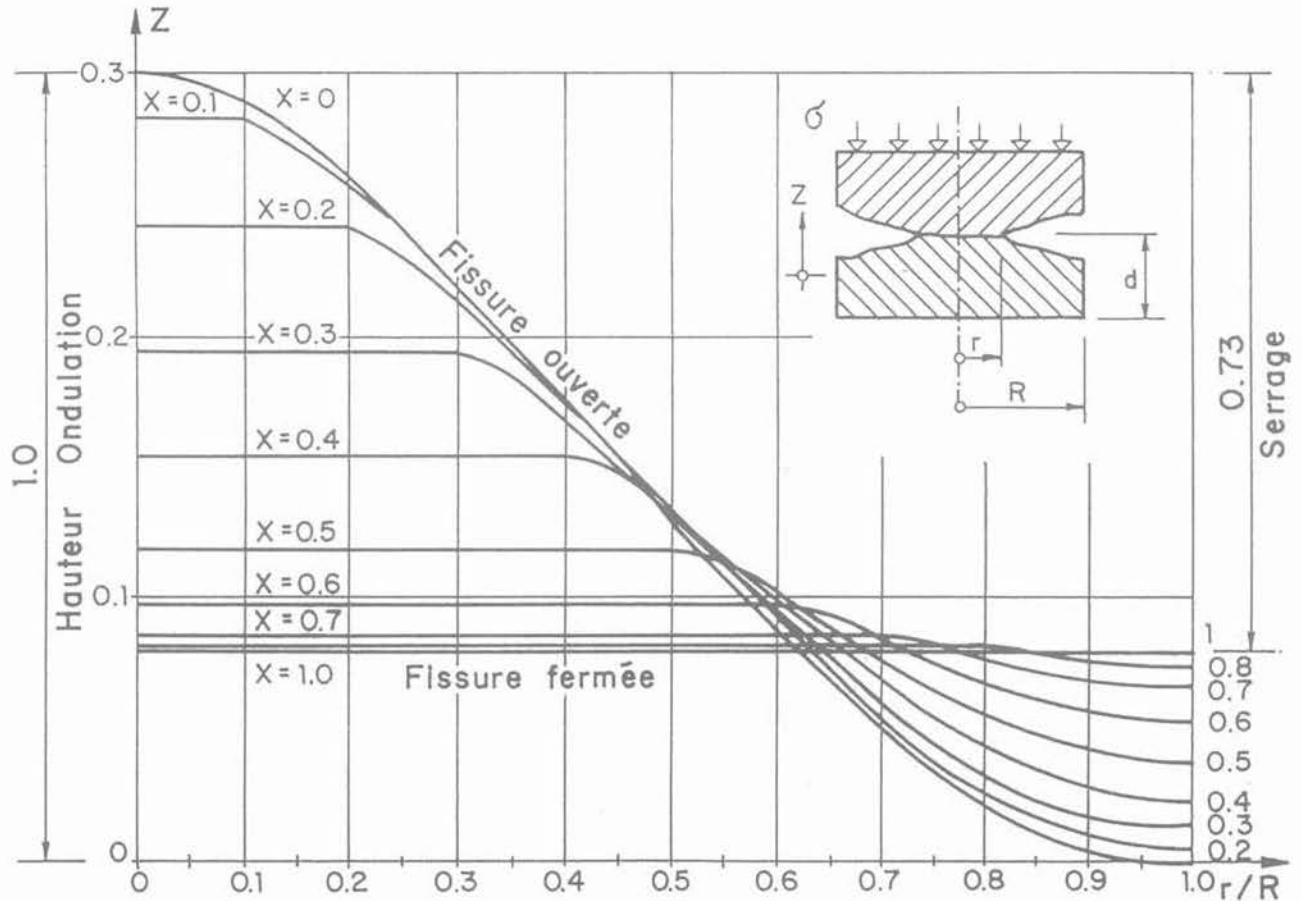


Fig. 3. — Formes successives d'une éponte ondulée lors de l'aplatissement sous l'effet d'une contrainte de compression (x = degré de fermeture).

Fig. 3. — Successive shapes of undulated sides of a fissure during the closing induced by a compression stress (x = relative closing).

Hauteur ondulation = height of undulation
 Fissure ouverte = open fissure

Fissure fermée = closed fissure
 Serrage = closing.

une idée fort claire des relations fonctionnelles liées à la percolation de l'eau dans le plan d'une fissure.

L'accroissement de la contrainte effective — qui n'est que la différence entre la contrainte totale et la pression neutre — fait que les zones en contact supposées hexagonales augmentent de surface de façon homothétique, et donc que les canaux de circulation se rétrécissent alors même que leur épaisseur diminue progressivement. Il se produit donc un double effet qui étrangle le débit d'écoulement. Le fait fondamental que nous devons retenir — et que nous allons examiner plus en détail dans ce qui suit — est que la perméabilité dans le plan d'une fissure et, partant, la perméabilité de fissuration d'un massif rocheux, sont influencées dans de très fortes proportions par la contrainte effective.

La figure 8 montre un exemple de l'énorme variation de la perméabilité en fonction de la contrainte effective pour des fissures d'épaisseurs différentes.

Ce phénomène explique — toutes choses égales par ailleurs — que dans les massifs rocheux, la perméa-

bilité tend à diminuer très rapidement en profondeur, ce qui limite très fortement les débits d'eau qui pénètrent dans les ouvrages souterrains profonds. Seules les discontinuités les plus importantes comptent alors.

Il explique également en partie l'anisotropie de la perméabilité des massifs rocheux (p. ex. perméabilité verticale différente de la perméabilité horizontale).

Lors de la réalisation d'ouvrages de génie civil, il est souvent nécessaire de modifier les caractéristiques de perméabilité du massif rocheux.

L'augmentation de la perméabilité d'ensemble du massif peut se faire à l'aide de perforations, ou si l'on préfère, de drains forés ; mais alors la perméabilité locale diminue. En effet, grâce au drainage, on réduit la pression interstitielle et l'on augmente de ce fait la pression effective qui serre les fissures (voir fig. 9).

Le drainage produit donc deux effets de sens inverse qu'il faut évaluer attentivement de cas en cas. Mais nous allons délaissier l'étude de ce problème.

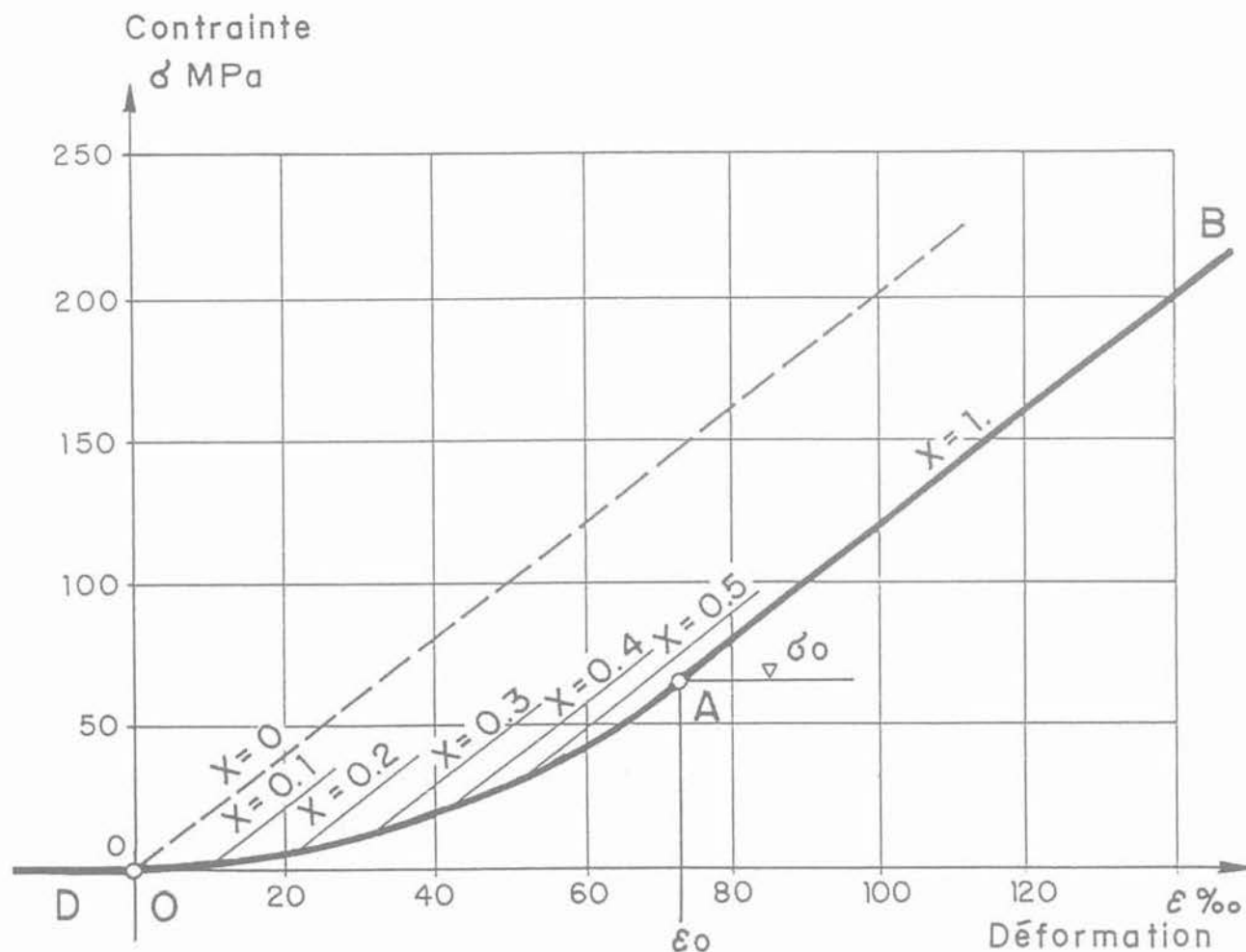


Fig. 4. — Relation contrainte-déformation d'un massif fissuré sec (Courbe de serrage) : x = degré de fermeture de la fissure.
 Fig. 4. — Stress-strain relationship for a dry fissured solid mass (closing curve) x = relative closing of the fissure.

A l'inverse, pour diminuer la perméabilité, on a habituellement recours à la technique de l'injection.

4. LES PRODUITS D'INJECTION

Dans le but d'imperméabiliser et de consolider le massif rocheux — car les deux choses vont souvent de pair — on a injecté des produits très nombreux aux propriétés fort diverses. Le principe même de l'injection implique qu'il faut injecter un produit qui possède à cet instant les propriétés d'un corps liquide ou pseudo-liquide, mais qui, avec le temps, se rigidifie en se transformant en corps solide ou pseudo-solide.

Il peut toutefois y avoir des exceptions. Ainsi, pour éviter que l'air comprimé sous haute pression ne s'échappe de chambres souterraines, on peut injecter en permanence de l'eau dans le massif rocheux de couverture. L'énorme différence de viscosité entre l'air et l'eau fait que l'eau forme pratiquement bouchon et réduit ainsi la perméabilité du massif à l'air.

L'eau est également injectée dans les roches dans le but de procéder par exemple à des essais de type Lugeon.

Nous ne mentionnons qu'en passant la possibilité d'imperméabiliser le massif par congélation de l'eau qui circule dans les discontinuités.

Les propriétés rhéologiques des produits injectés sont déterminantes pour le succès de l'opération.

Nous devons, dans nos considérations, tenir compte de l'existence de corps *newtoniens* qui ne présentent pas de cohésion, mais seulement une viscosité, et de corps de type *Bingham* qui, eux, possèdent un seuil de cohésion, ainsi que cela ressort de la figure 10.

On peut facilement montrer par ailleurs qu'un corps qui posséderait une friction interne — tel un mortier de sable à faible teneur d'eau — ne saurait être injecté dans une fissure.

Le produit d'injection le plus courant est bien entendu le coulis de ciment qui, en fait, n'est pas un liquide,

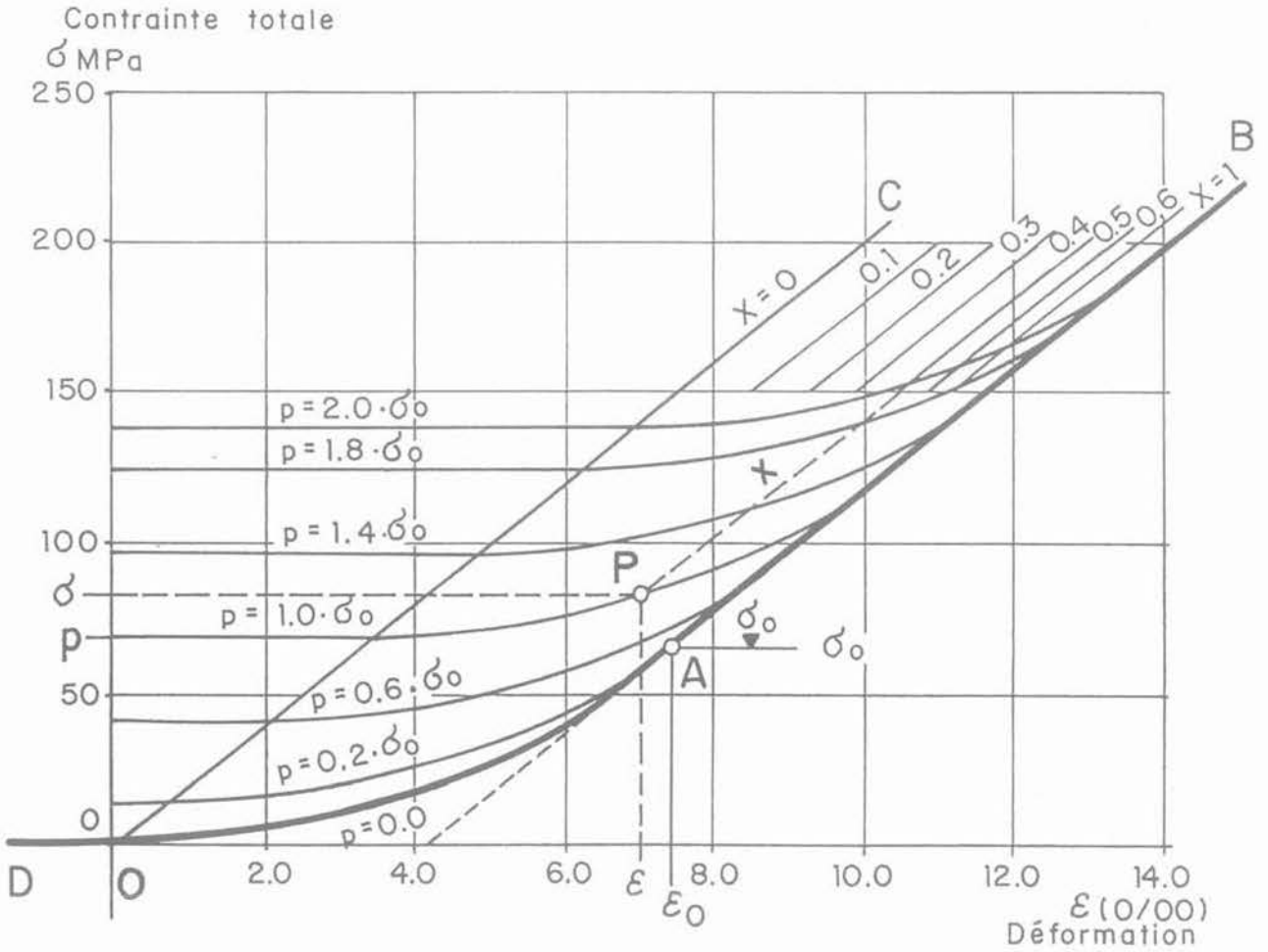


Fig. 5. — Modèle FES pour un massif rocheux.

p = pression neutre (interstitielle)

x = degré de serrage

$x = 0$ fissures ouvertes

$x = 1$ fissures complètement fermées.

Exemple d'un massif avec un seul système de fissures ayant 0,6 mm d'épaisseur (« hauteur d'onde ») et 100 mm de longueur (« longueur d'onde »), distantes de 100 mm.

Module de la matrice rocheuse 20 GPa.

Point A (σ_0, ϵ_0) = serrage complet en l'absence d'eau.

Fig. 5. — FES model for a rock mass.

p = neutral pore water pressure

x = relative closing

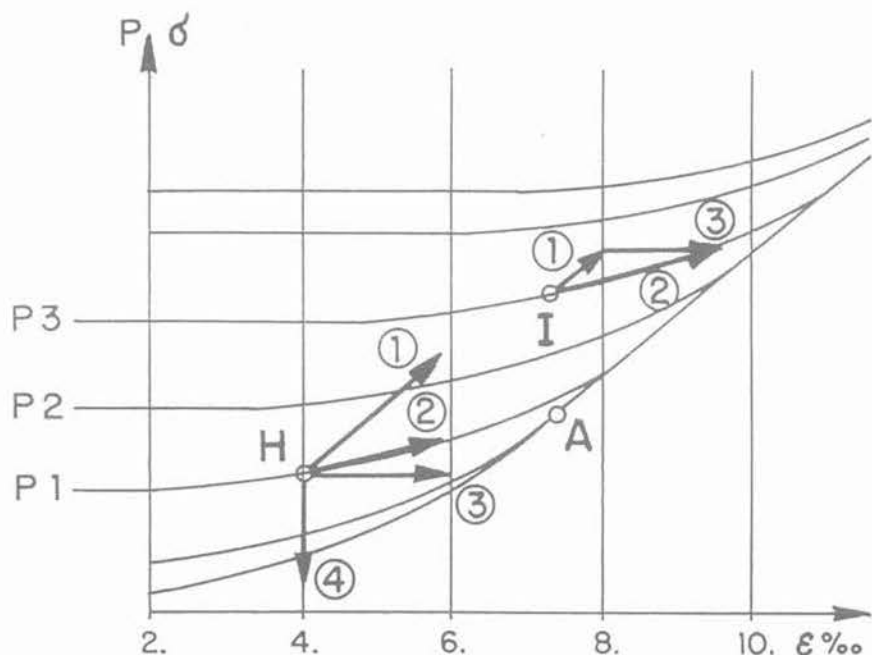
$x = 0$ open fissures

$x = 1$ completely closed fissures.

Example for a rock mass with only one system of cracks with : 0,6 mm opening (height of undulation) and 100 mm of length (wave length of undulations) spaced every 100 mm.

Modulus of the rock matrix 20 GPa.

Point A (σ_0, ϵ_0) = complete closing without water.



EXEMPLE

Direction	Variations (p et σ)	Rapports au point H
①	chargement non drainé :	$\frac{\Delta \sigma_1}{\Delta \epsilon_1} = 20 \text{ GPa}$
②	chargement à pression int. constante :	$\frac{\Delta \sigma_2}{\Delta \epsilon_2} = 5 \text{ GPa}$
③	drainage à charge constante (module uniaxial de tassement) :	$\frac{\Delta p}{\Delta \epsilon_3} = M t_1 = 8 \text{ GPa}$
④	dilatation nulle :	$\frac{\Delta \sigma}{\Delta p} = \rho = 0.8$

Fig. 6. — Modèle massif élastique fissuré. - Variations d'état particulièrement significatives.
 Fig. 6. — Model of fissured elastic solid mass. - Particularly significant state variations.

- ① undrained loading
- ② loading by constant water pressure
- ③ draining under constant load
- ④ loading by constant strain

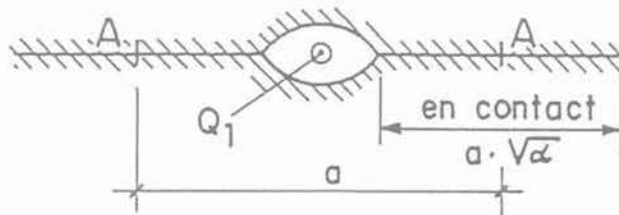
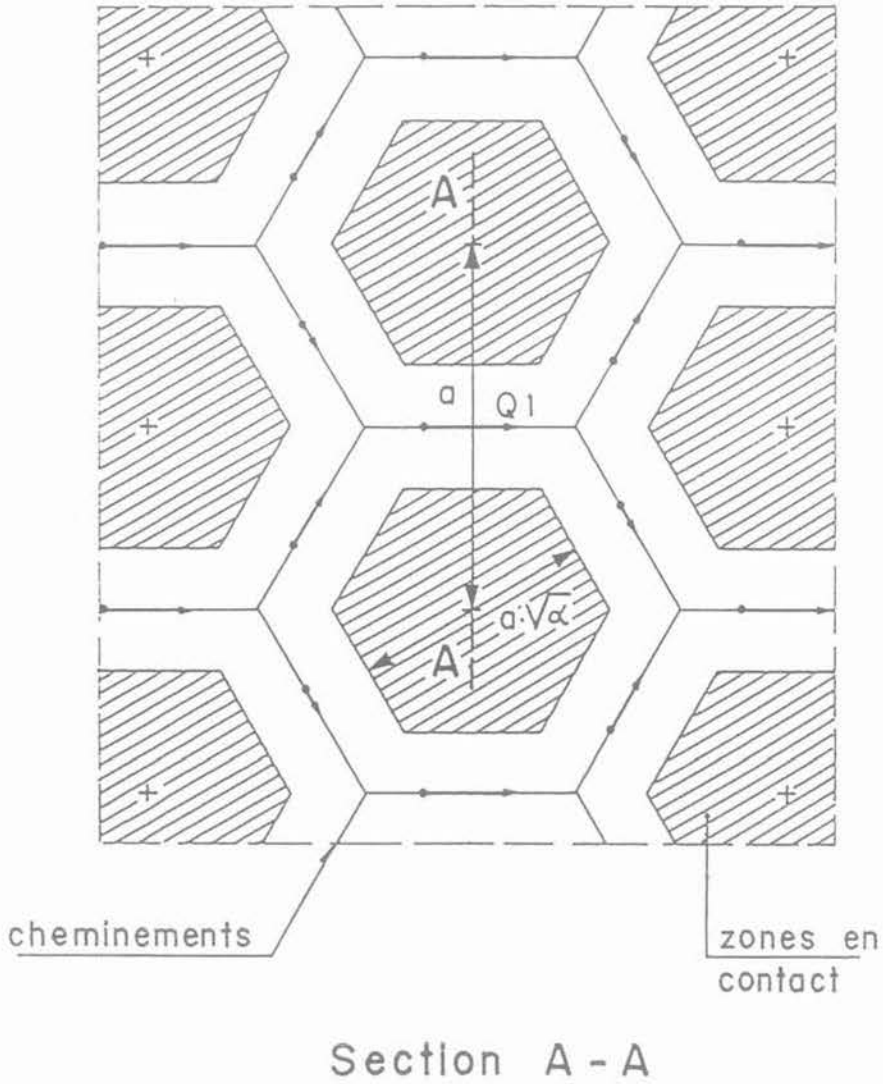


Fig. 7. — Modèle FES. - Modélisation de la fissure dans son plan pour procéder aux calculs hydrauliques.

Q_1 = débit passant par un « canal ».

Fig. 7. — FES. Model - Modélisation of a fissure, in its plane, for hydraulic mathematical analysis.

Q_1 = flow through a "channel".

Zone en contact = contact zones - Cheminements = flow paths

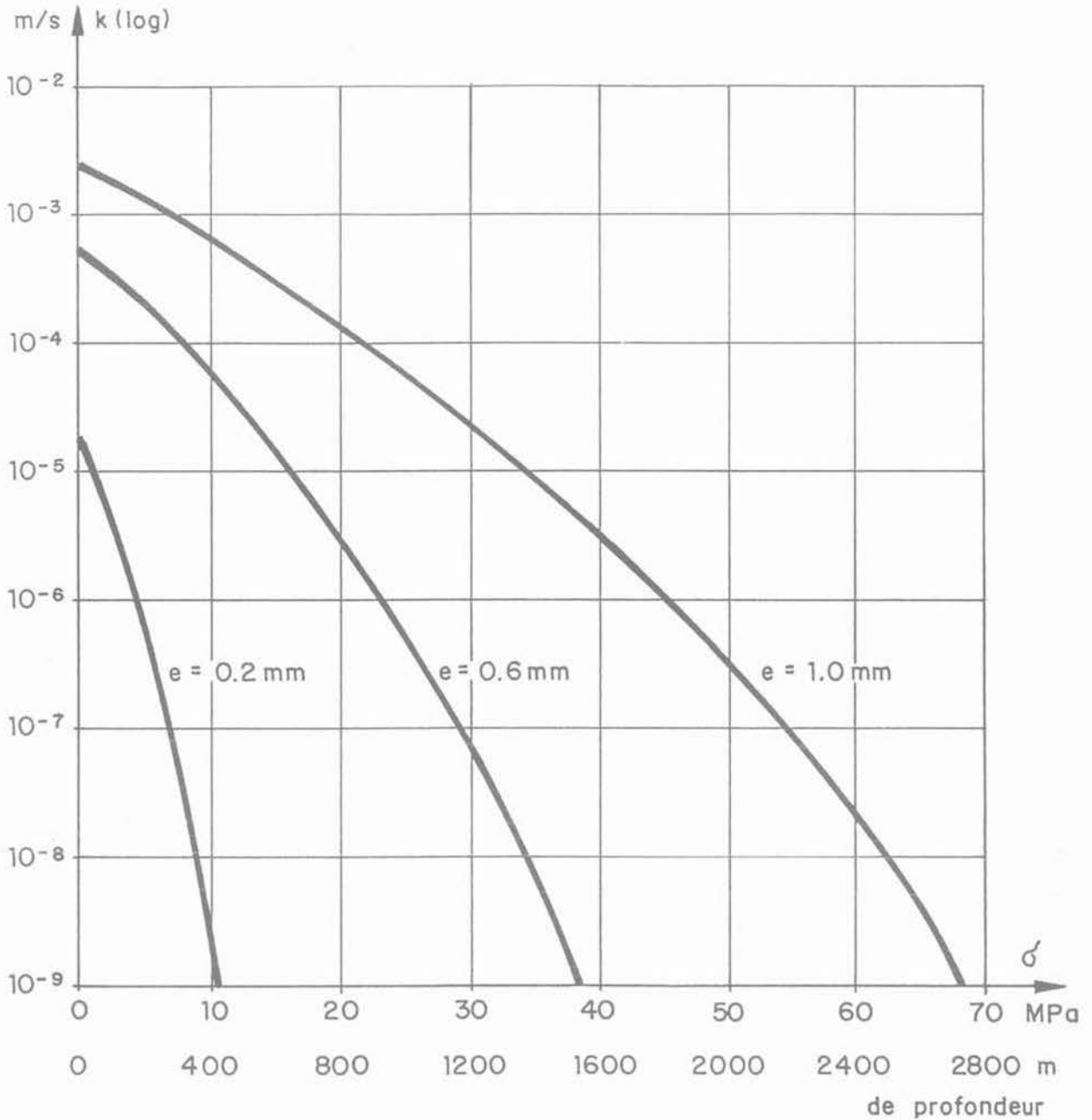


Fig. 8. — Modèle FES. - Perméabilité de la masse rocheuse en fonction de la contrainte effective. Même exemple que la figure 5, toutefois pour des fissures dont l'« épaisseur » (ondulation) assume diverses valeurs.
 Fig. 8. — FES. Model. - Permeability of the rock mass as a function of the effective stress. Same example as figure 5 including different fissure opening (undulation) values.

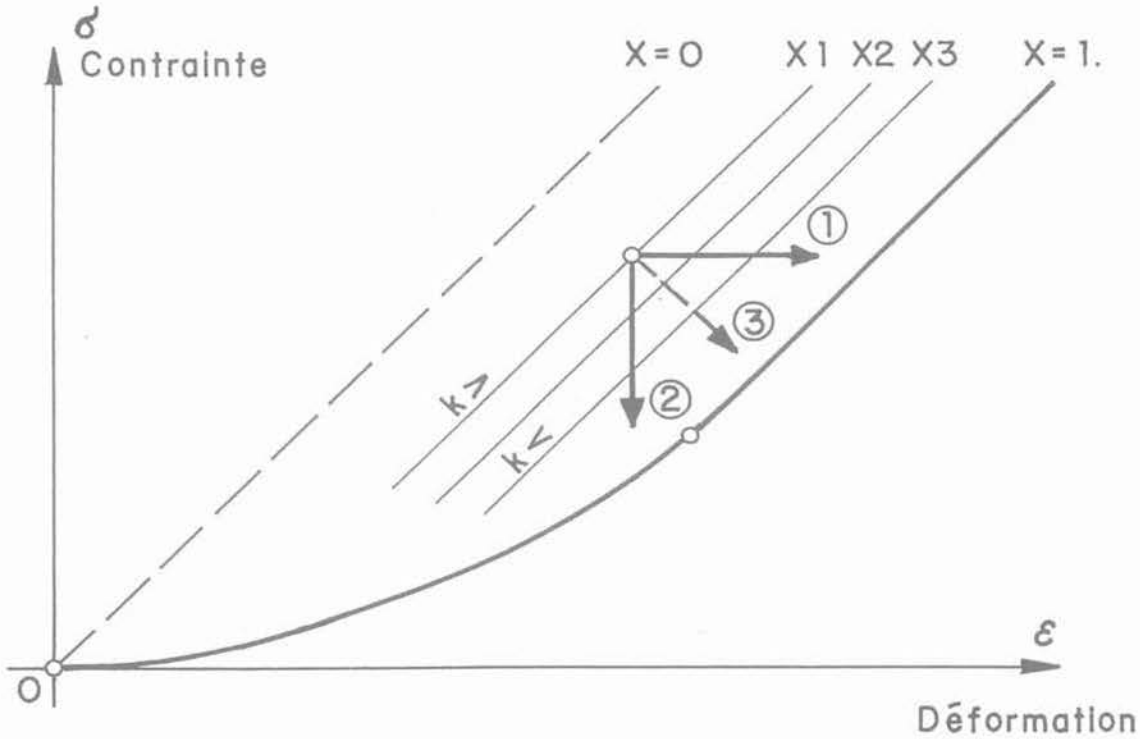


Fig. 9. — Effet du drainage dans un massif rocheux.

- (1) à contrainte totale constante
- (2) à extension constante
- (3) variation de type intermédiaire.

Dans chaque cas, il y a serrage des fissures et donc diminution de la perméabilité du massif.

Fig. 9. — Effect of drainage in a rock mass.

- (1) under constant total stress
- (2) under constant state of deformation
- (3) variation of combined type.

In each case a closing of the fissures happens and the permeability of the mass decreases.

mais une suspension. Il possède néanmoins des propriétés rhéologiques qui peuvent être approchées — avec une bonne précision — par celles du corps de Bingham. Je ne ferai par ailleurs que mentionner les résines qui assument une place de plus en plus importante dans les travaux de génie civil mais dont l'étude nous mènerait trop loin.

Le phénomène qui transforme un corps liquide ou pseudo-liquide en un corps solide ou pseudo-solide est, selon le cas, l'hydratation pour les coulis de ciment, la gélification pour les gels et la polymérisation pour les résines.

5. LES COULIS DE CIMENT

Le coulis de ciment, qui en principe n'est qu'un simple mélange d'eau et de ciment, présente en fait un comportement assez complexe. Tout d'abord, ses propriétés rhéologiques varient énormément selon les dosages employés. La figure 11 montre la variation de la cohésion et de la viscosité d'un simple coulis en fonction du rapport eau/ciment. On constate le même fait à la figure 12 pour ce qui est de la décantation. Il est d'usage de définir comme stables les cou-

lis dont la décantation ne dépasse pas, par exemple, 5 % durant 2 ou 3 heures, les autres étant définis instables. On constate en effet souvent que lors d'injections avec un tel coulis l'eau se sépare du ciment et suit d'autres cheminements. La cinérèse est justement le phénomène de la séparation de l'eau du ciment.

Pour rendre stable un coulis de ciment, on peut y ajouter de la bentonite et obtenir un coulis dont cohésion et viscosité augmentent alors que la décantation diminue. Les propriétés rhéologiques du coulis peuvent également être modifiées par l'adjonction de produits divers qui agissent en sens inverse de la bentonite, ainsi que cela ressort à la figure 13.

En fait, l'adjonction d'eau au ciment a deux buts :
— d'abord celui de fournir l'eau qui sera nécessaire à l'hydratation, et donc à la prise du ciment en vue de transformer en solide le coulis encore liquide, mais aussi celui

— d'éliminer les forces de frottement qui peuvent se produire entre les grains de ciment et entre ceux-ci et les épontes de la fissure. Il s'agit de permettre la formation d'une pellicule d'eau autour de chaque

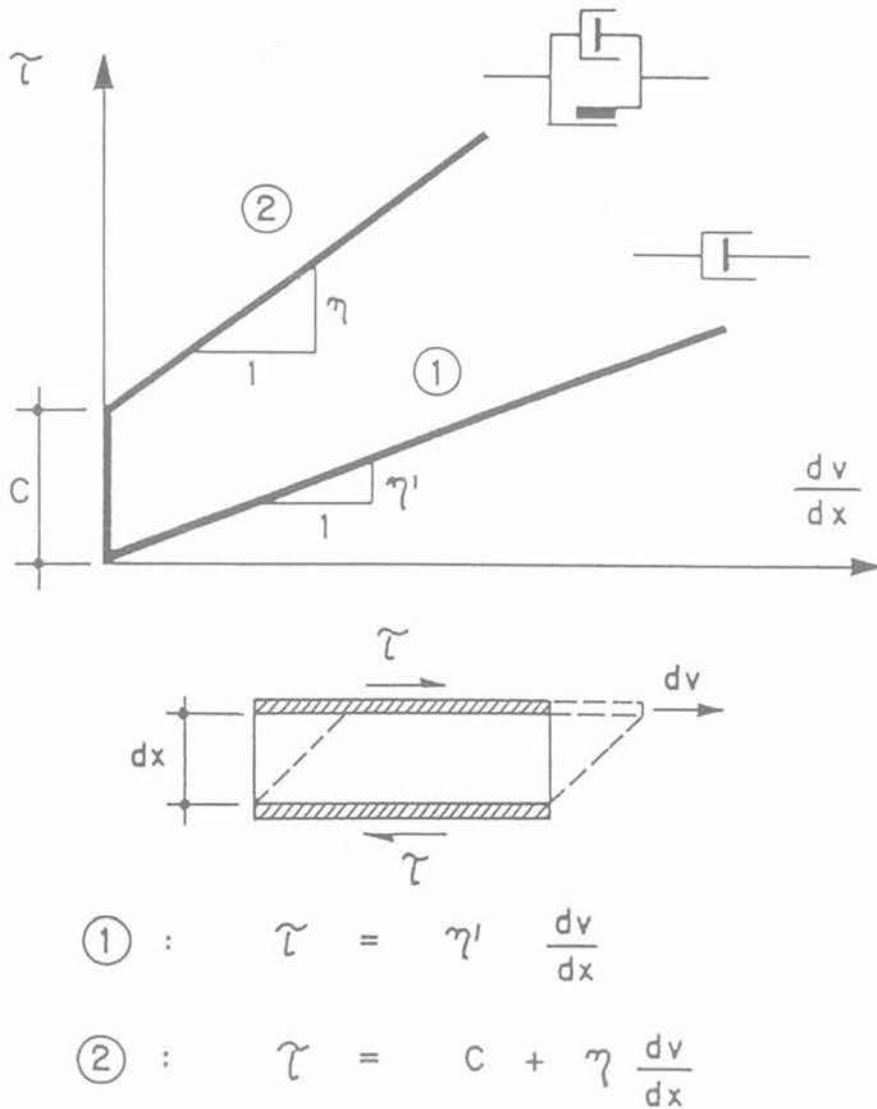


Fig. 10. — Lois rhéologiques intéressant l'injection.
 (1) corps de Newton (viscosité seule) : eau
 (2) corps de Bingham (cohésion et viscosité) : coulis stable.

Fig. 10. — Rheological laws in relation with grouting.
 (1) Newton model (viscosity only) : water
 (2) Bingham model (cohesion and viscosity) : stable grout.

grain, afin qu'il ne rentre pas directement en contact avec son voisin ni avec la paroi. L'eau joue ainsi le rôle de lubrifiant.

Ceci implique que dans tout coulis injectable, il y aura toujours excès d'eau par rapport à la quantité strictement nécessaire à l'hydratation du ciment.

Comme dans tout béton, la résistance mécanique, mais aussi la résistance à la lixiviation du coulis ayant fait prise sont d'autant plus élevées que l'eau en excès aura été moindre. On se trouve ainsi souvent placé en face d'un dilemme, à savoir : vouloir réduire la quantité d'eau pour augmenter la qualité du produit final, mais d'autre part devoir l'augmenter pour diminuer la viscosité et la cohésion du coulis, en vue d'en

faciliter la pénétration dans les fissures sans devoir augmenter par trop les pressions d'injection. On parle volontiers à cet égard de « pénétrabilité » du coulis.

Au cours de l'injection, les propriétés rhéologiques du coulis peuvent se modifier sensiblement. En effet, une partie de l'eau peut se perdre, soit le long de fissures très fines dans lesquelles le ciment ne peut pénétrer soit par absorption d'eau par une matrice rocheuse poreuse non entièrement saturée.

Ce phénomène de presso-filtration est évidemment d'autant plus important que les pressions d'injection employées seront élevées, d'autant moins que la matrice rocheuse sera moins poreuse et plus totalement saturée d'eau avant l'injection, et bien sûr

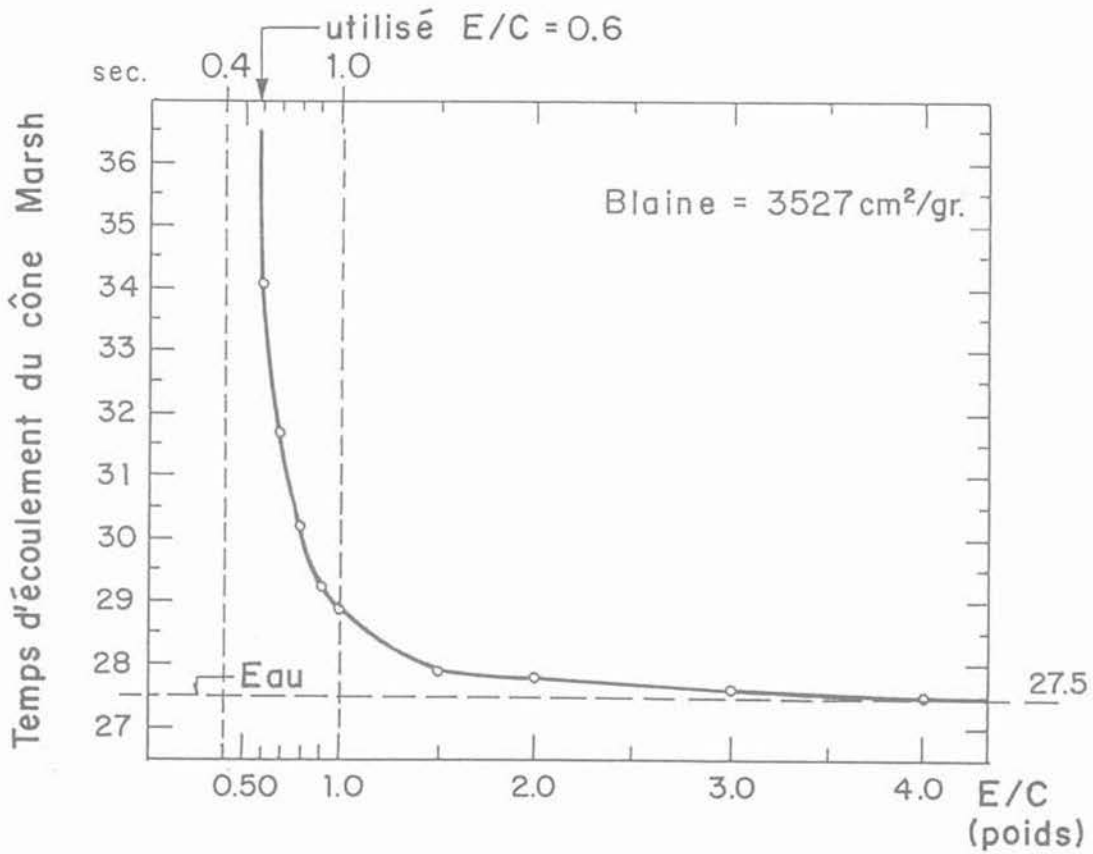


Fig. 11. — Variation des propriétés rhéologiques d'un coulis de ciment en fonction du rapport eau/ciment. E/C en poids. (Exemple : Barrage de Paute-Ecuador). Temps d'écoulement du cône Marsh.

Fig. 11. — Variation of rheological properties of a cement grout as a function of the w/c weight ratio. (Example : Paute dam in Ecuador). Marsh's funnel flow time. E/C = W/C water cement factor by weight.

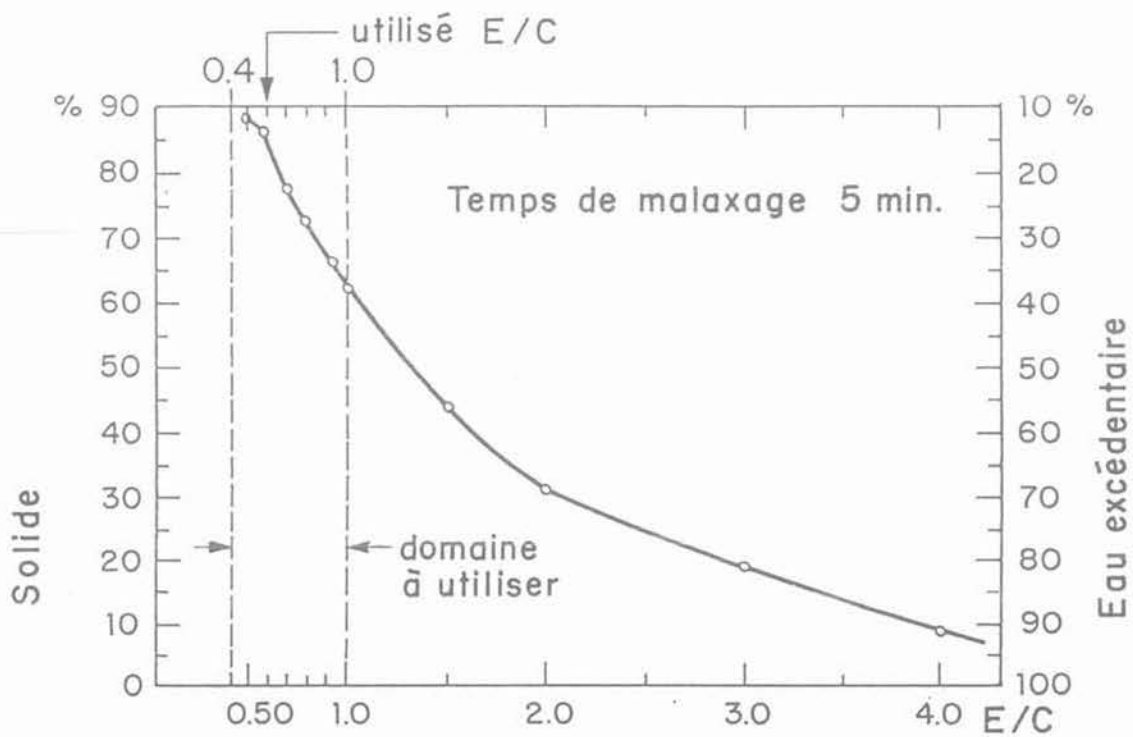


Fig. 12. — Décantation à très long terme d'un coulis eau/ciment en fonction du rapport eau/ciment. (Exemple : Barrage de Paute-Ecuador).

Fig. 12. — Long term settling of a cement grout as a function of the w/c ratio (example : Paute dam in Ecuador). Solide = solid - Temps de malaxage = mixing time - Eau excédentaire = bleeding water - Domaine à utiliser = range of W/C to be used

cevable que le coulis de ciment n'entrera guère dans des fissures plus fines que deux ou trois fois les diamètres des particules en suspension, c'est-à-dire dans des fissures plus fines que 0,2, 0,3 ou même 0,4 mm*. N'oublions pas par ailleurs que l'épaisseur de la fissure n'est pas constante et que par conséquent les grains de ciment plus gros bouchent d'abord les zones plus fines de la fissure et réduisent dans de très fortes proportions la section des canaux dans lesquels le coulis peut circuler.

C'est pour cette raison que, si l'on veut injecter des fissures fines ou seulement les parties très fines des fissures, il faut avoir recours à des ciments très finement moulus et ayant donc une surface spécifique selon Blaine plus élevée.

De cette constatation découle la conclusion très importante selon laquelle ce n'est que dans des cas bien particuliers qu'on pourra obtenir un étanchement « absolu » de la masse rocheuse en n'utilisant que des injections de ciment.

6. PERMÉABILITÉ DE LA ROCHE ET PÉNÉTRABILITÉ DU COULIS

Sur la base du modèle FES présenté tout à l'heure, il est possible de calculer la perméabilité d'une fissure en fonction de ses caractéristiques géométriques et de son degré de serrage.

Par extension, on peut déterminer la perméabilité du massif rocheux en fonction des propriétés des fissures et de leur fréquence ainsi que de l'état de contrainte auquel le massif est soumis.

Or, selon la loi de Darcy, la notion de perméabilité implique un rapport linéaire entre gradient de pression et débit d'écoulement. On conçoit donc immédiatement que la notion de perméabilité d'une fissure — et donc celle d'un massif fissuré — ne peut s'appliquer qu'à des liquides newtoniens qui ne possèdent pas de cohésion, donc à l'eau seulement. Dans le cas d'un corps de Bingham, c'est-à-dire d'un corps possédant un seuil de cohésion, on ne peut définir qu'une *pénétrabilité*, fonction de la cohésion du coulis et du gradient de pression, ainsi que cela est montré à la figure 14.

L'allure asymptotique des courbes dessinées dans cette figure montre que pour chaque gradient, les débits s'annulent pour un certain degré de fermeture de la fissure. Ainsi on peut retenir que pour chaque fissure et chaque degré d'ouverture, il faudra utiliser un gradient de pression d'injection minimum afin qu'un débit non nul puisse s'écouler.

On en déduit aussitôt que toute injection réalisée avec un coulis présentant une cohésion ne pourra s'étendre au-delà d'une certaine distance, fonction évidemment de la pression appliquée — en fait du gradient de pression — de l'ouverture de la fissure et de la cohésion du coulis, et cela indépendamment du temps durant lequel on appliquera la pression. On aura donc

à faire avec un « refus » réel bien défini. Ce comportement du coulis de ciment est évidemment fondamentalement différent de celui d'un liquide newtonien et particulièrement de celui de l'eau. Avec de tels liquides, n'importe quelle distance pourra théoriquement être atteinte avec n'importe quelle pression pourvu que le temps d'injection soit suffisamment long**. Cet état de choses nous amène d'ailleurs à définir comme paramètre déterminant de l'injection le rapport « pression-cohésion » plutôt que la valeur absolue de la pression.

La situation change encore une fois si nous prenons en considération le fait que dans le coulis des grains de diamètre non nul sont en suspension. La figure 15 montre à quel point la pénétrabilité, en fonction du degré de fermeture, diminue dès que l'on tient compte de ce facteur qui rend impossible l'injection de fissures fines ou de fissures fortement serrées, et cela indépendamment de la pression d'injection que l'on voudra appliquer.

Il va d'ailleurs sans dire qu'il ne peut y avoir d'injection sans qu'une pression ne s'applique dans la fissure à injecter. Toute pression de ce type tendra à ouvrir la fissure ; en fonction entre autres du module de déformabilité du massif encaissant, ou si l'on préfère, de la rigidité des épontes et de la pression d'injection elle-même.

Il en découle immédiatement que l'on ne peut injecter aucune fissure sans l'ouvrir au moins quelque peu. C'est dire que les fissures injectées apparaîtront toujours plus épaisses et plus ouvertes qu'elles ne l'étaient avant l'injection. On constate en effet souvent qu'après l'injection il n'existe plus aucun contact entre les deux épontes rocheuses alors qu'il est plus que probable et même presque sûr qu'elles se touchaient auparavant, surtout si l'on se trouve à une certaine profondeur sous la surface du terrain, là où les contraintes naturelles du massif sont élevées.

Et cependant, malgré l'évidence, et nous dirons même la trivialité de cette affirmation, on trouvera toujours des « spécialistes de l'injection » qui prétendent injecter les fissures sans les ouvrir, et des ingénieurs pour prescrire que l'injection se fasse sans mouvements du massif et donc en fait qu'elle ne se fasse pas. C'est pour cette raison qu'ils utilisent des pressions d'injection extrêmement faibles et par conséquent des coulis extrêmement fluides avec un énorme excès d'eau. Les mouvements sont alors assez faibles pour qu'ils ne puissent plus ni les observer ni les mesurer. Ils sont alors rassurés ! Ce qu'ils craignent en fait avant tout est le phénomène du claquage ou hydro-fracturation.

* Il faut en effet tenir compte d'un effet de floculation du ciment qui peut par ailleurs être diminué grâce à l'adjonction des défloculants appropriés.

** Dans le cas d'un coulis non stable il se produit une séparation de l'eau et du ciment. A une certaine distance de l'orifice d'injection, les grains de ciment se déposent et finissent par modifier les conditions hydrauliques de la fissure en bouchant certains canaux ce qui peut, dans certaines conditions, mener également au refus.

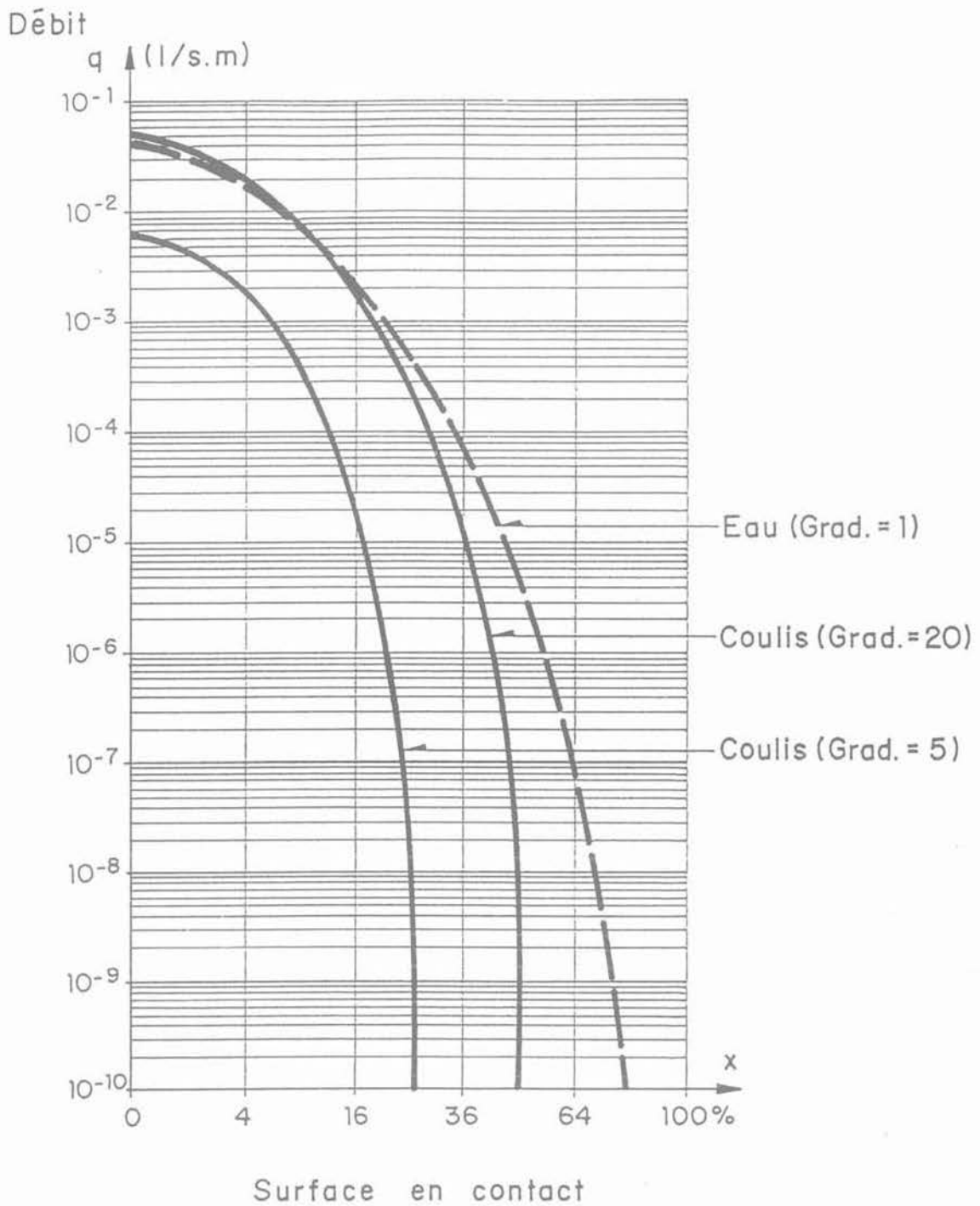


Fig. 14. — Modèle FES. Injection d'une fissure ; débit d'un coulis eau/ciment stable en fonction du gradient de pression et du degré de fermeture de la fissure.
Ouverture maximum de la fissure 0,6 mm
Cohésion relative du coulis 0,5 mm
Viscosité cinématique du coulis $20 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$.

Fig. 14. — FES. Model — Grouting of a fissure : flow rate of a stable cement grout as a function of the pressure gradient and of the relative closing of the fissure.
Maximum opening of the fissure = 0,6 mm
Relative cohesion of the grout : 0,5 mm
Kinematic viscosity of the grout : $20 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$.

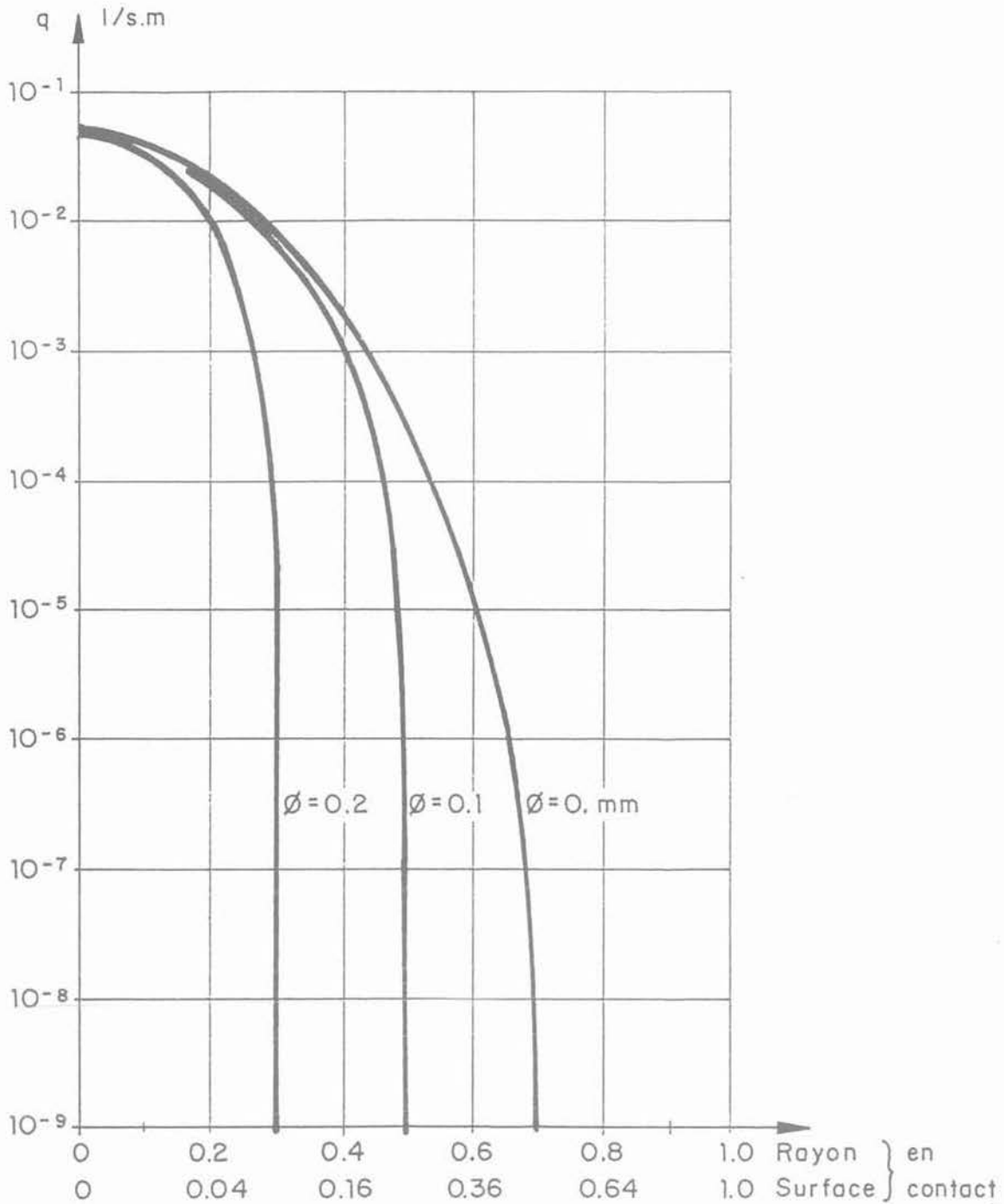


Fig. 15. — Effet du diamètre maximum des grains de ciment sur la pénétrabilité d'un coulis. Même exemple que la figure 5. Même coulis que dans la figure 14. Gradient = 20.

Fig. 15. — Effect of maximum grain size of cement particles on the penetrability of a grout. Same example as figure 5. Same grout as Figure 14. Gradient = 20.

7. HYDRO-FRACTURATION

S'il est vrai que toute injection ouvre les fissures de la masse rocheuse, et s'il est vrai que l'on recherche parfois à produire un claquage dans le terrain, il est

tout aussi vrai qu'il est souvent inutile et parfois indésirable de produire une ouverture excessive de certaines discontinuités dans le massif. Si nous examinons sur la base de la figure 16 la distribution des pressions dans une fissure lors de l'injection, nous pouvons calculer la force d'éclatement F par intégra-

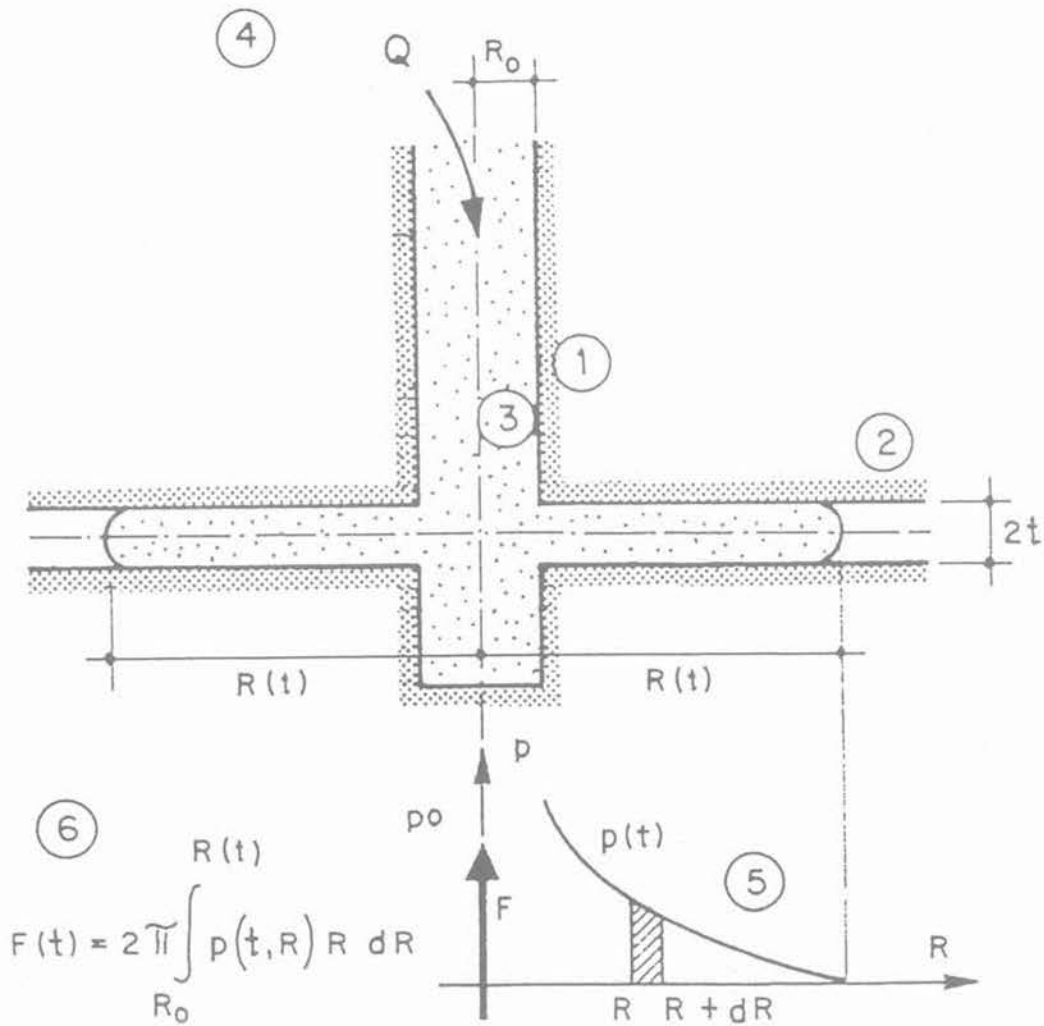


Fig. 16. — Schéma de calcul pour l'injection d'une fissure.

- (1) Forage
- (2) Fissure
- (3) Coulis
- (4) De la pompe d'injection
- (5) Pression le long de la fissure au temps t
- (6) Force d'éclatement (F).

Fig. 16. — Grouting analysis diagram for a fissure.

- (1) Grout hole
- (2) Fissure
- (3) Grout
- (4) Grouting pump
- (5) Distribution of the grouting pressure at time t
- (6) Splitting force (F).

tion des pressions s'exerçant dans la fissure à partir de la perforation. Cette force d'éclatement est proportionnelle non seulement à la pression d'injection, mais également à la surface sur laquelle le coulis s'étend. Elle dépend en outre de la loi de diminution de la pression avec la distance du trou d'injection. Par ailleurs, la surface sur laquelle s'applique la pression est fonction du volume de coulis injecté n'ayant pas encore fait prise. On déduit ainsi aisément de ces relations qu'il est possible d'éviter ou tout au moins de

limiter les phénomènes d'hydro-fracturation ou d'ouverture excessive d'une fissure si l'on respecte une certaine relation — à caractéristique négative — entre la pression appliquée et le volume injecté. En d'autres termes, la pression limite d'injection sera d'autant plus faible que le volume de coulis injecté et n'ayant pas encore fait prise sera plus important.

Dans la pratique, une relation hyperbolique semble bien faire l'affaire. On se souviendra que la distance

d'injection est toujours limitée si le coulis possède un minimum de cohésion ; elle peut par contre être théoriquement illimitée si le coulis n'a pas de cohésion comme l'eau ou certains coulis par trop dilués.

En fait, on constate qu'en utilisant un coulis cohésif, donc un coulis stable, on obtient une ouverture progressive et un remplissage complet de la discontinuité ouverte sans qu'aucun problème d'instabilité élastique — qui est généralement associée à l'idée d'hydrofracturation — ne se produise. Le fait d'ouvrir la discontinuité n'a pas alors en général de conséquences négatives puisqu'à la fin de l'opération tout le volume des fissures sera parfaitement rempli.

8. DÉROULEMENT DE L'INJECTION

Les considérations que nous avons faites amènent à formuler certaines conclusions et certaines recommandations qui parfois coïncident mais parfois diffèrent des pratiques traditionnelles. Ainsi :

— si les essais Lugeon sont utiles pour évaluer la perméabilité du massif rocheux, ils ne donnent guère

d'indication valable quant aux absorptions de coulis auxquelles il faut s'attendre, et cela malgré ce que d'aucuns prétendent !

— la notion d'injection « au refus » n'a de vrai sens que si l'on utilise un coulis cohésif ; mais dans le cas d'un liquide newtonien, l'absorption continuera toujours à n'importe quelle pression. Sauf bien entendu si la prise a eu lieu entre-temps ;

— dans le cas de coulis de Bingham, le refus se produira pour des volumes injectés d'autant plus importants que la pression appliquée sera élevée, ce qui est l'évidence même ;

— on aura souvent intérêt à injecter à débit constant plutôt qu'à pression constante et à arrêter l'injection dès qu'une certaine pression aura été atteinte ;

— pour tenir compte de l'incertitude existant quant à l'importance de discontinuités réellement présentes dans le massif rocheux, il convient de prescrire non des limites de volume fixes, mais des limites fonction de la pression atteinte et vice-versa. La figure 17 indique un exemple d'une telle directive d'injection.

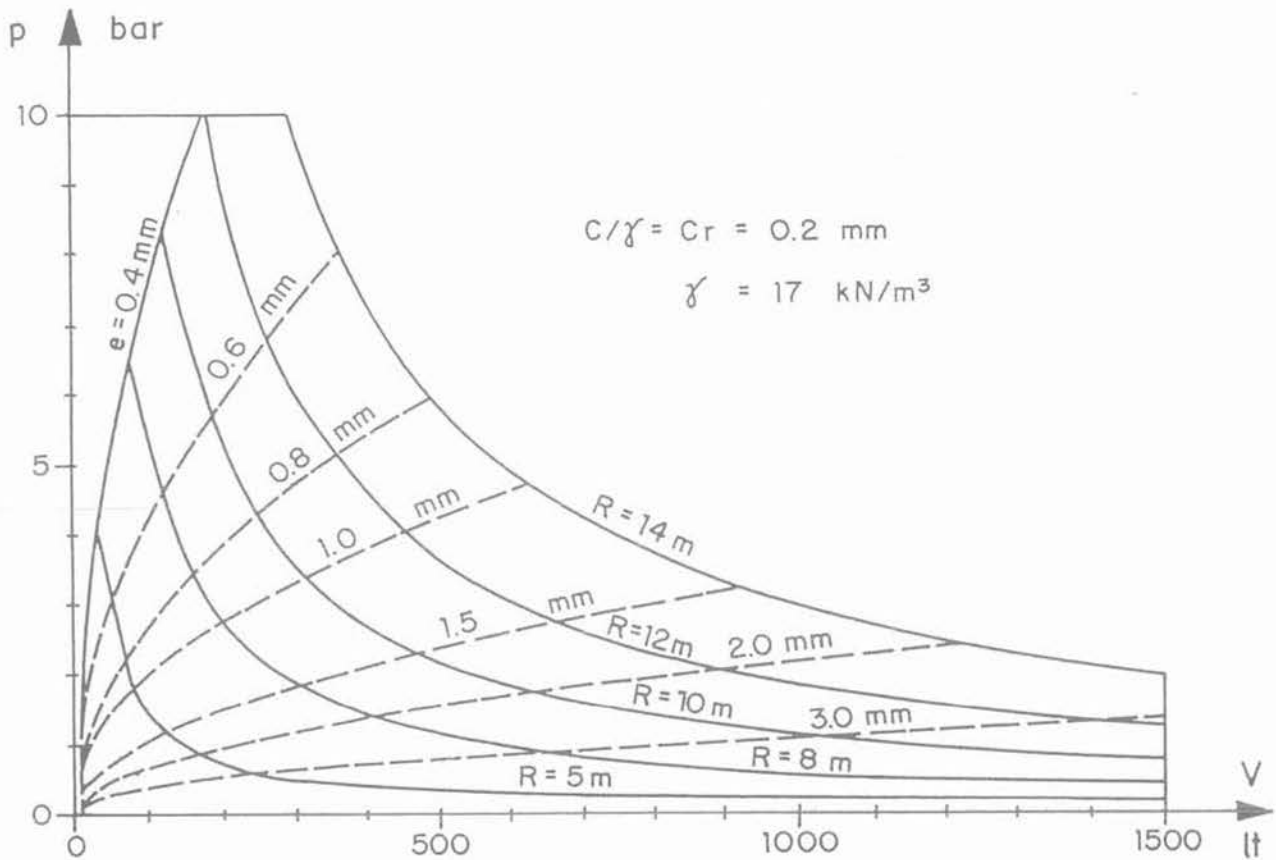


Fig. 17. — Exemple de directives pour la réalisation d'injections indiquant les valeurs limites de la pression d'injection en fonction du volume déjà injecté, avec indication, sous forme paramétrique, de l'épaisseur équivalente des fissures et de la distance atteinte. p = pression, V = volume injecté, R = distance atteinte par l'injection, e = épaisseur équivalente de la fissure.

Le graphique est établi dans l'hypothèse d'une fissure unique.

Fig. 17. — Example of specifications for performing grouting with indication of grouting pressure limit values as a function of the volume already grouted and with parametrical indication of the equivalent opening of the fissure and of the distance reached by the grout. p = pressure, V = volume of grout injected, R = distance reached by the grout, e = equivalent thickness of the fissure.

The graph illustrates the case for a single fissure.

Un certain nombre de conclusions quant à l'étude des procédés d'injection peuvent être déduites des considérations exposées ci-dessus. Elles ont été présentées en d'autres occasions (3).

9. EXEMPLES D'APPLICATION

Actuellement, des injections de consolidation dans les appuis rocheux du barrage en enrochement de El Chocón — en service depuis 15 ans en Argentine — sont en cours d'exécution et se trouvent dans un état fort avancé. Des désordres dans les épaulements et dans le noyau du barrage avaient été constatés durant l'exploitation. La réparation doit se faire à bassin plein, c'est-à-dire envers des pressions d'eau élevées. Il faut donc procéder aux injections avec une très grande précaution. L'opération est suivie en temps réel par ordinateur. Tous les paramètres et toutes les fonctions importants peuvent être directement lus sur écran et successivement enregistrés sous forme graphique et numérique. Les figures suivantes 18 et 19 montrent quelques-uns des résultats obtenus. Les pompes d'injection à pistons ne permettant pas d'obtenir un débit d'injection réellement constant, il faut par la manœuvre continue d'une vanne de réglage tâcher de respecter la valeur de consigne de débit.

10. RÉSULTATS ET LIMITES DE L'INJECTION DE COULIS DE CIMENT

Une opinion assez diffuse veut que l'on puisse rendre absolument étanche à l'eau un massif rocheux en procédant à des injections de coulis de ciment.

En réalité, même si l'on remplace l'expression « absolument étanche » par « pratiquement étanche » on doit encore tenir compte de nombreuses limitations.

(1) Tout d'abord ne seront pas injectées les fissures trop fines pour permettre l'entrée des gros grains de ciment. Le coulis ne pouvant pénétrer naturellement dans la fissure, il n'y a qu'une faible chance qu'une pression d'eau suffisante se crée dans la fissure et l'ouvre assez largement pour que le coulis s'y fraye alors un chemin.

(2) Même si la fissure s'ouvre sous l'effet de l'injection, des zones peuvent subsister où l'ouverture est insuffisante pour permettre un bon remplissage. Ainsi autour des points de contact se formeront des auréoles mal injectées (fig. 20). L'injection n'est vraiment bonne que si la fissure a été franchement ouverte par la pression.

(3) Si dans la discontinuité se trouvent des matériaux non injectables, l'injection ne saurait être parfaite et des délavements sont possibles par la suite.

(4) En raison des pressions appliquées lors de l'injection, les fissures fines se ferment alors que les plus importantes s'ouvrent. Il faut donc procéder à plusieurs étapes successives d'injection.

(5) Dans certains cas l'état de sollicitation de la masse rocheuse peut se modifier après la réalisation de l'ouvrage ; par exemple lors de variations du niveau de la retenue derrière un écran d'étanchéité. Il importe donc de connaître l'état de contrainte du massif au moment de l'injection, mais aussi les états qui se présenteront successivement durant la vie de l'ouvrage.

La figure 21 indique un exemple de la variabilité de la perméabilité du massif en fonction du degré d'ouverture des fissures au moment de l'injection et du degré d'ouverture pendant l'exploitation. On constate des variations extrêmes. Il ne faut pas oublier que l'ouverture des fissures est déterminée par la contrainte effective qui diminue, en général, d'autant plus que la pression interstitielle augmente (voir fig. 22).

Le choix du moment le plus favorable pour procéder à l'injection assume grande importance pour le comportement du massif lors de l'exploitation future. Il s'agit d'un effet malheureusement trop souvent négligé.

(6) Un élément très important est enfin celui de la pérennité de la diminution de perméabilité obtenue par injection. Bien des mauvaises expériences ont été faites à la suite de la lixiviation du coulis aux cours des années. On ne saurait entrer ici en détail dans cette question fort complexe ; signalons donc simplement les quatre facteurs suivants :

- un coulis ayant fait prise avec un excès d'eau sera beaucoup plus exposé au délavement que si le ciment a fait prise avec un minimum d'eau ;

- des discontinuités qui ne sont pas entièrement bourrées de coulis et qui de ce fait permettent un écoulement dans le plan de la discontinuité avec une grande surface de contact entre le coulis et l'eau sont également fortement exposées au délavement. Les causes de cette situation peuvent être : coulis non stable, décantation du coulis, retrait excessif du coulis, pression d'injection insuffisante, variation de l'état de contrainte du massif depuis l'injection ;

- l'attaque chimique du ciment par des eaux agressives ;

- la raison majeure de résultats non satisfaisants semble toutefois résider dans des travaux faits avec des critères de pression et des types de coulis inadéquats.

Là où les coulis de ciment n'arrivent pas à résoudre le problème, d'autres méthodes peuvent prendre le relais, soit seules soit en combinaison avec le ciment.

11. CONCLUSION GÉNÉRALE

La conclusion générale que l'on peut tirer des études développées sur la base du modèle FES mis sur pied récemment est qu'il s'avère désormais possible d'établir sur des bases rationnelles un projet détaillé pour tout travail d'injection, et cela en tenant compte des caractéristiques de la masse rocheuse et de ses discontinuités, de l'objectif à atteindre, des propriétés du coulis d'injection et des possibilités réellement offertes par des techniques classiques ainsi que par des techniques plus récentes et en cours de développement. Tous ces facteurs peuvent contribuer à améliorer l'économie des projets et à augmenter les chances de succès qui n'ont pas toujours été très élevées dans le passé.

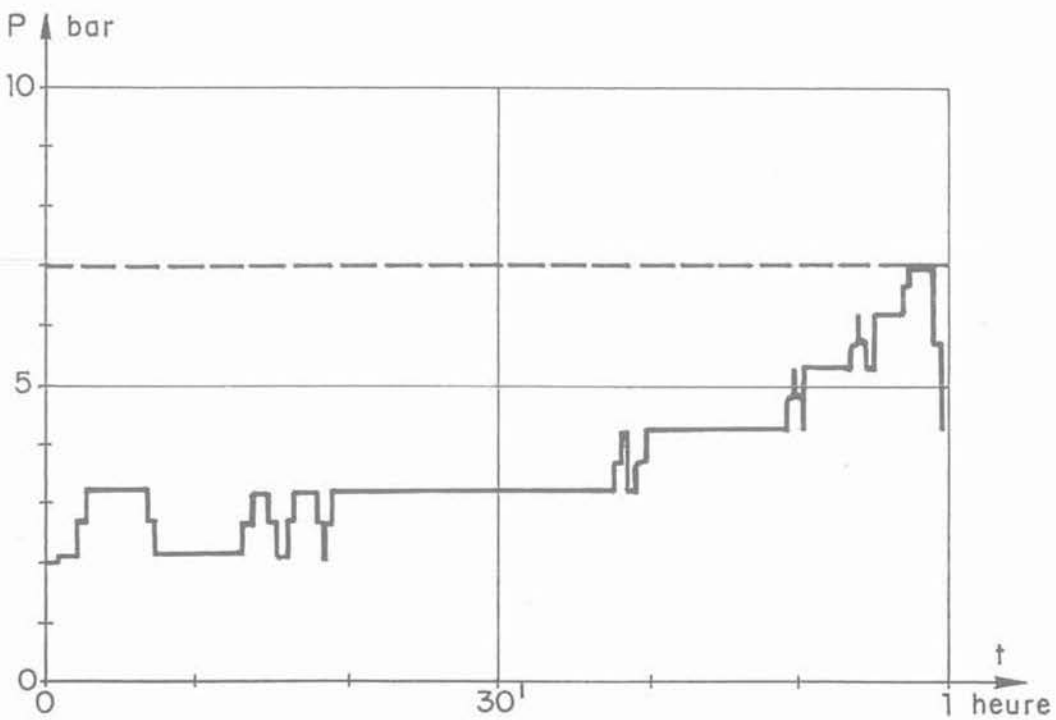
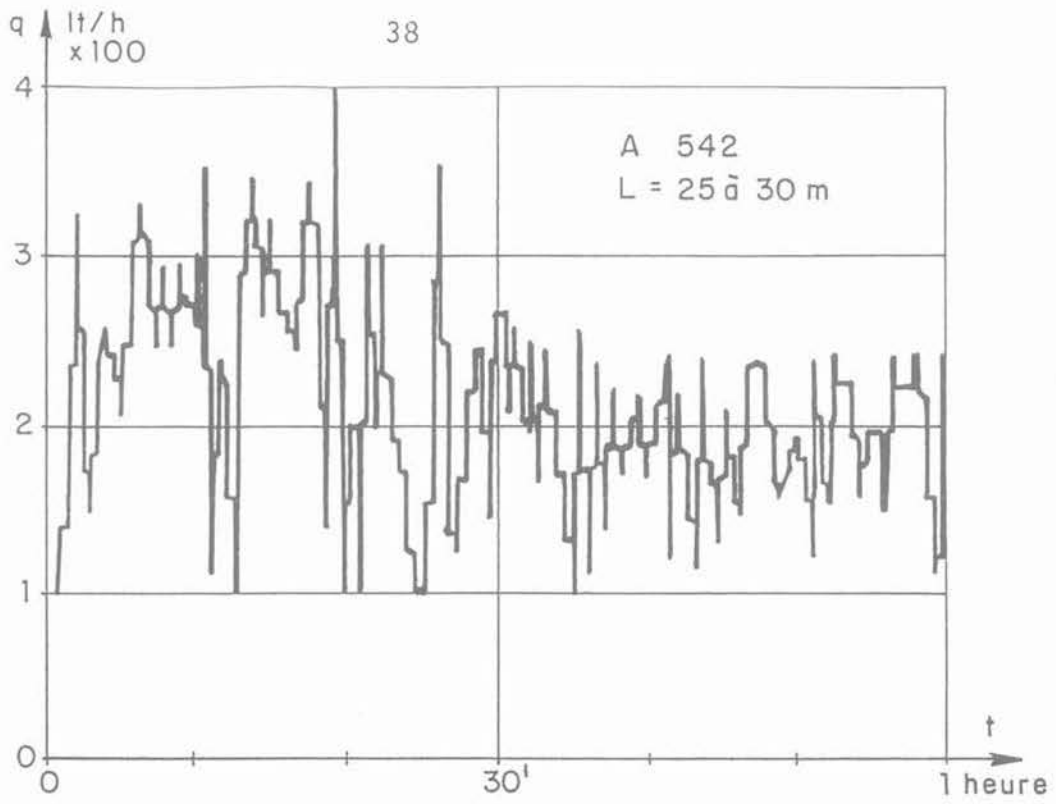


Fig. 18. — Exemple d'injection réalisée au barrage de El Chocón ;
 variation de la pression et du débit d'injection en fonction du temps.
 Fig. 18. — Example of grouting carried out at the El Chocón dam site.
 Variations of grouting pressure and grout flow rate with time.

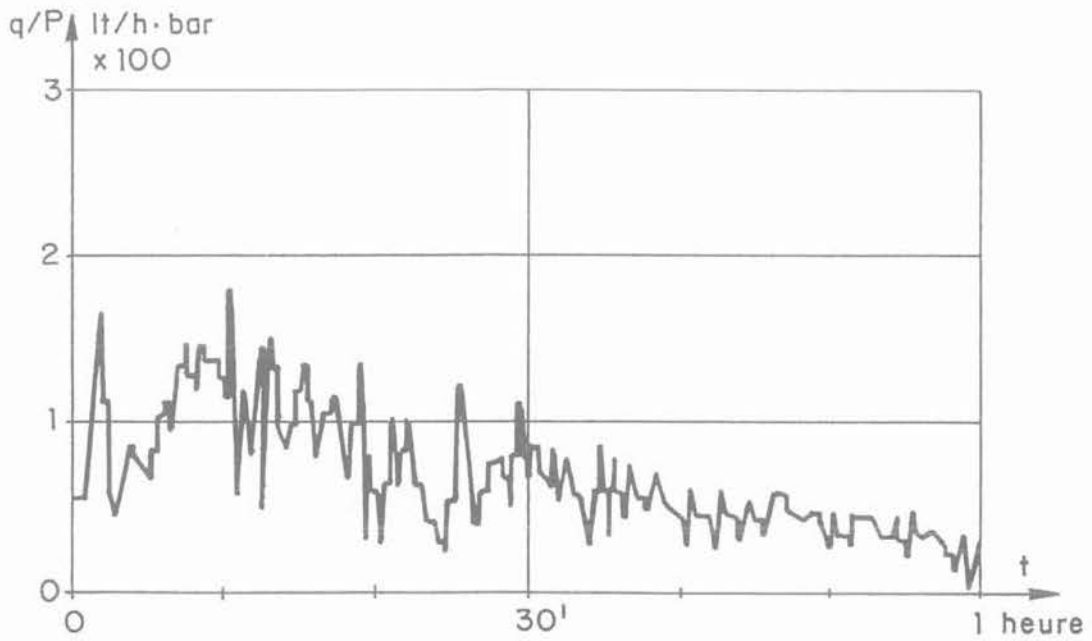
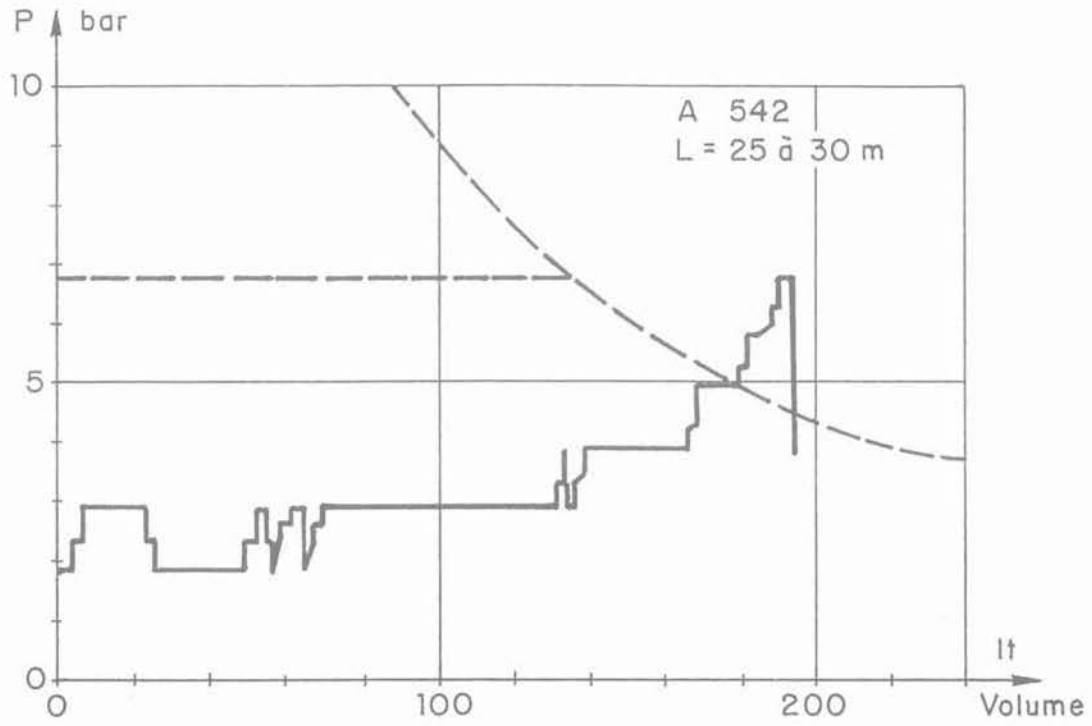


Fig. 19. — Même exemple que la figure 18, montrant la relation volume/pression ainsi que la réduction progressive du rapport débit/pression.

Fig. 19. — Same example as figure 18 showing the relationship between volume and pressure and the progressively decreasing flow rate/pressure ratio.

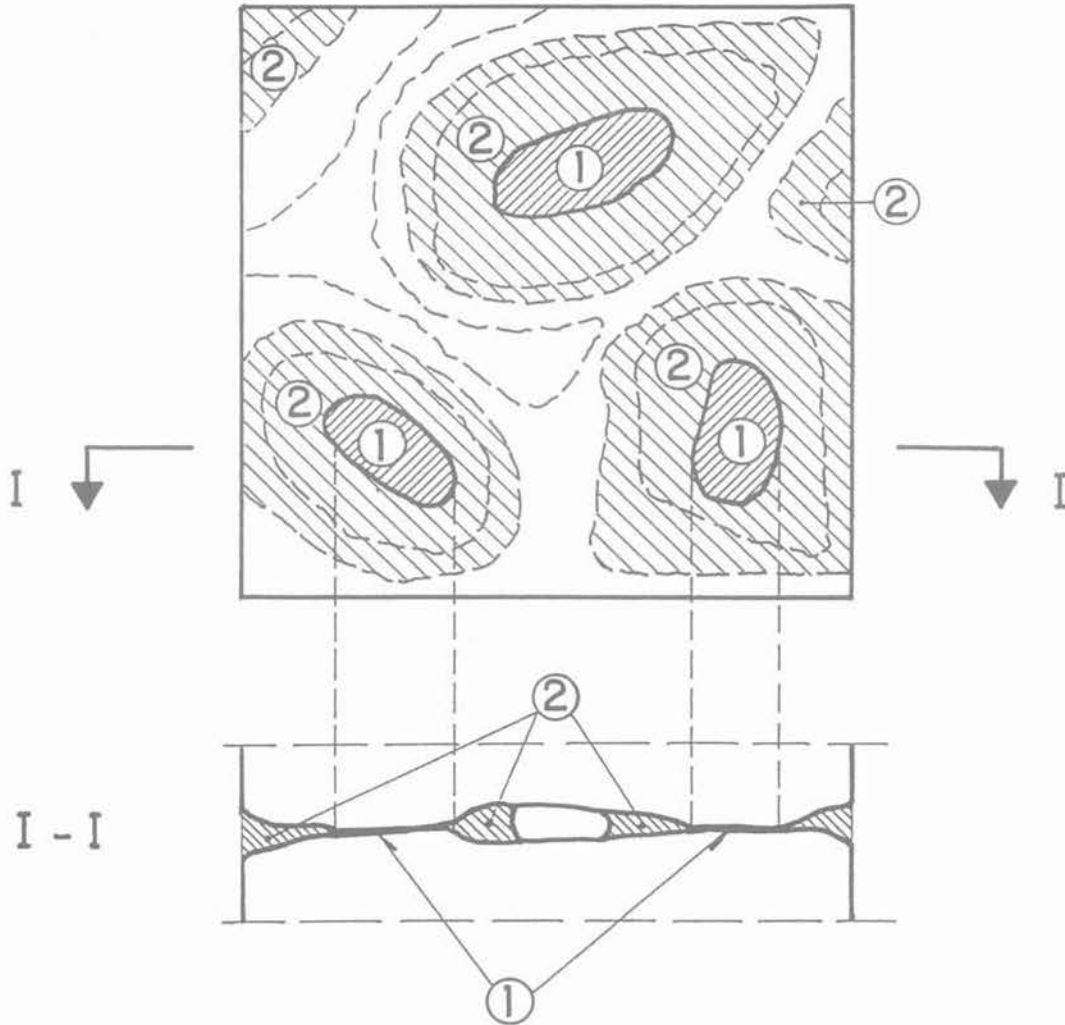


Fig. 20. — Zones non ou mal injectées au coulis de ciment autour des points de contact.
 (1) Zones de contact
 (2) Zones non ou mal injectées.

Fig. 20. — Zones around contact areas ungrouted or poorly grouted with cement grout.
 (1) Contact areas
 (2) Ungrounded or poorly grouted zones.

BIBLIOGRAPHIE

LOMBARDI G. (1985), *The role of cohesion in cement grouting of rock*, Comptes rendus CIGB, Quinzième Congrès des Grands Barrages, Lausanne, Q.58 R.13, GIGB/ICOLD Paris, pp. 985-1004.

LOMBARDI G. (1987), *Injection des massifs rocheux*, Journée de Printemps, 7 mai 1987, Bienne. Société Suisse de Mécanique des Sols et des Roches, n° 115, pp. 29-41.

DEERE DON U. and LOMBARDI G. (1985), *Issues in Dam Grouting*, Proceedings of the session sponsored by the Geotechnical Engineering, Division of the American Society of Civil Engineers in conjunction with the ASCE, Convention in Denver/Colorado, April 30, p. 156-164.

LOMBARDI G. (1989), *The FES-model and foundations for concrete dams*, Prof. Victor de Mello Volume - Editora Blücher, Sao Paulo, Brazil, pp. 270-283.

LOMBARDI G. (1988), *Les tassements exceptionnels au barrage de Zeuzier*, Société Suisse de Mécanique des Sols et des Roches, Séance d'automne, Berne, 4.11.1988.

LOMBARDI G. (1989), *La Roca y el Macizo Rocoso — Leyes constitutivas*, Academia Nacional de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales - Buenos Aires, Sesiones Científicas « Ing. Francisco García Olano », La Mecánica de Rocas en la Ingeniería Civil, diciembre 12, 1987, Buenos Aires, pp. 309-356.

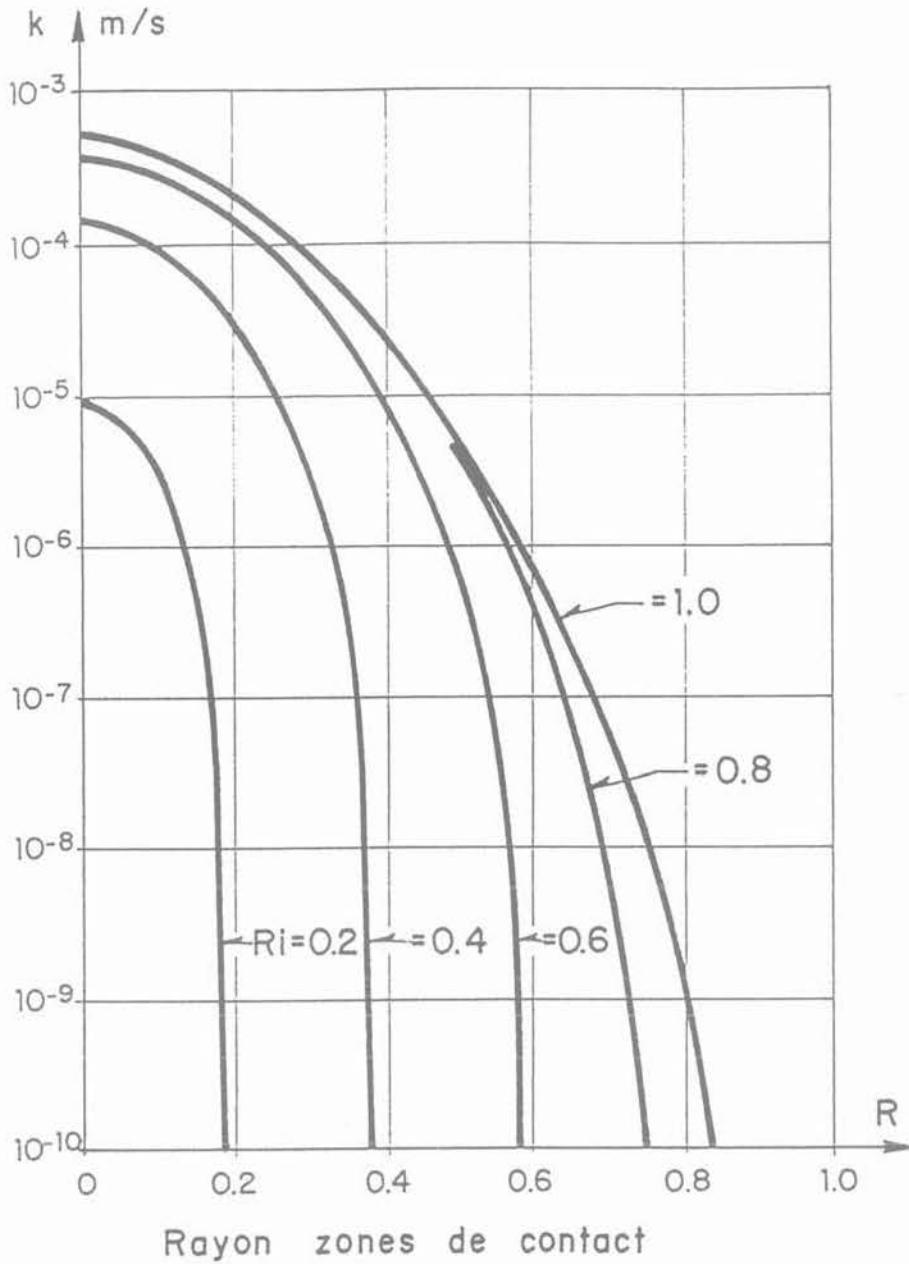


Fig. 21. — Variation de la perméabilité d'une roche injectée en fonction du rayon des zones en contact lors de l'injection R_i et de ce même rayon R lors de la percolation d'eau. (Même exemple que la figure 5 ; on ne considère pas l'effet dû aux grains de ciment).

Fig. 21. — Variations of the permeability of a grouted rock mass as a function of the radius R_i of the contact areas at time of grouting and as a function of the same radius R at time of water permeation. Same example as figure 5. The effect of grain size of cement particles is not considered.

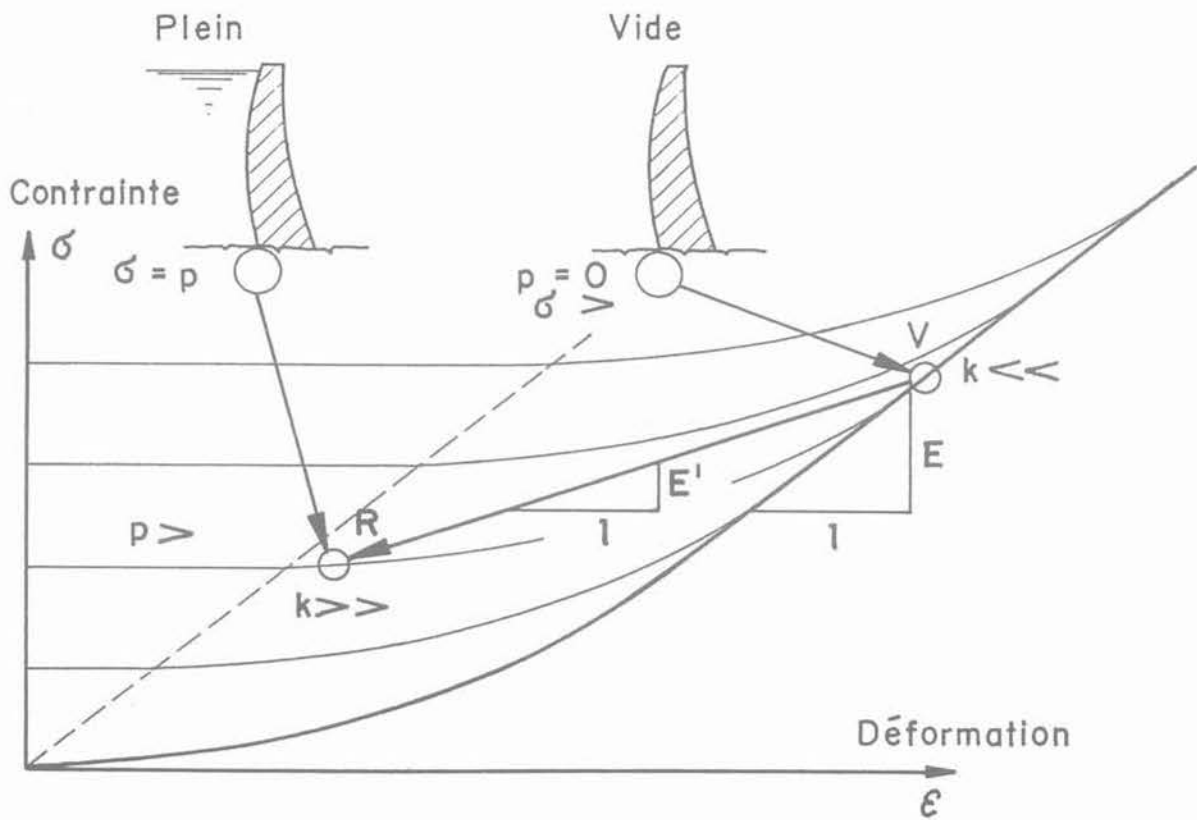


Fig. 22. — Variation de la contrainte totale et de la pression d'eau (pression neutre)
 — et donc de la pression effective — au pied amont d'un barrage voûte en fonction du remplissage du réservoir.
 Le module de déformation apparent du massif rocheux est très différent de celui d'une roche sèche (E' par rapport à E).
 La perméabilité au point R est radicalement plus élevée qu'au point V.
 Fig. 22. — Variations of total stress and of water pressure (neutral pressure)
 — and, as consequence, of effective pressure — at the upstream toe of an arch dam as a function of the water level in the reservoir.
 The apparent modulus of deformation of the rock mass is very different from that of a dry rock (E' compared to E).
 Permeability at point R is markedly higher than at point V.
 Plein = réservoir full - Vide = réservoir empty