

Communication
présentée au Comité Technique
de la Société Hydrotechnique
de France
le 20 mars 1970

COMPORTEMENT DES ROCHES SOUS CONTRAINTE EN FONCTION DE LEUR TENEUR EN EAU

PAR P. MORLIER *

Introduction

On sait que pour tous les solides l'adsorption de gaz et de vapeurs provoque un abaissement de résistance et de rigidité et peut même modifier leur comportement rhéologique [1]; les roches ne font pas exception à cette règle, cette propriété est même accentuée par le fait que les roches, souvent fissurées, ont une surface spécifique non négligeable.

On connaît d'autre part l'influence de la pression interstitielle sur le comportement des pseudo-solides, en particulier des sols [2].

Nous étudions ici l'influence de l'eau sur le comportement mécanique, essentiellement sur la résistance, des roches fissurées ou poreuses, en distinguant les deux types d'action précédents :

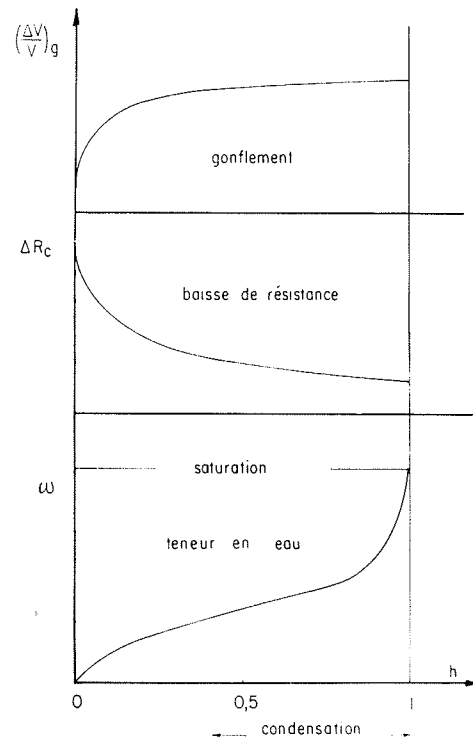
— les phénomènes de surface, dus à la présence d'une eau fortement liée physiquement au solide, même sous faible teneur en eau, qui se traduisent par l'existence d'une pression interne dite de gonflement;

— les actions mécaniques de pression interstitielle, dues à la présence d'eau libre sous tension (phénomènes de capillarité) ou sous pression.

1. — Importance des phénomènes de surface

1.1 Quelques faits expérimentaux.

Si nous représentons schématiquement, sur la figure 1, trois propriétés des roches en fonction de l'humidité relative h , nous observons :



1/

- que le gonflement $(\Delta V/V)_g$ isotrope ou non selon les roches, est surtout important pour les faibles humidités relatives;
- que l'abaissement de résistance en compression simple ΔR_c , par rapport à la résistance de la roche dite sèche, suit une évolution semblable;

* Ingénieur E.M.P., docteur ès-Sciences, Laboratoire de Mécanique des Solides de l'Ecole Polytechnique.

— que l'augmentation de *teneur en eau* w est par contre accélérée au voisinage de la pression de vapeur saturante ($h = 1$).

Comme d'autre part l'eau ne peut se condenser et exercer des actions capillaires qu'au-delà d'une certaine humidité relative, on est amené à l'idée que l'adsorption joue un rôle prépondérant dans l'abaissement des propriétés de résistance de la roche et que gonflement et abaissement de résistance peuvent avoir une même explication, comme nous le verrons plus loin.

Nous pouvons maintenant faire quelques remarques importantes.

a) La courbe (w, h) n'est pas réversible, en raison de la géométrie de la porosité : pour une humidité relative h , la loi de Kelvin fait correspondre un rayon de ménisque :

$$r = \frac{-2\gamma}{RT/MV \text{Log } h} *$$

à la désorption, les pores de diamètre supérieur à $r \cos \theta$ se vident du liquide qui y était condensé, tandis que les pores de diamètre inférieur à $r \cos \theta$ présentent des ménisques qui s'opposent à l'évaporation du liquide qu'ils contiennent; à l'adsorption au contraire, les pores se remplissent progressivement à mesure que les couches adsorbées se multiplient.

b) L'humidité relative minimale pour l'existence d'une eau condensée correspond à un rayon de ménisque d'environ 10^{-6} mm ($h \neq 0,40$).

c) Le temps nécessaire pour qu'une roche se mette en *équilibre* avec une atmosphère d'humidité relative donnée peut atteindre quelques mois, d'où la difficulté de l'expérimentation [8].

d) En particulier, il est très difficile d'obtenir une roche vraiment *sèche* car certaines molécules d'eau, très liées, sont difficiles à extraire de la surface interne de la roche; deux publications récentes [3] [4] nous montrent en particulier que la résistance maximale d'une roche est obtenue, après une dessiccation sévère, sous un vide poussé (voir le tableau suivant).

Résistance à la compression simple d'un basalte, d'après Krokosky et Husak [3] :	
état normal	$R_c = 1\ 110$ bars
après cuisson à 260° :	
— essai dans l'air	$R_c = 1\ 690$ bars
— essai sous vide modéré (10^{-4} mm Hg)	$R_c = 1\ 990$ bars
-- essai sous ultravide (10^{-8} mm Hg)	$R_c = 2\ 070$ bars
Résistance à la compression simple d'une diabase, d'après Simpson et Fergus [4] :	
après séchage à l'air ou sous vide (110°C ou 27°C)	
échantillons immergés dans l'eau ...	$R_c = 3\ 600$ bars
échantillons séchés à plus de 190° ..	$R_c = 4\ 900$ bars

* γ : tension superficielle de l'eau;
 R : constante des gaz;
 T : température absolue;
 M : masse moléculaire de l'eau;
 V : volume spécifique de l'eau;
 θ : angle de mouillage.

1.2 Interprétation parallèle du gonflement et de la baisse de résistance.

1.2.1 Baisse de l'énergie libre de surface par adsorption de vapeurs.

Des résultats classiques de thermodynamique des phénomènes de surface montrent que la variation de l'énergie libre de surface G_s d'un solide en contact avec une vapeur est :

$$\Delta G_s = RT \int_{h_1}^{h_2} \Gamma(h) d \text{Log } h$$

où $\Gamma(h)$ est le nombre de moles adsorbées par unité de surface à l'humidité relative h ; il y a donc *diminution* monotone de G_s lorsqu'on passe de la roche sèche à la roche saturée par adsorption d'eau.

— *Gonflement* dû à une baisse de G_s : un calcul très simplifié du gonflement peut être fait en supposant la roche constituée de grains sphériques de même diamètre d ; chaque grain est constitué d'une zone externe tendue (par les tensions superficielles) supposée infiniment mince et d'une zone interne comprimée dont le module de compressibilité est K ; pour une diminution ΔG_s , le grain gonfle de $4 \Delta G_s / Kd$; par extension, en faisant apparaître la surface spécifique S , on obtient la formule de Bangham :

$$\left(\frac{\Delta V}{V}\right)_g \propto \frac{S}{K} \Delta G_s.$$

-- *Baisse de résistance* due à une baisse de G_s : dans toute théorie de la rupture des roches soit fissurées soit poreuses, on doit connaître la résistance σ_0 de la matrice solide à la décohésion; celle-ci est donnée par Orowan comme :

$$\sigma_0 = \sqrt{2 G_s E / a} *$$

si G_s est abaissée, σ_0 et donc toutes les résistances (en particulier R_c) de la roche sont abaissées.

1.2.2 Pression d'écartèlement.

Si nous nous intéressons maintenant à la texture de la porosité des roches, nous voyons que certaines infractuosités, les extrémités des fissures en particulier, peuvent avoir des dimensions voisines de celles des molécules d'eau adsorbée.

EXEMPLE : pour un granite de Saint-Germain-de-Moédon [5], nous avons trouvé aux fissures une épaisseur moyenne de $5 \cdot 10^{-4}$ mm et une longueur moyenne de 5 mm.

Dans ces conditions, une adsorption complète (multi-couche) de vapeur d'eau est rendue impossible par manque de place, il y a adsorption *restreinte*. Powers [6] a montré que l'équilibre thermodynamique implique que plus l'adsorption est restreinte, plus la phase adsorbée est sous pression élevée; cette pression de l'adsorbé est évidemment contrebalancée par une mise sous tension du squelette solide, d'où son nom de pression d'écartèlement (disjoining pressure). Cette pression P_d ne peut être calculée dans l'absolu, mais on peut calculer ses variations à partir de l'état saturé ($h = 1$) :

$$\Delta P_d = (RT/MV_a) \text{Log } h **$$

* E : module d'Young de la matrice;
 a : distance entre deux plans atomiques.
 ** V_a : volume spécifique de l'eau adsorbée.

ΔP_d (tension) est à peu près égale à la tension capillaire :

$$P_c = (RT/MV) \text{Log } h$$

mais s'exerce sur des portions différentes de la surface interne de la roche : X_d pour la tension ΔP_d , X_c pour la tension P_c (par unité de surface spécifique).

— *Retrait* : On peut écrire le retrait, par rapport à l'état $h = 1$:

$$(\Delta V/V)_g = (1/K') [X_d \Delta P_d + X_c P_c]$$

où K' est le module de compressibilité du squelette solide.

— *Baisse de résistance* : l'adsorption restreinte se traduit par une mise sous un état de tension hydrostatique du squelette solide, d'où un abaissement de résistance par simple considération de la courbe intrinsèque de la roche.

1.2.3 Approche macroscopique.

Baisse de l'énergie libre de surface et pression d'écartèlement expliquent la baisse de résistance de la roche due à l'adsorption mais ces interprétations laissent des questions en suspens : quelle est la part quantitative relative des deux actions ? Peut-on imaginer lors de la propagation d'une fissure que les molécules d'eau viennent s'adsorber sur les surfaces fraîchement créées, abaissant G_s au fur et à mesure de la fissuration ?

Devant ces difficultés nous avons adopté l'approche macroscopique et le critère de la contrainte de gonflement : si nous regardons sur la figure 2 les courbes intrinsèques d'un calcaire d'Hauteville dit sec ou saturé, on voit qu'elles sont parallèles et que tout se passe donc comme si la roche saturée était la roche sèche soumise à une tension hydrostatique dite de gonflement; cette contrainte de gonflement σ_g (75 bars) a été mesurée par ailleurs directement lors de la saturation d'une éprouvette et la valeur obtenue a été en bon accord.

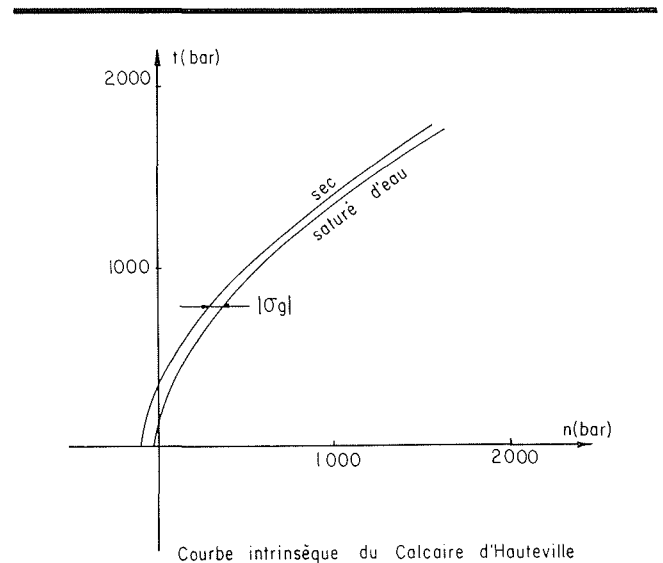
Toutes nos manipulations ont été faites sur des roches sèches et saturées [7] mais l'interprétation des résultats de Colback et Wiid [8] montre comment σ_g varie avec l'humidité relative (fig. 3) et cette variation est tout à fait prévisible à partir des travaux de Powers [6].

Citons enfin le fait important suivant : un résultat maintenant classique en mécanique des roches est que la dispersion des résultats de résistance et l'effet d'échelle s'évanouissent simultanément lorsque la contrainte moyenne augmente; les résultats suivants, obtenus sur des séries de dix ruptures en compression simple du calcaire d'Hauteville, montrent que la saturation en eau, comme le ferait une contrainte moyenne négative, accroît la dispersion, et corrélativement l'effet d'échelle :

Calcaire sec :	
résistance moyenne	2 020 bars
écart quadratique moyen	150 bars
Calcaire saturé :	
résistance moyenne	1 500 bars
écart quadratique moyen	340 bars

2. — Rôle mécanique de l'eau

Le chapitre précédent a permis de montrer comment l'eau très liée (adsorbée) modifie les propriétés de la matrice solide de la roche par modification des résistances locales et par superposition de contraintes internes, mais il ne faut pas oublier que l'eau condensée libre a égale-



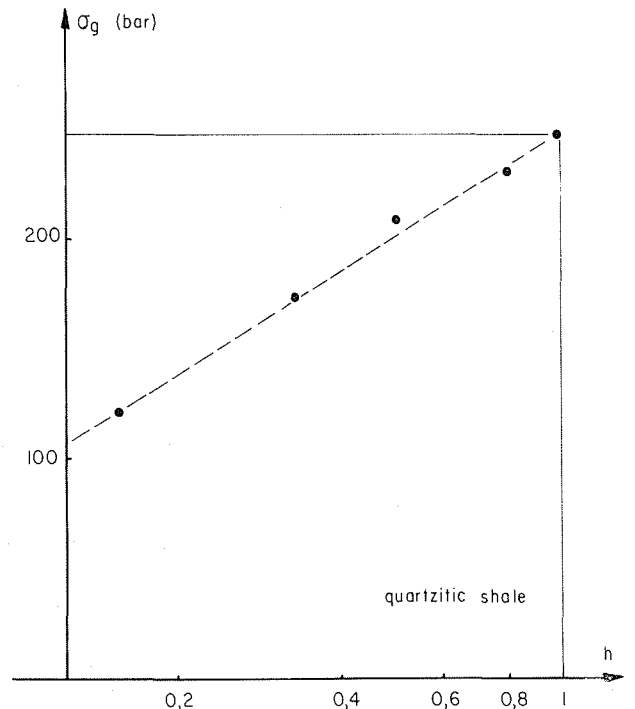
2/

ment, par son action mécanique, un rôle important sur la résistance des roches.

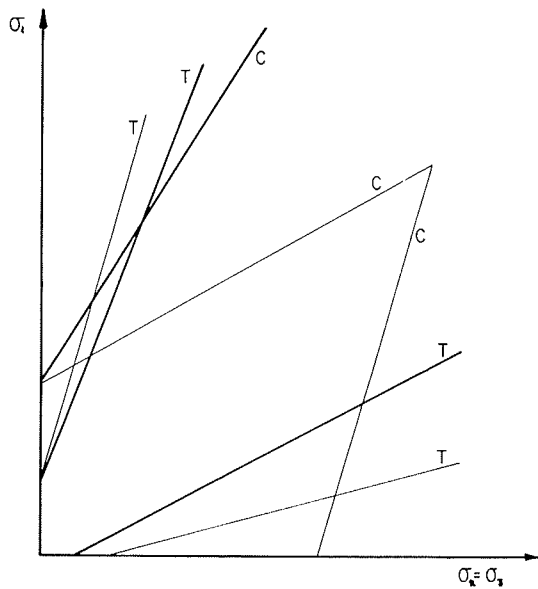
2.1 Pression dans l'eau libre.

2.1.1 *La tension capillaire* P_c comme nous l'avons vu plus haut n'est guère dissociable des variations de la pression d'écartèlement.

Son rôle a été mis en évidence par Kjaernsli et Sande [9] sur une syénite : la résistance d'une syénite, saturée, comprimée dans l'air, est 94 % de la résistance de la roche sèche mais si la roche saturée est comprimée entourée d'eau la résistance passe à 85 % de la résistance de la roche sèche; c'est que, dans le deuxième cas, la suppression des ménisques supprime la tension interne capillaire et augmente la contrainte de gonflement.

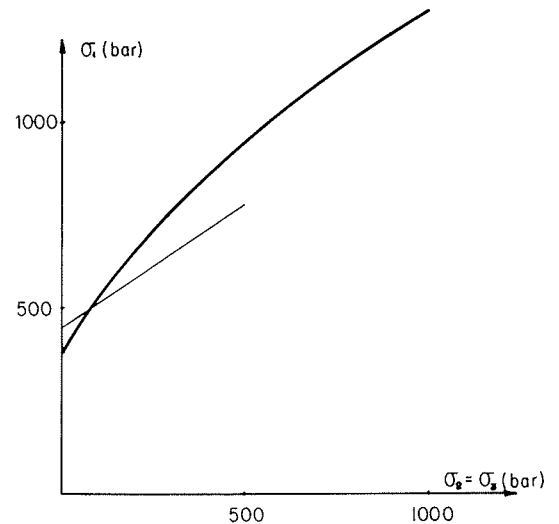


3/



— $u = 0$
 — $u = \sigma_2 = \sigma_3$
 corps poreux modèle

4/



Mortier normalisé
 — sec
 — saturé gainé ($u = \chi \sigma_m$)

5/

2.1.2 La pression de pore u peut être :

- imposée de l'extérieur, comme la pression de couche dans les réservoirs pétroliers;
- créée par les contraintes extérieures appliquées à la roche, dans les essais dits non drainés ou dans des essais rapides pour des corps à perméabilité faible; on montre alors que la pression de pore u est proportionnelle à la contrainte extérieure moyenne σ_m [10] :

$$u = \chi \sigma_m$$

avec :

$$0 < \chi < 1$$

2.2 Rôle de la pression de pore selon le mécanisme de rupture.

Une étude récente [8] nous a montré que selon les mécanismes de rupture de la roche — c'est-à-dire en particulier selon la valeur de la contrainte extérieure moyenne — le rôle mécanique de l'eau libre était différent.

2.2.1 Le mécanisme de rupture par glissement est prépondérant dans les sols et les roches peu consolidées; ces corps obéissent alors à un critère de Mohr et au critère de contrainte effective :

$$\sigma_{ij \text{ eff}} = \sigma_{ij} - \delta_{ij} u \quad *$$

Rappelons que le tenseur des contraintes effectives est celui qui régit la rupture, et que σ_{ij} est le tenseur des contraintes extérieures.

2.2.2 Le mécanisme de rupture par fissuration est prépondérant pour les roches fragiles sous faible contrainte moyenne; si les fissures sont ouvertes — c'est le cas pour les essais de traction —, la rupture obéit au critère de Griffith et les contraintes effectives ont la même définition que pour les sols; si les fissures sont fermées — c'est le

cas pour les essais de compression — la rupture obéit au critère de Griffith modifié par Mc Clintock et Walsh et les contraintes effectives sont :

$$\sigma_{ij \text{ eff}} = \sigma_{ij} - \delta_{ij} (1 - a) u$$

où $a (> 0)$ représente la surface moyenne refermée (où les lèvres des fissures sont en contact) par rapport à la surface totale des fissures.

2.2.3 Le mécanisme de rupture des roches poreuses non fissurées comme la craie, les laves, (le béton et les briques), est différent. Pour des contraintes moyennes faibles c'est l'apparition de fissures parallèles à la direction de la compression la plus forte qui est la première manifestation de la rupture; pour des contraintes moyennes plus fortes c'est l'écrasement des pores par compression locale qui est prépondérant. Sur la figure 4 nous avons par exemple tracé le domaine de stabilité d'un modèle de corps poreux fragile (matrice fragile comprenant un petit nombre de trous sphériques) dans le plan des contraintes principales :

$$(\sigma_1, \sigma_2 = \sigma_3)$$

les droites T représentent l'apparition de fissures et les droites C l'apparition d'écrasements locaux. Si nous introduisons une pression de pore u , on s'aperçoit que le domaine élastique est élargi lorsque le mécanisme d'écrasement des pores est prépondérant, (la pression de pore joue le rôle de soutènement); sur la figure 4 encore on a tracé le domaine élastique du même modèle de corps poreux fragile avec une pression de pore $u = \sigma_2 = \sigma_3$ montrant cette propriété.

Sur la figure 5 enfin nous pouvons voir le domaine élastique d'un mortier normalisé soit sec, soit saturé d'eau dans un essai non drainé; la pression de pore développée par les contraintes extérieures accroît donc le domaine élastique et devient rapidement prépondérante par rapport aux effets de surface visibles en compression simple où le mortier sec est le plus résistant.

* δ_{ij} : tenseur unité.

Conclusions

L'eau très liée modifie les propriétés de la matrice solide des roches par abaissement des résistances locales (abaissement de l'énergie libre de surface) et par superposition de contraintes internes de traction (pression d'écartèlement); cette action est prépondérante pour les basses teneurs en eau.

L'eau libre a également, par son action mécanique, une influence sur la résistance des roches; cette influence est différente selon la nature des roches et la contrainte moyenne c'est-à-dire selon le mécanisme de rupture.

Bibliographie

[1] DAVIES-RIDEAL. — Interfacial Phenomena. *Academic Press* (1961).

- [2] MANDEL. — Essai sur la mécanique physique des pseudo-solides. *Mémoires et Documents*, n° 12 (1947).
- [3] KROKOSKY et HUSAK. — Strength Characteristics of Basalt Rock in Ultra High Vacuum. *Jour. Geophys. Res.*, 73, 6, 2237-2248 (1968).
- [4] SIMPSON et FERGUS. — The Effect of Water on the Compressive Strength of Diabase. *Jour. Geophys. Res.*, 73, 20, 6591-6594 (1968).
- [5] MORLIER. — Description de la fissuration d'une roche à partir d'essais mécaniques. *Colloque de Géotechnique de Toulouse* (1969).
- [6] POWERS. — The Thermodynamics of Volume Change and Creep. *Matériaux et Constructions*, 1, 6, 487-508 (1968).
- [7] MORLIER. — Influence de l'eau sur la résistance des roches. *IIIrd Budapest Conference on Soil Mechanics* (1968).
- [8] COLBACK et WIID. — The Influence of Moisture Content on the Compressive Strength of Rock. *C.S.I.R. Publication* (1965).
- [9] KJAERNSLI et SANDE. — Compressibility of some Coarse-Grained Materials. *Eur. Conf. Soil Mech. Found. Eng.*, Wiesbaden, vol. 1, 245-251 (1963).
- [10] MORLIER. — Rôle des fluides en mécanique des roches. (A paraître). *2° Cong. Soc. Int. Méc. Roches*, Belgrade, septembre 1970 (1969).

Discussion

Président : M. RACT-MADOUX

En l'absence de M. J. CABANIUS empêché, la séance est présidée par M. RACT-MADOUX, directeur adjoint à la Direction de l'Equipe de l'E.D.F. et secrétaire du Comité français des grands barrages.

En ouvrant la dernière séance de la session, M. le Président rappelle que celle-ci est consacrée aux applications des propriétés rhéologiques des roches; elle devrait provoquer de fructueux échanges de vue entre les spécialistes de la mécanique des roches classique et ceux de la rhéologie des pseudo-solides.

Il donne ensuite la parole à M. MORLIER qui présente son exposé.

M. le Président remercie M. MORLIER pour son exposé très clair qui met bien en lumière les phénomènes de surface et le rôle mécanique de l'eau dans les roches. Il ouvre ensuite la discussion.

« Vous avez écrit, dit M. VAN GEEN, que la pression de pore est proportionnelle à la contrainte moyenne.

De quelle contrainte moyenne s'agit-il ? »

« Il s'agit, répond M. MORLIER, de la contrainte extérieure moyenne, c'est-à-dire de la contrainte moyenne telle qu'on peut la mesurer de l'extérieur. Cette contrainte s'applique à la fois sur le squelette solide et sur le remplissage des vides que comporte la roche; s'il n'y a pas de liquide à l'intérieur de ces derniers, ladite contrainte s'exerce uniquement sur le squelette du corps poreux. »

M. RÉMÉNÉRAS demande si le « modèle » présenté par M. MORLIER est applicable au cas de terrains alluvionnaires à grains relativement fins. Pourrait-il être utilisé par exemple pour l'interprétation de l'affaissement du sol à Venise qui a fait l'objet de nombreux commentaires dans la presse? Certains ingénieurs attribuent ce déplacement à l'action de pompes intensifs pratiqués dans un aquifère en charge d'environ 8 m de puissance gisant à 80 m au-dessous de la surface sous une couverture d'alluvions fines.

M. MORLIER pense que les phénomènes qu'il a décrits — baisse de la pression de pore et tassement des matériaux sont certainement à prendre en cause, ainsi, peut-être, que les phénomènes de surface d'autant plus importants que le matériau est plus fin.

M. EYRAUD (Rhône-Poulenc) pose les deux questions suivantes :

1° « Quelles méthodes avez-vous employées pour déterminer les rayons de pores des roches expérimentées ? »

2° « Avez-vous envisagé d'étudier les variations de résistance intervenant dans des roches poreuses lorsqu'il se produit des changements de phase dans la phase adsorbée, par abaissement de température ? »

Le rayon de pores, répond M. MORLIER, a été mesuré dans le cas des calcites de Saint-Germain immédiatement après prélèvement de l'échantillon par perméabilité aux gaz sous gradient variable, à partir des écarts observés par rapport à la loi de Darcy. On a déterminé ainsi un rayon moyen de pore de 500 Angström (ordre de grandeur moyen de l'épaisseur des fissures).

M. MORLIER n'a pas étudié les questions du gel, mais a constaté que celui-ci conduisait à des modifications de comportement d'autant plus sensibles que le rayon de pores est plus faible.

M. MALAN intervient en ces termes :

« J'ai vu beaucoup d'expériences de tirs de mine dans la craie et j'ai constaté avec un certain étonnement, au début, que la propagation de l'ébranlement dû à des charges de 2 ou 3 t d'explosifs se faisait sentir à une distance considérable, de l'ordre de 2 ou 3 km. Je voudrais demander au conférencier si cette propagation très lointaine ne serait pas due aux bancs de silex dont la craie est ordinairement truffée; s'il n'y avait pas de silex, il semble que l'onde de choc serait rapidement amortie ? »

« En effet, répond M. MORLIER, dans la craie, qui est un matériau très poreux, les ondes acoustiques et aussi les ondes de choc sont très rapidement amorties; mais dès que cette craie est, par exemple, remplie d'eau, on constate que l'absorption des ondes est plus faible et que celles-ci peuvent se propager plus loin. Evidemment, si la craie se transforme en silex, je suis persuadé que l'effet se propage très loin. »

En tant que constructeur de barrages, M. le Président demande à M. MORLIER quelles conclusions pratiques il doit tirer de son intéressant exposé, étant observé que dans la pratique les roches ne sont pas suffisamment desséchées pour atteindre leur résistance idéale ainsi que cela doit être réalisé sur la Lune.

En effet, répond M. MORLIER, il faut considérer les roches dans leur état naturel lequel n'est pas toujours aussi défavorable que celui des échantillons saturés que l'on réalise parfois au laboratoire.

M. le Président remercie M. MORLIER et toutes les personnes qui sont intervenues dans la discussion.

LA HOUILLE BLANCHE

rappelle
ses volumes
hors-série
et ses
numéros
spéciaux

HYDRAULIQUE ET ÉLECTRICITÉ FRANÇAISES

Édition anglaise : Un volume (1950), 413 pages..... Broché 50 F

B O R T

Un volume (1953), 367 pages..... Broché 50 F

DONZÈRE-MONDRAGON

Un volume (1955), 486 pages..... Relié 80 F

T I G N E S

Un volume (1958), 440 pages..... Relié 80 F

LE DANUBE

N° 2/1964 de « La Houille Blanche », 218 pages..... Broché 50 F

LES ÉNERGIES DE LA MER

IV^{es} Journées de l'Hydraulique de la Société Hydrotechnique de France (1956).
Deux volumes, 751 pages..... Brochés 160 F

TURBINES ET POMPES HYDRAULIQUES

V^{es} Journées de l'Hydraulique de la Société Hydrotechnique de France (1958).
Deux volumes, 730 pages..... Brochés 160 F

L'HYDRAULIQUE SOUTERRAINE

VI^{es} Journées de l'Hydraulique de la Société Hydrotechnique de France (1960).
Deux volumes, 663 pages..... Brochés 160 F

BULLES ET GOUTTES : La tension superficielle en hydraulique

VII^{es} Journées de l'Hydraulique de la Société Hydrotechnique de France (1962).
Deux volumes, 624 pages..... Brochés 200 F

LES INSTABILITÉS EN HYDRAULIQUE ET EN MÉCANIQUE DES FLUIDES

VIII^{es} Journées de l'Hydraulique de la Société Hydrotechnique de France (1964).
Deux volumes, 674 pages..... Brochés 250 F

L'HYDRAULIQUE DU POINT DE VUE MÉDICAL

N° 2/1966 de « La Houille Blanche », 150 pages..... Broché 40 F

MACHINES HYDRAULIQUES

N° 2-3/1968 de « La Houille Blanche », 150 pages..... Broché 40 F

ASSAINISSEMENT DES TERRES

Nos 6 et 7/1968 de « La Houille Blanche », 2 volumes, 216 pages..... Brochés 48 F

DIFFUSION TURBULENTE DANS LES FLUIDES

Nos 3 et 4/1969 de « La Houille Blanche », 2 volumes, 212 pages..... Brochés 48 F

LA MESURE DES DÉBITS LIQUIDES

N° 5/1969 de « La Houille Blanche », 1 volume, 166 pages..... Broché 50 F

INFILTRATION DANS LES SOLS NON SATURÉS

N° 8/1969 de « La Houille Blanche », 1 volume, 150 pages..... Broché 50 F

PLATES-FORMES DE FORAGE. RÉSERVOIRS PÉTROLIERS SOUS-MARINS

Nos 2 et 3/1970 de « La Houille Blanche », 2 volumes, 188 pages..... Brochés 48 F