

## La perméabilité équivalente des grès fissurés de la région d'Elatos en Macédoine occidentale (Grèce)

J. Meladiotis

Laboratoire de Géologie du Génie Civil. Ecole Polytechnique de l'Université Aristote de Thessaloniki, 54006 Thessaloniki — Grèce.

*Ж. Меладитис — Еквивалентната проницаемост на напуканите пясъчници от областта на Елатос в Западни Македония (Гърция).*

Изследвана е проницаемостта на напукани пясъчници в мястото на бъдещ язовир до с.Елатос. Поради анизотропността на средата тази проницаемост се разглежда като тензор, дефиниран от уравнението на Кирали. Многочислени измервания на пукнатини (ориентация, средна отвореност, средна честота) са позволили да се изчисли (чрез специална компютърна програма) еквивалентната проницаемост. След като е отчетено вторичното запълване с калцит на пукнатините, за проницаемостта са получени стойности от  $1,2 \cdot 10^{-6}$  до  $2 \cdot 10^{-6}$  m/s.

### Introduction

Les grès fissurés, de faciès molasse, qui affleurent sur le site de fondation de barrage en terre dans la région du village d'Elatos en Macédoine Occidentale (fig. 1), constituent un milieu hétérogène et anisotrope dans lequel la circulation de l'eau se fait à travers des fissures, ou encore le long de leurs plans d'intersection.

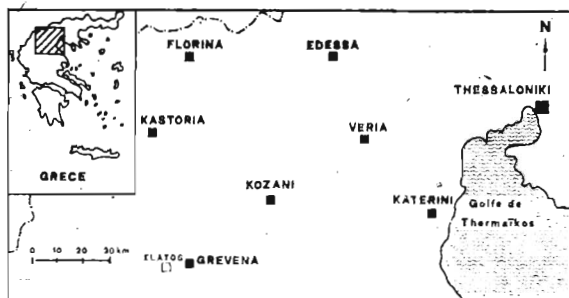


Fig. 1. Carte schématique de la Macédoine Occidentale (Grèce)

Puisque le projet se trouve à l'état d'étude préliminaire et étant donné que l'écoulement dans ce milieu est gouverné essentiellement par la fissuration, pour estimer en cette phase (et avant la construction des forages) la perméabilité des grès fissurés, nous avons été obligés de calculer leur perméabilité équivalente à partir des caractéristiques géométriques et mécaniques des fissures.

## Relation entre perméabilité et fissuration

Soit tout d'abord une fissure plane, d'ouverture constante, qui traverse un cube élémentaire d'un milieu rocheux.

En régime laminaire, l'écoulement dans cette fissure est régi par la loi expérimentale de Darcy :

$$(1) \quad \vec{v} = -k \vec{J}$$

où  $\vec{v}$  est la vitesse de filtration;  $k$  — le coefficient de perméabilité, et  $\vec{J}$  — le gradient du potentiel hydraulique dans le plan de la fissure.

Le coefficient de perméabilité est un tenseur symétrique du second ordre, qui transforme linéairement le vecteur du gradient hydraulique en un vecteur de vitesse de filtration qui, en général, n'est pas parallèle au premier.

Supposons maintenant que le volume de référence soit parcouru par une famille  $i$  de fissures parallèles, d'orientation  $n$ , de fréquence  $f$  et d'ouverture  $d$ . Dans ce cas, et pour un écoulement laminaire, le tenseur  $k$  de perméabilité équivalente résultant en un point du cube élémentaire, est donné par la formule de Kiraly (1969):

$$(2) \quad \bar{k}_i = \frac{g}{12\gamma} f_i d_i^3 [I - \vec{n}_i \otimes \vec{n}_i]$$

où  $g$  est l'accélération de la pesanteur en  $\text{ms}^{-2}$ ;  $\gamma$  — la viscosité cinématique de l'eau en  $\text{ms}^{-1}$ ;  $f_i$  — la fréquence moyenne des fissures de la  $i$ -ème famille en  $\text{m}^{-1}$ ;  $d_i$  — l'ouverture moyenne des fissures de la  $i$ -ème famille en  $\text{m}$ ;  $I$  — la matrice identité, et  $\vec{n}_i \otimes \vec{n}_i$  — le produit tensoriel de la normale au plan des fissures par elle-même.

Si  $x$ ,  $y$  et  $z$  sont les coordonnées du vecteur normal au plan des fissures dans le repère géographique OXYZ avec OX orienté vers l'Est, OY vers le Nord et OZ vers

le haut, la matrice  $I - \vec{n}_i \otimes \vec{n}_i$  peut s'écrire :

$$[I - \vec{n}_i \otimes \vec{n}_i] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x^2 & xy & xz \\ -xy & y^2 & yz \\ xz & yz & z^2 \end{bmatrix},$$

$$\text{où} \quad \bar{A} = \begin{bmatrix} 1-x^2 & -xy & -xz \\ -xy & 1-y^2 & -yz \\ -xz & -yz & 1-z^2 \end{bmatrix},$$

d'où

$$(3) \quad \bar{k}_i = \frac{g}{12\gamma} f_i d_i^3 \bar{A}_i.$$

En supposant que les valeurs des angles de la direction et du pendage du plan des fissures sont respectivement  $\alpha$  et  $\beta$ , les coordonnées du vecteur unitaire porté par la normale sont :

$$x = \cos \alpha \sin \beta$$

$$y = -\sin \alpha \sin \beta$$

$$z = \cos \beta.$$

Lorsqu'il existe plusieurs familles de fissures, on suppose que les écoulements se superposent, et on obtient le tenseur global de perméabilité par une simple addition des tenseurs partiels dus à chaque famille et aux intersections des familles deux à deux

Puisque le tenseur partiel qui correspond à l'écoulement de l'eau dans les inter-sections des fissures est toujours petit devant celui de l'écoulement dans les plans de fissures (Louis, 1968; Antoine et al., 1980), négliger ce terme et par conséquent le tenseur global de perméabilité équivalente du milieu rocheux, s'exprime par la formule:

$$(4) \quad \bar{k} = \frac{g}{12\gamma} \sum_{i=1}^N f_i d_i^3 \bar{A}_i$$

où  $N$  est le nombre des familles de fissures.

### Application pratique au cas des grès fissurés de la région d'Elatos — résultats obtenus

#### Structure géologique de la région étudiée

La région étudiée, située au Sud du village d'Elatos à une distance de 9 km à l'Ouest de Grevena (fig. 2), appartient du point de vue structural à la zone de la Grèce Orientale ou Subpélagonienne, dans l'ensemble des Hellenides.

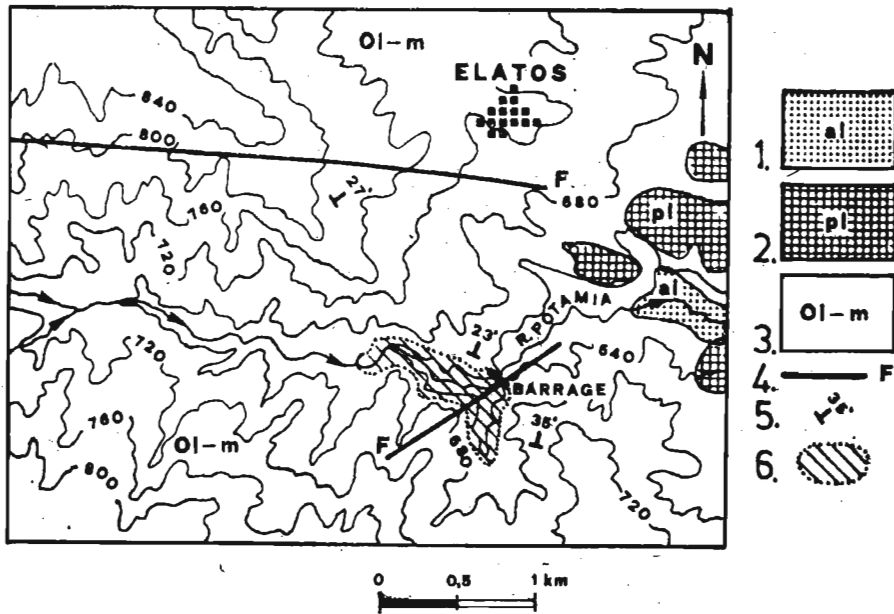


Fig. 2. Carte géologique régionale. Localisation de la région d'étude. 1 — Alluvions; 2 — Sédiments de Pliocène; 3 — Sédiments d'Aquitainien; 4 — Faille; 5 — Direction, pendage de couche; 6 — Retenue

Les roches détritiques qui affleurent appartiennent à la série de Pentalofos, d'âge Aquitainien. Ces sédiments, de faciès molasse, dont l'orientation varie entre N 100 — NE 40 et N 138 — NE 22, sont constitués par des couches de grès à ciment calcaire alternées avec des couches de grès à ciment marnocalcaire.

Les couches de grès à ciment calcaire formées de quartz 27%, calcite 57%, mica 9% et de feldspath 7%, se présentent sous forme de bancs durs, dont l'épaisseur varie de 10 cm à 3 m.

Les accidents tectoniques de région, repérés lors de l'élaboration de la carte géologique, se manifestent sous forme d'une faille inverse, de direction N 56, accompagnée d'une petite faille normale, dont la direction est N 18 (fig. 3).

Le création de la faille inverse, qui offre les traces d'un mouvement senestre, est due aux contraintes de compression qui ont eu lieu entre le Pliocène supérieur et le Pléistocène inférieur (Meladiotis, 1987).

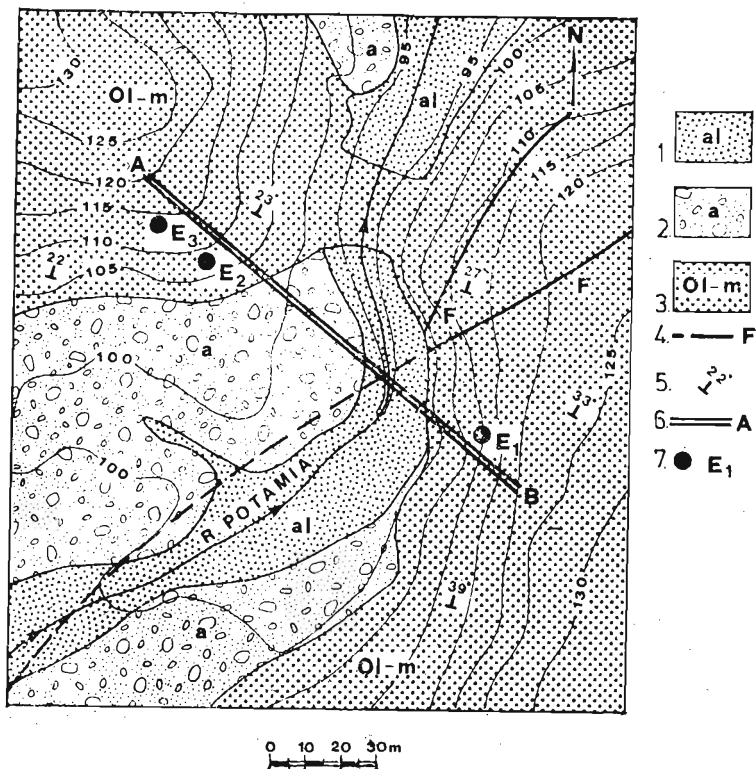


Fig. 3. Carte géologique de la région d'étude. Emplacements des stations de lever de la fissuration. 1—Alluvions récentes; 2 — Terrasse alluviale; 3 — Grès d'Aquitanten; 4 — Faille; 5 — Direction, pendage de couche; 6 — Axe de barrage; 7 — Station de mesures

Sauf les failles qui parcourent la couverture tertiaire de la région, les couches gréseuses sont traversées par un réseau de fissures dense, dont les plans de discontinuité sont assez nets.

### Lever des plans de fissures

Pour déterminer les caractéristiques géométriques et mécaniques des fissures, ont été réalisées de nombreuses mesures en trois emplacements situés sur les talus rocheux de la zone de fondation du barrage.

Tous les points de mesures, situés à l'intérieur d'un cercle de 10 m de diamètre, ont été regroupés en stations.

En chaque station, ont été notés: direction, pendage, continuité, nature du remplissage et écartement moyen de chaque fissure qui a coupé une ficelle tendue, de 10 m de long, placée horizontalement sur les talus rocheux du thalweg.

Le chiffre de l'écartement moyen de chaque fissure, qui est la moyenne entre l'ouverture maximale mesurée sur la fissure grâce à un jeu de cales d'ajustage mécanique, a été divisé d'un facteur 2 pour prendre en compte les phénomènes suivants :

- a) les fissures se referment rapidement avec la profondeur ;
- b) l'existence des ponts rocheux diminue largement la conductivité hydraulique des fissures.

L'ouverture moyenne des fissures, qui joue un rôle prépondérant dans le calcul du tenseur de perméabilité équivalente, a été calculée par la loi logarithmique des écartements moyens :

$$(5) \quad \text{Log } d_i = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \text{Log } d_i$$

où  $d_i$  est l'ouverture moyenne des fissures de la famille  $i$  ;  $d$  — l'écartement moyen de chaque fissure divisé d'un facteur 2, et  $N$  — le nombre de fissures appartenant à la famille  $i$ .

La fréquence moyenne des fissures a été calculée en fonction de l'orientation de la icelle tendue, par la formule :

$$(6) \quad f_i = \frac{N}{\sum [n \cdot Lk]}$$

où  $f_i$  est la fréquence moyenne des fissures de la famille  $i$  ;  $n \cdot Lk$  — le produit scalaire de la normale au plan de la fissure et la ligne de lever.

Sur chaque de ces stations ont été mesurées les caractéristiques géométriques et mécaniques d'une centaine de fissures.

### *La porosité matricielle des grès fissurés*

La détermination de la porosité matricielle des grès aquitaniens a été faite au Laboratoire de Géologie du Génie Civil de l'Ecole Polytechnique de l'Université de Thessaloniki, à l'aide de l'appareil Beckman Pycnometer 930, avec lequel on peut mesurer le volume des pores d'un échantillon par l'emploi de gaz.

D'après les résultats de plusieurs mesures, effectuées sur des échantillons de grès de la région étudiée, les valeurs de la porosité matricielle des grès à ciment calcaire varient de 0,1 à 0,6 %, tandis que les valeurs de la porosité matricielle des grès à ciment marnocalcaire varient de 3,5 à 4,3 %.

A partir de ces valeurs, on peut admettre que la porosité de la matrice des grès examinés est négligeable.

### *Résultats obtenus*

A partir des levés effectués sur le site de fondation du barrage, a été construit pour chaque station de mesures un polygone de fréquences de directions des fissures sous forme de rosace, ainsi qu'un diagramme cyclographique des plans des familles de fissures au canevas de Schmidt à l'hémisphère inférieur. La construction de ces diagrammes, le calcul de l'ouverture et de la fréquence moyennes des fissures de chaque famille (tableaux 1, 2, 3), ainsi que le calcul du tenseur de perméabilité équivalente des grès de chaque station, ont été réalisés à l'aide d'un programme FORTRAN pour un ordinateur de taille moyenne.

#### *1. Station de mesures E<sub>1</sub>*

Elle est située sur le talus de la zone de fondation du barrage, à une altitude de 15 m à partir du lit de la rivière Potamia.

**Tableau 1**

*Caractéristiques géométriques et mécaniques des fissures*

Famille de fissures	Orientation de plan moyen	Composantes du vecteur normal au plan			Ouverture moyenne, m <i>d</i>	Fréquence moyenne, m <i>f</i>
		<i>x</i>	<i>y</i>	<i>z</i>		
S <sub>1</sub>	N 63°—NW 56°	-0,982	0,167	-0,093	0,0029	2,6
S <sub>2</sub>	N 170°—SW 50°	-0,872	0,322	-0,367	0,0013	1,0
S <sub>3</sub>	N 23°—SE 65°	-0,441	0,700	-0,562	0,0012	0,7

**Tableau 2**

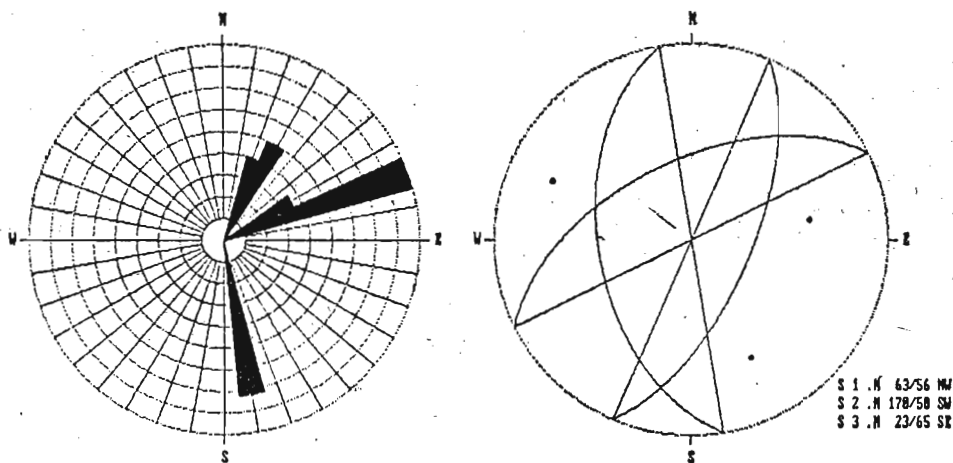
*Caractéristiques géométriques et mécaniques des fissures*

Famille de fissures	Orientation de plan moyen	Composantes du vecteur normal au plan			Ouverture moyenne, m <i>d</i>	Fréquence moyenne, m <i>f</i>
		<i>x</i>	<i>y</i>	<i>z</i>		
S <sub>1</sub>	N 59°—NW 48°	-0,041	-0,034	0,999	0,0028	2,2
S <sub>2</sub>	N 18°—SE 53°	0,261	0,297	-0,981	0,0011	1,5
S <sub>3</sub>	N147°—SW 83°	-0,301	-0,231	-0,925	0,0011	0,9

**Tableau 3**

*Caractéristiques géométriques et mécaniques des fissures*

Famille de fissures	Orientation de plan moyen	Composantes du vecteur normal au plan			Ouverture moyenne, m <i>d</i>	Fréquence moyenne, m <i>f</i>
		<i>x</i>	<i>y</i>	<i>z</i>		
S <sub>1</sub>	N 21°—SE 44°	-0,001	-0,015	1,000	0,0010	2,7
S <sub>2</sub>	N 63°—NW 36°	-0,484	0,082	0,871	0,0029	1,8
S <sub>3</sub>	N135°—SW 47°	-0,866	-0,077	0,495	0,0012	1,0



**Fig. 4.** Diagramme des fréquence des directions des fissures (a) et diagramme cyclographique des plans des familles de fissures à l'hémisphère inférieur (b) en emplacement E<sub>1</sub>

A partir de l'analyse statistique des fissures, ont été déterminées trois familles de discontinuités parmi lesquelles la famille  $S_1$  est la principale (fig. 4).

La famille  $S_1$ , dont la fréquence moyenne est 2,6 fissures par mètre, présente la plus grande ouverture moyenne de fissures.

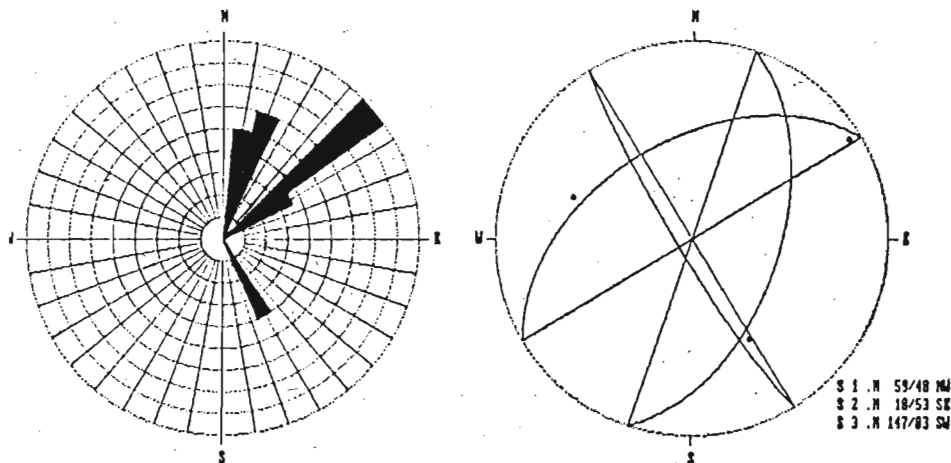


Fig. 5. Diagramme de fréquence des directions des fissures (a) et diagramme cyclographique des plans des familles de fissures à l'hémisphère inférieur (b) en emplacement  $E_2$

La valeur moyenne de la perméabilité équivalente des grès fissurés, calculée à partir de la matrice totale  $\begin{bmatrix} 0,003 & 0,009 & -0,006 \\ 0,009 & 0,053 & 0,001 \\ -0,006 & 0,001 & 0,054 \end{bmatrix}$ , est  $2,2 \cdot 10^{-6}$  m/s.

Si on prend en considération que 7% des fissures mesurées sont remplies de calcite secondaire, il en résulte que la valeur moyenne de la perméabilité équivalente des grès fissurés en cet emplacement est  $2,0 \cdot 10^{-6}$  m/s.

## 2. Station de mesures $E_2$

Cette station est située sur le talus gauche de la région étudiée, à une altitude de 13 m à partir du lit de la rivière.

D'après les résultats de l'analyse statistique des fissures, les grès de cet emplacement sont traversés par trois familles de discontinuités. La famille  $S_1$  est la famille principale (fig. 5). Cette famille, dont la fréquence moyenne est 2,2 fissures par mètre, présente la plus grande ouverture moyenne de fissures qui est de l'ordre de 2,8 mm.

A partir de la matrice totale  $\begin{bmatrix} 0,042 & -0,000 & 0,002 \\ -0,000 & 0,042 & 0,002 \\ 0,002 & 0,002 & 0,001 \end{bmatrix}$ , a été calculée la valeur moyenne de la perméabilité des grès fissurés qui est de  $1,4 \cdot 10^{-6}$  m/s.

Etant donné que 15% des fissures mesurées sont remplies de calcite secondaire ou encore de matériaux calciques mélangés avec de l'argile, il en résulte que la valeur moyenne de la perméabilité équivalente des grès fissurés en cet emplacement est  $1,2 \cdot 10^{-6}$  m/s.

### 3. Station de mesures E<sub>3</sub>

Elle est située au NW de la station précédente, à une altitude de 18 m supérieure au lit de la rivière.

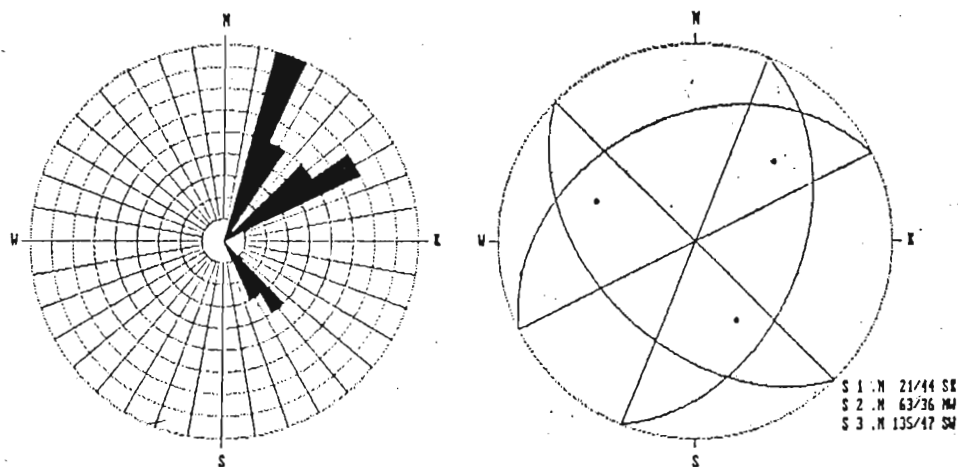


Fig. 6. Diagramme de fréquence des directions des fissures (a) et diagramme cyclographique des plans des familles de fissures à l'hémisphère inférieur (b) en emplacement E<sub>3</sub>

L'analyse statistique des fissures a permis de déterminer trois familles de fissures (fig. 6). La famille principale qui présente la plus grande fréquence et dont l'ouverture moyenne des fissures est 1,0 mm est la famille S<sub>1</sub>.

La plus grande ouverture moyenne de fissures présente la famille secondaire S<sub>2</sub>, dont la moyenne est de l'ordre de 2,9 mm.

La valeur moyenne de la perméabilité équivalente des grès fissurés, calculée à partir de la matrice totale  $\begin{bmatrix} 0,030 & 0,001 & 0,016 \\ 0,001 & 0,039 & -0,002 \\ 0,016 & -0,002 & 0,010 \end{bmatrix}$ , est de  $1,5 \cdot 10^{-6}$  m/s.

Si on prend en considération que 17% des fissures mesurées sont remplies de calcite secondaire, ou encore de matériaux calciques mélangés avec de l'argile, il en résulte que la valeur moyenne de la perméabilité équivalente des grès fissurés en cet emplacement est  $1,2 \cdot 10^{-6}$  m/s.

### Conclusions

A partir des levés des plans de fissures des grès aquitaniens qui affleurent sur le site de fondation du barrage en terre projetée dans la région d'Elatos en Macédoine Occidentale, on a constaté que la fissuration de ces grès est liée à des failles qui apparaissent sur le talus rocheux de la rive droite de la rivière Potamia.

D'après les calculs effectués par la méthode de Kiraly, la valeur moyenne de la perméabilité équivalente des grès fissurés est de l'ordre de  $10^{-6}$  m/s. Cette valeur, qui caractérise les grès examinés comme formation imperméable, correspond à la perméabilité d'affleurement qui a subi les conséquences de l'érosion et de l'altération superficielle.

Bien que la méthode suivie pose le problème de l'ouverture et de la continuité des fissures, elle a permis toutefois d'obtenir, selon l'étude préliminaire, un ordre de grandeur de la perméabilité des grès précités, avant la construction des forages.



## Remerciements

L'auteur tient à remercier tout particulièrement M. M. C. Demiris, Professeur à l'Université de Thessaloniki, et C. Garagunis, Professeur à l'Université Technique Nationale d'Athènes, pour leur aide à l'élaboration de ce travail.

## Bibliographie

- Antoine, P., D. Fabre. 1980. *Géologie Appliquée au Génie Civil*. Ed. Masson. Paris.
- Kiraly, L. 1969. Statistical analysis of fractures. — *Geol. Rund.*, B 59, 1, 125—151.
- Kiraly, L. 1969. Anisotropie et hétérogénéité de la perméabilité dans les calcaires fissurés. — *Eclog. Geol. Helv.*, 62, 2, 613—619.
- Louis, C. 1968. Etude des écoulements d'eau dans les roches fissurées et leur influence sur la stabilité des massifs rocheux. Thèse Univers. de Karlsruhe. — *Bull. Etud. Rech. EDF.*, A, 3, Paris.
- Meladiotis, J. 1987. *Recherche tectonique du bassin versant de la rivière Potamia*. République Hellénique. Ministère d'Agriculture. Thessaloniki.

(Le manuscrit reçu le 21. IV. 1989)