

**Zeitschrift:** Bulletin technique de la Suisse romande  
**Band:** 95 (1969)  
**Heft:** 13

**Artikel:** Influence de l'hétérogénéité des roches cohérentes sur leur perméabilité  
**Autor:** Burger, André  
**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-70240>

#### Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

#### Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

#### Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

**Download PDF:** 23.02.2026

**ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>**

# BULLETIN TECHNIQUE DE LA SUISSE ROMANDE

Paraisant tous les 15 jours

## ORGANE OFFICIEL

de la Société suisse des ingénieurs et des architectes  
de la Société vaudoise des ingénieurs et des architectes (SVIA)  
de la Section genevoise de la SIA  
de l'Association des anciens élèves de l'EPFL (Ecole polytechnique  
fédérale de Lausanne)  
et des Groupes romands des anciens élèves de l'EPFZ (Ecole poly-  
technique fédérale de Zurich)

## COMITÉ DE PATRONAGE

Président: E. Martin, arch. à Genève  
Vice-président: E. d'Okolski, arch. à Lausanne  
Secrétaire: S. Rieben, ing. à Genève  
Membres:  
Fribourg: H. Gicot, ing.; M. Waeber, arch.  
Genève: G. Bovet, ing.; M. Mozer, arch.; J.-C. Ott, ing.  
Neuchâtel: J. Béguin, arch.; M. Chevalier, ing.  
Valais: G. de Kalbermatten, ing.; D. Burgener, arch.  
Vaud: A. Chevalley, ing.; A. Gardel, ing.;  
M. Renaud, ing.; J.-P. Vouga, arch.

## CONSEIL D'ADMINISTRATION

de la Société anonyme du « Bulletin technique »  
Président: D. Bonnard, ing.  
Membres: Ed. Bourquin, ing.; G. Bovet, ing.; M. Bridel; M. Cosandey, ing.; A. Métraux, ing.; A. Rivoire, arch.; J.-P. Stucky, ing.  
Adresse: Avenue de la Gare 10, 1000 Lausanne

## SOMMAIRE

Influence de l'hétérogénéité des roches cohérentes sur leur perméabilité, par André Burger.  
Divers — Bibliographie. — Société suisse des ingénieurs et des architectes.  
Documentation générale. — Documentation du bâtiment. — Informations diverses.

## INFLUENCE DE L'HÉTÉROGÉNÉITÉ DES ROCHES COHÉRENTES SUR LEUR PERMÉABILITÉ<sup>1</sup>

par André BURGER

Si, dans le cas de roches granuleuses à porosité d'interstices, la nature et l'expression de la perméabilité sont actuellement bien établies, il n'en est pas de même en ce qui concerne les roches cohérentes. La nature de la perméabilité y est connue, mais sa formulation, complexe, fait encore l'objet de recherches.

Ce sont les milieux pétroliers qui les premiers se sont penchés sur le problème. Actuellement, des recherches intéressantes se font aussi dans le cadre de la mise en valeur des eaux souterraines. Les roches carbonatées — calcaires et dolomies — jouissent d'une large priorité dans les recherches, aussi tiendront-elles une place prépondérante dans cet exposé.

La perméabilité dépendant de la porosité, il convient tout d'abord de rappeler en quoi cette porosité des roches cohérentes se différencie de celle des roches grenues.

### 1. La porosité des roches cohérentes

On classe habituellement les vides des roches selon leur nature. On distinguera ainsi :

<sup>1</sup> Exposé présenté à la réunion d'automne 1968 de la Société suisse de mécanique des sols et de travaux de fondation (Bienne, 8 novembre 1968).

## RÉDACTION

F. Vermeille, rédacteur en chef; E. Schnitzler, ingénieur, et  
M. Bevilacqua, architecte, rédacteurs  
Rédaction et Editions de la S.A. du « Bulletin technique »  
Tirés à part, renseignements  
Avenue de Cour 27, 1000 Lausanne

## ABONNEMENTS

|                          |                 |                   |
|--------------------------|-----------------|-------------------|
| 1 an . . . . .           | Suisse Fr. 46.— | Etranger Fr. 50.— |
| Sociétaires . . . . .    | » 38.—          | » 46.—            |
| Prix du numéro . . . . . | » 2.30          | » 2.50            |

Chèques postaux: « Bulletin technique de la Suisse romande »  
N° 10 - 5778, Lausanne

Adresser toutes communications concernant abonnement, vente au  
numéro, changement d'adresse, expédition, etc., à: Imprimerie  
La Concorde, Terreaux 29, 1000 Lausanne

## ANNONCES

Tarif des annonces:  

|                    |           |
|--------------------|-----------|
| 1/1 page . . . . . | Fr. 495.— |
| 1/2 » . . . . .    | » 260.—   |
| 1/4 » . . . . .    | » 132.—   |
| 1/8 » . . . . .    | » 68.—    |

 Adresse: Annonces Suisses S.A.  
Place Bel-Air 2. Tél. (021) 22 33 26, 1000 Lausanne et succursales



- la porosité d'interstices,
- la porosité de fissures,
- la porosité de chenaux.

Les causes de ces trois types de porosité étant différentes, le géologue les rattache aux épisodes successifs qui ont marqué l'histoire des roches. On considère d'abord les vides *syngénétiques* ou *primaires* qui se sont développés au cours de la genèse de la roche (pores intersticiels, joints de stratification, fentes de retrait). Par la suite, la roche a subi des actions qui ont développé des vides *paragénétiques* ou *secondaires* (fissures tectoniques, chenaux de dissolution).

### 1.1 Porosité d'interstices

Elle existe dans la grande majorité des roches connues. Dans les *roches cristallines* on a mis en évidence l'existence d'interstices entre les cristaux. Dans les granites par exemple, ils laisseraient passage à l'eau qui provoque l'altération des biotites et des feldspaths. Ces interstices échappent à l'examen microscopique et représentent une porosité très faible. Les grès offrent une porosité intersticielle qui dépend du degré de cimentation des éléments. Il en est de même des congolomérats.

Les roches carbonatées finement granuleuses, oolitiques, bréchiques ou spongieuses possèdent une porosité d'interstices variable par la fréquence et la dimension des pores. Elle peut atteindre une valeur élevée. Parmi les roches éruptives, la porosité est élevée dans les laves, les pences et les tufs volcaniques. Elle reste faible dans la plupart des basaltes.

La détermination de la porosité intersticielle est complexe du fait qu'une certaine fraction des pores ne communiquent pas entre eux. Le rapport de la porosité *close* à la porosité *ouverte* varie beaucoup d'une roche à l'autre. Dans les laves et les pences, il n'y a pratiquement pas de porosité ouverte.

Les valeurs de la porosité données dans la littérature varient entre de larges limites, aussi convient-il de n'accepter les chiffres suivants qu'à titre indicatif :

|                                       | porosité (m en %)               |
|---------------------------------------|---------------------------------|
| Granit . . . . .                      | 0,05 - 9,32<br>(en général < 2) |
| Calcaires du Jura :                   |                                 |
| Portlandien moyen . . . . .           | 2,2                             |
| Hauterivien . . . . .                 | 18,3                            |
| Grès :                                |                                 |
| Molasse de Berne . . . . .            | 20                              |
| Albien du forage de Savigny . . . . . | 1,8 - 9,9                       |
| Basaltes . . . . .                    | 0,1 - 2,9                       |
| Porphyres . . . . .                   | 0,4 - 15,5                      |
| Pences . . . . .                      | 50 - 75                         |

Citons encore les valeurs suivantes mesurées en laboratoire sur des calcaires, aux Etats-Unis :

|   | Limites    | Moyenne | Nombre     |
|---|------------|---------|------------|
|   | %          | %       | d'analyses |
| Porosité d'échantillons                 |            |         |            |
| non dérangés . . . . .                  | 6,6 - 55,7 | 30      | 74         |
| Contenance en                           |            |         |            |
| — eau de rétention spécifique . . . . . | 4,9 - 29,1 | 13      | 32         |
| — eau gravitaire . . . . .              | 0,2 - 35,8 | 14      | 32         |
| Humidité équivalente . . . . .          | 0,7 - 17,7 | 5       | 34         |

d'après Morris et Johnson (1967).

## 1.2 Porosité de fissures

Parmi les fissures *syngénétiques* on rencontre surtout les *fentes de retrait* dues au refroidissement dans les roches éruptives et à la consolidation dans les roches sédimentaires. Ces dernières présentent également des  *joints de stratification*.

Les fissures *paragénétiques* naissent au cours des déformations ultérieures de la roche consolidée.

A l'égard de la perméabilité, une distinction importante doit être faite entre les fissures *ouvertes* et les fissures *fermées*. Des fissures ouvertes se produisent lorsque la résultante des efforts déformants est une *tension* ou un *relâchement* de contrainte. Il nous entraînerait trop loin d'entrer dans le détail du mécanisme des déformations. Nous nous bornerons seulement à considérer que si des fentes de tension ouvertes peuvent se produire au voisinage de la surface des masses rocheuses, cela devient de moins en moins possible avec la profondeur. En raison des pressions très élevées qui y règnent, des transferts de matière, en présence d'eau intersticielle, provoquent le colmatage simultané des fentes en voie d'ouverture. Ce n'est que dans les cas où toute la masse rocheuse considérée est soumise à une expansion générale, que des joints ouverts peuvent se

développer en profondeur. Mais la possibilité subsiste toujours qu'ultérieurement, un remplissage par cristallisation, à partir de solutions minérales, se produise.

Schématiquement, la déformation d'une masse rocheuse se traduit par l'apparition d'un système de fissures orientées selon trois directions déterminées. En réalité cela n'est qu'exceptionnellement le cas, du fait qu'il existe des directions de fissuration préférentielles antérieures à la déformation : fentes ou clivages lithogénétiques. Fréquemment aussi, l'une des directions l'emporte nettement sur les autres. Dans les roches sédimentaires, l'une des séries de joints est en général représentée par la stratification. Les joints normaux aux plans de stratification présentent un espacement d'autant plus grand que les bancs sont plus épais. Toutes autres conditions étant égales, le *degré d'ouverture* des joints espacés des gros bancs sera donc plus grand que celui des joints plus fréquents des bancs minces.

Pour illustrer les considérations qui précèdent, sur les porosités d'interstices et de fissures, nous donnerons l'exemple de la craie du bassin de la Vanne, dans l'Yonne en France, décrit par Mégnien (fig. 1). La porosité d'interstices s'élève à 40 % en moyenne et la porosité efficace, à 2 %. Le massif est découpé par quatre séries de joints :

- a) deux séries de diaclases obliques, dessinant sur le plan horizontal un réseau à maille losangique de 40 grades. Ces diaclases sont ouvertes et jouent, pour cette raison, un rôle capital dans la circulation aquifère. L'auteur leur attribue une origine syngénétique : elles seraient dues à la compaction du sédiment (fig. 1 A).
- b) deux séries de diaclases subverticales formant sur le plan horizontal un réseau losangique de 60 grades. Celles-ci sont d'origine tectonique et fermées (fig. 1 B).

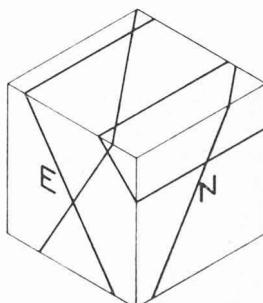


Fig. 1 A

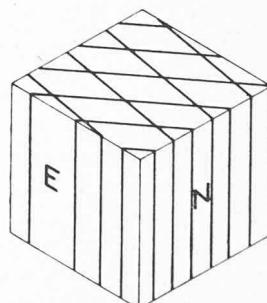


Fig. 1 B

Fig. 1. — Fissuration de la craie du bassin de la Vanne (France) d'après Mégnien, 1960.

## 1.3 Porosité de chenaux.

Les chenaux se développent sous l'effet de la dissolution de la roche par l'eau circulant dans les fissures ouvertes. Les roches carbonatées et le gypse sont les terrains d'élection de ce phénomène, mais celui-ci se rencontre aussi, à une moindre échelle, dans certaines roches siliceuses, notamment les quarzites. Dans les calcaires, les chenaux de dissolution ont des formes et des dimensions très variées. Les grottes pénétrables donnent une idée de la taille qu'ils peuvent atteindre.

La distribution des chenaux n'est pas homogène au sein des calcaires. Ils occupent des régions préférentielles, souvent déterminées par les caractères tectoniques. Dans la partie dénouée des massifs, ils tendent à se développer dans une direction subverticale, alors que dans les zones noyées, la direction subhorizontale prédomine.

La valeur de la porosité due aux chenaux, dans les calcaires, reste en général faible, en dépit de la dimension de certains d'entre eux. Dans le karst dinarique, les cavités en activité représenteraient en moyenne le 1% des massifs calcaires. Nos propres études dans le Jura nous conduisent à admettre que la porosité de chenaux ne dépasse pas 1 voire 2%. Des valeurs plus élevées sont rapportées mais elles représentent des conditions exceptionnelles.

## 2. Hétérogénéité et anisotropie dans les roches

Les types de porosité qui ont été décrits plus haut sont associés à trois ordres d'hétérogénéité des roches (Rats et Chernyashov, 1967) :

*Hétérogénéité de 3<sup>e</sup> ordre* : hétérogénéité dans la texture pétrographique des roches, conditionnée par la différence de forme et de grandeur des grains ou des cristaux, la distribution des pores et du ciment intergranulaire, le caractère des contacts entre grains, la présence de microfissures, etc. Du fait de cette hétérogénéité, deux échantillons de roche apparemment homogènes présenteront des porosités et perméabilités différentes.

*Hétérogénéité de 2<sup>e</sup> ordre* : hétérogénéité de structure et de composition de la roche dans les limites d'un banc ou d'une série correspondant à une séquence rythmique. Elle est due à la variation de la composition des roches à la présence de macro-joints, de dislocations tectoniques limitées, etc. Du fait de cette hétérogénéité, des essais de pompage, dans deux puits intéressant tous deux une portion apparemment homogène du massif, ne donneront pas les mêmes résultats.

*Hétérogénéité de 1<sup>er</sup> ordre* : hétérogénéité à l'échelle du massif rocheux, causée par des changements successifs de structure, de faciès, par des degrés différents de lapidification, par des failles, par des intrusions magmatiques, par des zones d'action hydrothermales, par l'altération de la zone supérieure, etc.

Ces ordres d'hétérogénéité (notamment en ce qui concerne la porosité) sont caractérisés par leur relativité. Suivant la grandeur de la sphère d'influence du phénomène considéré, une même structure sera regardée comme homogène ou comme hétérogène. Par exemple, le volume rocheux où se fait sentir l'influence d'un puits soumis à un pompage, pourra être qualifié d'homogène si l'on se réfère à la porosité intersticielle ; cependant, si l'on mesure en laboratoire la perméabilité due à cette porosité intersticielle sur des échantillons, on obtiendra des résultats différents. On voit donc que la porosité d'interstices est une hétérogénéité qui ne joue pas de rôle déterminant dans le problème considéré.

Nous avons dit que les fissures (de même que les chenaux) ne présentent pas une distribution uniforme au sein de la roche. Elles sont groupées en séries d'orientation et d'inclinaison différentes, qui constituent, ensemble, le *système* des fissures du massif. Une série est donc constituée par un groupe de fissures à peu près parallèles entre elles et qui donnent un maximum simple

sur un diagramme de projection (fig. 2). Ces séries se recoupent, si bien qu'on peut admettre qu'une proportion très grande des fissures et des chenaux communiquent entre eux. Ainsi, le groupement des joints en un système déterminé entraîne pratiquement toujours l'*anisotropie* du milieu.

En conséquence, lorsque la perméabilité de la roche est subordonnée à l'influence des fissures et des chenaux, les conditions d'écoulement en milieu anisotrope doivent être appliquées. En fait, il semble que dans la zone où les fissures et les chenaux jouent un rôle prépondérant à l'égard de la circulation des fluides, ce soit généralement le cas.

## 3. La perméabilité des roches

Dans les roches présentant les trois types de porosité que nous avons rappelés plus haut, l'observation montre que les fluides s'écoulent le plus souvent en régime de nappe, à savoir en formant une surface piézométrique définie par des équipotentielles. Des régimes plus complexes peuvent exister dans certaines zones de massifs calcaires où des chenaux aquifères de section irrégulière, à grandes vitesses d'écoulement, créent des conditions piézométriques particulières. En dehors de ces cas, il était donc normal que l'on essayât d'assimiler le massif rocheux aquifère à un milieu poreux isotrope à grande échelle.

Les études de la perméabilité des roches ont été en fait inspirées par ce postulat. Par diverses méthodes expérimentales que nous rappellerons brièvement, on a pu donner des valeurs numériques de la perméabilité des roches. Nous verrons ensuite que pour obtenir une expression correcte de la perméabilité, il est nécessaire de prendre en considération l'anisotropie du milieu.

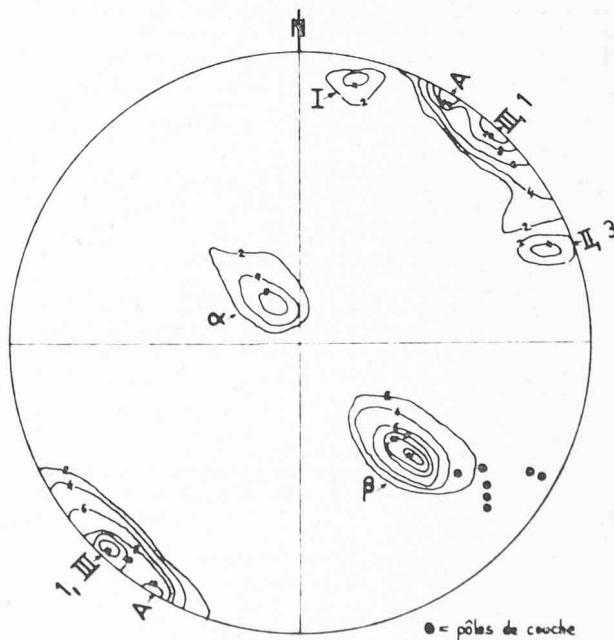


Fig. 2. — Projection des éléments structuraux mesurés dans la région du gouffre du Petit-Pré, dans le Jura vaudois (Kiraly, 1968). Les courbes donnent la fréquence des diaclases. Les cercles noirs sont les pôles de couches.

### 3.1 Permeabilité d'interstices

Comme la porosité d'interstices, mais non corrélativement, la perméabilité d'interstices varie dans de larges limites. Le tableau suivant en donne quelques valeurs<sup>1</sup>:

|  | Darcy<br>(Ki) | cm/s<br>(K)                                |
|--|---------------|--|
| 28 échantillons de calcaire<br>US Geol. Survey :                 |               |  |
| perméabilité horizontale, valeurs limites . . . . .              | 0,0000165—8,8 | $1,65 \cdot 10^{-8}$ — $8,8 \cdot 10^{-3}$ |
| moyenne arithmétique . . . . .                                   | 1,45          | $1,45 \cdot 10^{-3}$                       |
| perméabilité verticale, valeurs limites . . . . .                | 0,000033—29,7 | $3,3 \cdot 10^{-8}$ — $2,97 \cdot 10^{-2}$ |
| moyenne arithmétique . . . . .                                   | 2,42          | $2,42 \cdot 10^{-3}$                       |
| roches métamorphiques intactes . . . . .                         |               | non mesurable                              |
| grès albiens, forage de Savigny . . . . .                        | 0,001—0,0034  | $1 \cdot 10^{-6}$ — $3,4 \cdot 10^{-6}$    |
| grès Rupéliens - Chattiens (Baustein-schichten) Souabe . . . . . | 50—275        | $0,5$ — $2,75 \cdot 10^{-1}$               |

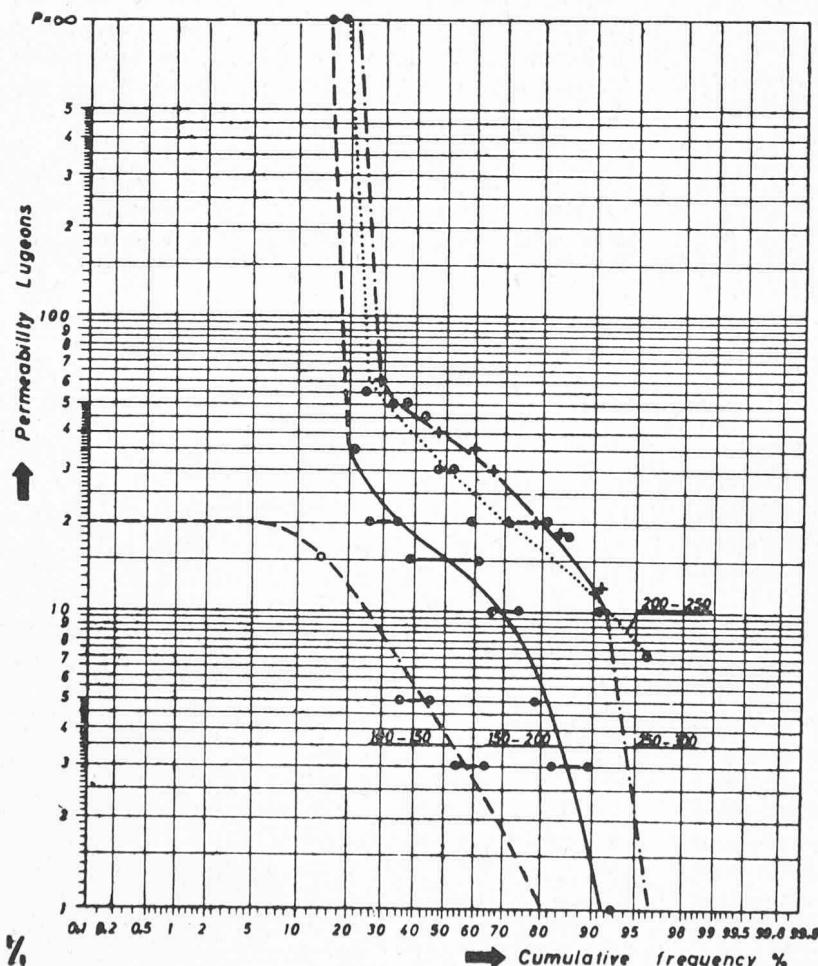


Fig. 3. — Courbes de fréquences cumulées des valeurs de la perméabilité dans le site du barrage de Peruća en Yougoslavie. Les courbes sont données pour chaque tranche de cinquante mètres au-dessous du fond de la vallée. (Borelli et Pavlin, 1967.)

<sup>1</sup> Nous adoptons ici les valeurs de la perméabilité intrinsèque (Ki) qui exprime la perméabilité du milieu rocheux abstraction faite des caractéristiques du fluide qui le traverse.

1 darcy ( $L^2$ ) =  $0,987 \cdot 10^{-8} \text{ cm}^2$  =  $0,966 \cdot 10^{-3} \text{ cm/s}$  = 18,2 meinzer.  
Le meinzer a pour unité : un gallon·jour/pied carré.

Ces chiffres montrent que la perméabilité intersticielle va pratiquement de zéro à des valeurs comparables à celles des terrains meubles alluviaux. Les mesures faites dans le calcaire mettent en évidence une sensible différence entre la perméabilité horizontale et la perméabilité verticale, ce qui dénote une anisotropie déjà au niveau intersticiel.

### 3.2 Permeabilité de fissures

Dans les roches cristallines et métamorphiques, dont la porosité d'interstices est pratiquement nulle et où les chenaux de dissolution ne peuvent pas se développer, la perméabilité est faible en règle générale, en dehors des zones spécialement fracturées. Des études faites sur le débit de puits en terrains cristallins ont donné des valeurs comprises entre 0,001 et 10,0 darcys. Les valeurs élevées se rapportent aux zones fortement fracturées.

### 3.3 Permeabilité de chenaux

Dans les roches carbonatées, la dissolution provoque un accroissement de la perméabilité. On rencontrera donc tous les termes intermédiaires entre les fissures peut être considérée comme infinie, pratiquement fermées et les zones caverneuses dans lesquelles la perméabilité

Les calcaires représentent le type de roche dans lequel la perméabilité résulte de la coexistence des pores, des fissures et de chenaux. Toutefois, les niveaux à circulation intersticielle importante sont exceptionnels. De même, les fissures praticables pour l'eau se sont transformées en chenaux, tandis que les autres restent passives.

On peut donc dire que les calcaires soumis à l'action de l'eau sont, en définitive, caractérisés par leur perméabilité de chenaux.

### 3.4 Détermination de la perméabilité

La nécessité de connaître la perméabilité à l'eau du socle rocheux dans les sites de barrages, a conduit à la généralisation de l'emploi de la méthode de mesure proposée par Lugeon, qui est appliquée, sous le nom d'essai Lugeon ou de Water Permeability Test (WPT). Rappelons qu'elle consiste à injecter de l'eau sous pression croissante, dans des forages de reconnaissance, par passes de cinq mètres. L'unité, le Lugeon, est représenté par un débit de 1 litre par minute et par mètre de longueur du forage, sous une pression de 1 bar. Il équivaut à 0,07 à 0,15 m/jour ou  $0,8 \cdot 10^{-4} \text{ cm/s}$ .

A titre d'exemple, nous donnons à la figure 3 les valeurs de perméabilité mesurées dans les calcaires du site de la retenue de Peruća en Yougoslavie, telles qu'elles sont rapportées dans la remarquable étude de Borelli et Pavlin (1967). Les courbes des fréquences cumulatives sont données pour chaque tranche de 50 m

au-dessous du site du barrage, dans sa partie centrale (niveau du terrain : environ 300 m). On constate nettement que la perméabilité de chenaux décroît avec la profondeur, surtout au-delà de 100 m sous la surface. A partir de très nombreux essais, les auteurs ont pu établir une loi de décroissance exponentielle de la perméabilité avec la profondeur. Par ailleurs, une partie importante des essais a donné des valeurs de perméabilité « infinies », c'est-à-dire que les forages ont coupé fréquemment des cavités dans lesquelles l'eau disparaît instantanément.

De leur côté, les hydrogéologues ont essayé de déterminer la perméabilité des roches à partir des essais classiques de débit, dans les forages. L'application de l'équation en régime non permanent de Theis (et de ses développements ultérieurs) est pratiquée couramment. Elle fournit des valeurs de la transmissivité et du coefficient d'emmagasinement. A partir de la transmissivité, la perméabilité se calcule facilement.

Mais on est en droit de se demander ce que représentent réellement les valeurs calculées ainsi. Vecchioli, par exemple (1967), met en doute la validité des formules de débit dans le cas de schistes au sein desquels la circulation de l'eau apparaît être nettement orientée (fig. 4).

Il est possible de traiter le volume de roche influencé par un puits, comme un milieu à porosité d'interstices à grande échelle. Rats et Chernyashov (1967) ont montré que la variabilité statistique de la perméabilité diminue, quand le nombre des fissures augmente. On peut effectivement considérer le volume influencé par un puits comme suffisamment grand pour que le nombre des fissures aquifères y soit élevé. Bachmat (1967) définit des équations moyennes d'écoulement pour un « volume

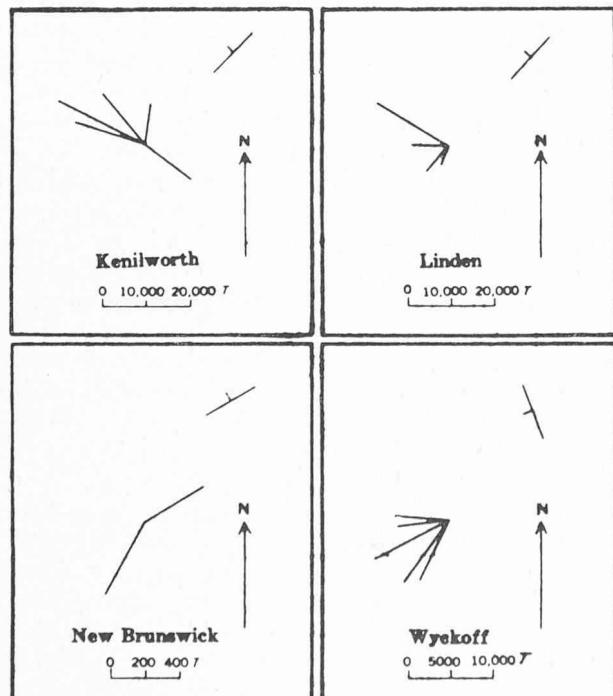


Fig. 4. — Transmissibilités directionnelles ( $T$ ) dans les schistes aquifères de Brunswick (New Jersey). Dans le coin supérieur droit de chaque site figure la direction des couches. L'échelle horizontale donne les valeurs de  $T$  en gal./pied-jour.

élémentaire représentatif ». Ce volume élémentaire est parcouru de canaux reliés les uns aux autres, dont le diamètre, la forme et la direction varient au hasard, mais ils doivent être plus ou moins *uniformément répartis dans l'espace*, pour que les équations s'appliquent.

On voit donc que pour saisir dans son essence le phénomène de la perméabilité des roches, il est nécessaire de prendre en considération l'anisotropie de la distribution des vides.

### 3.5 Permeability in anisotropic medium

La théorie générale de l'écoulement en milieu anisotrope a été développée à l'aide du calcul vectoriel. Si, dans un milieu poreux isotrope, la perméabilité définie par la loi de Darcy est une grandeur scalaire, en milieu anisotrope, elle est remplacée par un tenseur symétrique de deuxième ordre (cf. Scheidegger, A. E., 1963).

Il en résulte :

- 1) qu'en général la direction de l'écoulement ne correspond pas à la direction du gradient hydraulique ;
- 2) que dans trois directions orthogonales seulement, la direction de l'écoulement et celle du gradient peuvent être égales. Ces trois directions forment les trois axes principaux du tenseur de perméabilité.

On peut calculer les composantes du tenseur de perméabilité à l'aide des valeurs directionnelles de la perméabilité, telles qu'on peut les mesurer ; on arrive alors à la constatation suivante : l'inverse de la racine carrée de la perméabilité directionnelle, mesurée dans toutes les directions à partir d'un point d'un milieu anisotrope, donne une ellipsoïde. Les axes de celui-ci ont la direction des axes principaux du tenseur de perméabilité, leur longueur étant égale à l'inverse de la racine carrée des principales perméabilités.

A titre d'exemple, la figure 5 donne une représentation bidimensionnelle d'une série de mesures de perméabilité en milieu anisotrope (d'après Scheidegger, 1963, p. 73).

Le calcul permet donc de passer des directions principales de la perméabilité aux composantes du tenseur de perméabilité. Il reste cependant encore une étape à franchir, dans le cas des roches à porosité de fissures : celle d'établir les rapports qui doivent exister entre les directions principales de perméabilité et les orientations du système de fissures.

Des études à ce sujet sont en cours au Centre d'hydrogéologie de l'Université de Neuchâtel. Notre collabrateur, M. L. Kiraly, a mis au point une méthode d'établissement d'un tenseur de variance, applicable à la distribution des fissures et des chenaux dans le cas des roches calcaires.

Théoriquement ce tenseur devrait être superposable au tenseur de perméabilité. Pratiquement toutefois, une difficulté considérable réside dans la détermination des valeurs directionnelles de la perméabilité. Il est très rare, en effet, que l'on dispose d'un nombre suffisant de piézomètres autour d'un puits en roche consolidée. Et encore, les piézomètres ne permettent pas de mesurer la perméabilité dans les trois directions de l'espace aquifère. Toutefois, cette difficulté peut être partiellement surmontée dans le cas des roches calcaires précisément. En effet, toutes les fissures susceptibles de livrer passage à l'eau sont élargies par corrosion. Ainsi, en analysant

statistiquement toutes les directions des boyaux d'un réseau de grottes pénétrables, par exemple, il est possible de déterminer les axes principaux d'écoulement qui sont, dans une certaine mesure représentatifs des axes de perméabilités principales.

#### BIBLIOGRAPHIE

- BACHMAT, Y. (1967) : *Basic transport coefficients as aquifer characteristics*. A.I.H.S., Actes colloque Dubrovnik, 1967, p. 63-75.
- BORELLI, Mladen, PAVLIN, Boris (1967) : *Approach to the problem of the underground water leakage from the storages in karst regions*. A.I.H.S., Actes colloque Dubrovnik, p. 32-62, 15 fig.
- KIRALY, Laszlo (1968) : *Eléments structuraux et alignement de phénomènes karstiques*. Bull. Soc. neuchâteloise Sc. nat., t. 91, p. 128-146, 10 fig.
- MÉGNIEN, Cl. (1960) : *Stratigraphie et caractéristiques physiques du Crétacé supérieur de l'Yonne*. Annales Soc. géol. du Nord, t. LXXX, 1960, p. 204-210, 3 fig.
- MORRIS, D. A., JOHNSON, A. I. (1967) : *Summary of hydrologic and physical properties of rocks and soil materials, as analyzed by the hydrologic laboratory of the US Geological Survey, 1948-1960*. Geol. Surv. Water-supply paper, 1839 D, 42 p., 13 fig.
- RATS, M. V., CHERNYASHOV, S. N. (1967) : *Statistical aspect of the problem of the permeability of the jointy rocks*. A.I.H.S., Actes colloque Dubrovnik, p. 227-235, 5 fig., 1 table.
- SCHEIDECKER, Adrian E. (1963) : *The physics of flow through porous media*. 313 p., 46 fig. University of Toronto Press, 2d edition.
- VECCHIOLI, John (1967) : *Directional hydraulic behaviour of a fractured shale aquifer in New Jersey*. A.I.H.S., Actes colloque Dubrovnik, p. 318-326.

Adresse de l'auteur :

André Burger, professeur, Centre d'hydrogéologie de l'Université, 11, rue Emile-Argand, 2000 Neuchâtel.

#### DIVERS

##### Un nouvel entrepôt automatique chez CIBA à Monthey

Au cours de ces dernières années, l'usine de Monthey du groupe CIBA est devenue un centre important de production de masse, ce qui pose de nombreux problèmes de stockage. C'est pourquoi a été récemment réalisé un prototype d'entrepôt automatique. Il s'agit en fait d'un magasin automatique centralisé, pour le moment unique en son genre, avec synchronisation électronique des secteurs mécanique et comptable.

La gamme de fabrication de l'usine de Monthey comprend des produits liquides et solides que l'on peut stocker et expédier en vrac (citernes, wagons, silos, etc.) et des produits conditionnés en sacs, en bidons métalliques ou plastiques, en fûts, qui se prêtent très bien à la « palettisation ». L'assortiment compte 300 produits, subdivisés en quelque 4000 articles divers. Etant donné les possibilités de production de l'usine, il a fallu envisager un volume de stockage de 10 000 tonnes, correspondant à plus de 20 000 palettes. Les entrées et sorties journalières doivent atteindre un rythme horaire de 150 palettes.

Amenées par rail ou par route, les palettes sont tout d'abord préparées manuellement. Puis des installations les acheminent dans les caissons choisis par l'ordinateur, indépendamment de toute intervention humaine. L'or-

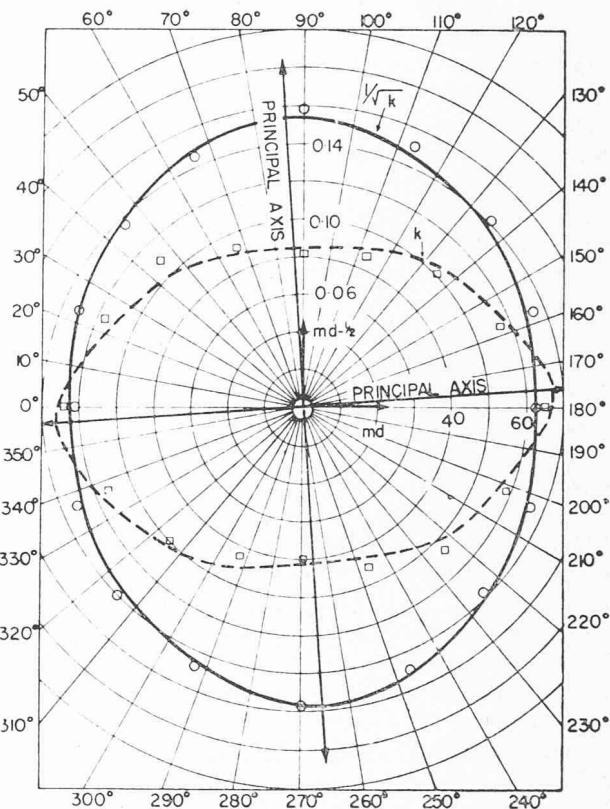


Fig. 5. — Diagramme de perméabilité polaire. Les valeurs de la perméabilité mesurées ( $k$ ) sont reliées par une courbe compliquée (pointillée). Si l'on reporte les valeurs de  $k^{-\frac{1}{2}}$  (petits cercles) on s'aperçoit qu'elles s'alignent fort bien sur une ellipse. Cette application concrétise la théorie du tenseur de perméabilité.

dinateur suit en permanence les mouvements de la marchandise, que ce soit sur les dispositifs de transport horizontaux ou sur les grues. En cas d'arrêt ou de panne de courant, l'ordinateur reproduit en imprimé l'image de l'emplacement exact des palettes en mouvement. Aussitôt que la marchandise est déposée dans son caisson, l'ordinateur enregistre et comptabilise les stocks. L'ordinateur assumant la gestion et le contrôle des mouvements des palettes est un IBM/360 modèle 40. Sa capacité de mémoire interne s'élève à 128 K-bytes. Il est complété par trois unités de mémoires écrites sur disque magnétique, modèle IBM 2311. Deux unités de contrôle IBM 2701 sont reliées aux unités de process-control IBM 1070, à qui incombe la liaison entre la partie électronique et les éléments mécaniques tels que bandes de transport et grues. Le parc comprend enfin un lecteur de cartes IBM 2540 et une imprimante rapide IBM 1403.

Il est bon de préciser que cet entrepôt automatisé est une réalisation exceptionnelle en ce qui concerne l'emploi de l'ordinateur, car celui-ci est physiquement relié aux mécanismes de transport et c'est lui, et *lui seul*, qui dirige le fonctionnement de tous ces mécanismes. C'est pourquoi il n'est pas exagéré de dire que l'automatisation est ici complète, alors qu'elle n'a été que partielle jusqu'à présent dans d'autres réalisations similaires.

En effet, l'entrepôt se compose d'un réseau de transporteurs mécanisés verticaux et horizontaux qui comprend 25 aiguillages. L'ordinateur doit balayer régulièrement