

ACADEMIA REPUBLICII SOCIALISTE ROMÂNIA

TRAVAUX DE L'INSTITUT DE  
**SPÉOLOGIE**  
„EMILE RACOVITZA”

TIRAGE À PART

TOME XX 1981

EDITURA ACADEMIEI REPUBLICII SOCIALISTE ROMÂNIA

# La détermination «in situ» de quelques grandeurs thermiques des calcaires

par

N. Suciu

On présente une détermination «in situ» de quelques grandeurs thermiques des calcaires. On a déterminé des grandeurs globales et des moyennes annuelles caractéristiques à la couche calcaire lapiézée sous laquelle se trouve la grotte-aven «Cioaca cu brebenei», du massif Piatra Mare-Cloşani. À l'aide d'un modèle simplifié de la couche calcaire, on a exprimé la dépendance entre les propriétés thermiques des calcaires due à la fissuration et la quantité moyenne annuelle d'eau dans la couche.

## 1. Introduction

On a mesuré la température de la roche à diverses profondeurs dans la couche (30 cm, 75 cm et 117 cm), ainsi qu'en divers points de la grotte (en air et à 5 cm dans les parois), pendant l'intervalle juillet 1979— juillet 1980. On a utilisé des thermomètres à mercure et un thermomètre à thermistance (fig. 1).

En même temps on a déterminé dans le laboratoire, la conductivité thermique ( $K$ ) et la capacité calorifique de l'unité de volume ( $\rho c$ ) pour trois sets d'échantillons provenant respectivement du lapiaz de l'extérieur, du plafond de la grotte et d'un fragment de stalactite. La conductivité thermique a été déterminée dans le Laboratoire des champs naturels du Centre de la physique de la terre et de séismologie — Bucarest », par la méthode de l'appareil aux barres (C. D e m e t r e s c u, 1977). La capacité calorifique a été déterminée dans le Laboratoire de physique moléculaire de la « Faculté de physique — Bucarest », par la méthode calorimétrique.

## 2. Résumé théorique de la méthode

L'équation de la propagation de la chaleur dans un milieu solide, homogène et isotrope, ayant la conductivité thermique  $K$ , la densité  $\rho$  et la chaleur spécifique  $c$ , est (C a r s l o w and J a e g e r, 1957) :

$$\nabla^2 T - \frac{1}{\kappa} \frac{\partial T}{\partial t} = 0, \text{ où } \kappa = \frac{K}{\rho c}$$

est la diffusivité thermique,  $T$  — la température et  $t$  — le temps. Dans le cas unidimensionnel, pour un solide semi-infini ( $x \geq 0$ ) l'équation devient :

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} - \frac{1}{\kappa} \frac{\partial T}{\partial t} = 0$$



Si à la surface du solide il y a une oscillation de température :

$$T(0, t) = A \cos(\omega t - \varepsilon)$$

la solution finit quand  $t \rightarrow \infty$  est :

$$T(x, t) = Ae^{-kx} \cos(\omega t - kx - \varepsilon); \quad k = \sqrt{\omega/2\kappa} = \sqrt{\pi/\tau\kappa}$$

où  $\tau$  représente la période de l'oscillation.

Donc, la solution est une onde de température ayant le nombre d'onde  $k$  et la longueur d'onde  $\lambda = 2\pi/k$ .

#### a) Détermination du nombre d'onde

On détermine  $k$  à l'aide de la relation qui donne l'amplitude de l'onde de température :

$$a = Ae^{-kx}$$

Il faut remarquer ici qu'en vertu de cette relation, lorsque la température superficielle est exprimée par une série Fourier, les harmoniques supérieures disparaissent plus vite que les harmoniques inférieures, c'est-à-dire, ce ne sont que les ondes de grandes périodes qui atteignent les grandes profondeurs ; c'est le cas de la couche calcaire de « Cioaca cu brebenei », où l'onde annuelle seule pénètre dans la grotte (l'épaisseur de la couche  $x = L = 800$  cm). Dans les points de mesurage de l'extérieur, les harmoniques supérieures sont éliminées par les moyennes mensuelles<sup>1</sup>.

Considérant les amplitudes dans le point  $x = L$  et en d'autres points  $x \neq L$  on obtient :

$$(1) \quad k = \frac{\ln \frac{a_x}{a_L}}{L - x}$$

#### b) Le modèle de couche composé pour la couche réelle et la détermination de la conductivité thermique et de la capacité calorifique globales et moyennes annuelles

Pour exprimer les grandeurs  $K$  et  $\rho c$  qui interviennent en  $k$ , il faut connaître la manière de propagation de l'onde thermique à travers la couche réelle, composée de calcaires compacts et de fissures, partiellement libres, partiellement remplies d'eau.

Avant de choisir le modèle on fait les observations suivantes :

— au point de vue morphologique la couche est un lapiaz ; les fissures verticales sont prédominantes par rapport à celles transversales développées selon la direction de la stratification (fig. 1) ;

— en tenant compte de l'épaisseur réduite de la couche considérée, l'existence d'une cavité de grandes dimensions est peu probable et la plus

<sup>1</sup> L'amélioration de la précision exige que les moyennes mensuelles tiennent compte des données de plusieurs années.



température :

$$\sqrt{\omega/2\kappa} = \sqrt{\pi/\tau\kappa}$$

vant le nombre d'onde  $k$

donne l'amplitude de

relation, lorsque la tem-  
Fourier, les harmoniques  
iques inférieures, c'est-à-  
qui atteignent les grandes  
de « Cioaca cu brebenei »,  
(l'épaisseur de la couche  
de l'extérieur, les harmo-  
mes mensuelles<sup>1</sup>.

=  $L$  et en d'autres points

couche réelle et la déter-  
mination de la capacité calorifique globale

interviennent en  $k$ , il faut  
thermique à travers la  
et de fissures, partielle-

observations suivantes :

couche est un lapiaz ; les  
port à celles transversales  
en (fig. 1) ;

de la couche considérée,  
est peu probable et la plus

des mensuelles tiennent compte

simple hypothèse sur la distribution des fissures est celle d'une distribu-  
tion homogène ;

— dû à la communication des fissures normales avec les joints de  
stratifications, l'eau remplit les fissures au même niveau ;

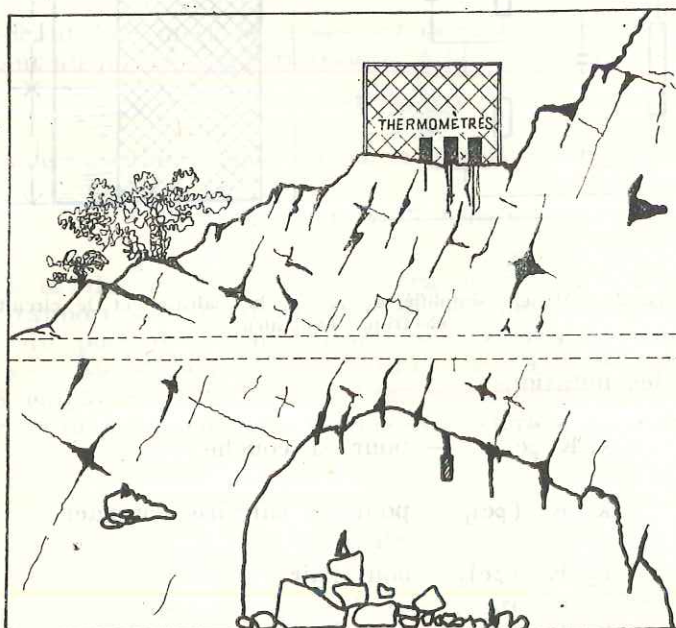


Fig. 1. — Emplacement des thermomètres et la morphologie  
de la couche calcaire.

— on peut démontrer que la température de l'air dans une fissure  
ouverte tend exponentiellement vers la température des parois (Cigna,  
1960). Le même phénomène a lieu dans le cas où la fissure est pleine d'eau.  
En même temps, l'intervalle où s'établit l'équilibre thermique entre l'air,  
respectivement l'eau de la fissure, et ses parois est très petit rapport à  
la période de l'oscillation annuelle de température.

Tenant compte de ces observations, on propose un modèle où la  
couche est équivalente à un système de trois conducteurs thermiques :  
l'un de longueur  $L$  et surface  $S_c$  de calcaires compacts, en parallèle avec  
deux autres conducteurs en série ayant les longueurs  $L-1$  et  $1$  et la sur-  
face  $S_a$  de l'air, respectivement de l'eau (fig. 2).

Les paramètres de structure de cette couche sont : la fissuration  
 $F = S_a/S$  (où  $S = S_a + S_c$ ) et le rapport de remplissage d'eau des fis-  
sures :  $p = \frac{1}{L}$ .

On résout le problème du flux thermique par analogie à celui de la  
propagation de la charge électrique par un conducteur à résistance et capa-  
cité. Pour respecter l'analogie on pose la condition que la grandeur  $K$   
qui intervient en  $k$  représente la conductivité thermique équivalente de la  
couche en régime stationnaire.

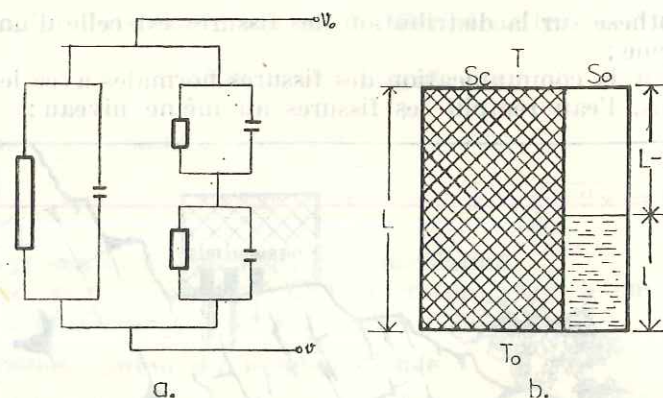


Fig. 2. — Modèle simplifié de la couche calcaire et le circuit électrique équivalent.

Avec les notations :

$k, K, \rho c$  — pour la couche

$k_1, K_1, (\rho c)_1$  — pour le calcaire compact

$k_2, K_2, (\rho c)_2$  — pour l'air

$k_3, K_3, (\rho c)_3$  — pour l'eau

on obtient :

$$(2) \quad K = (1 - F)K_1 + F \frac{K_2 K_3}{(1 - p)K_3 + pK_2}$$

$$(3) \quad \rho c = \frac{\tau k^2 K}{\pi}$$

La fissuration a été déterminée pour  $p = 1$  (au mois d'avril 1980, après la fonte des neiges), à l'aide d'une valeur  $k$  déterminée approximativement par la méthode des différences finies, avec la relation :

$$(4) \quad F = \frac{K_1(k - k_1)}{K_1(k - k_1) + K_3(k_3 - k)}$$

On obtient le rapport moyen de remplissage avec de l'eau par la substitution de  $K$  et  $F$  dans :

$$(5) \quad kK = (1 - F)k_1K_1 + F \frac{k_2k_3K_2K_3}{pk_2K_2 + (1 - p)k_3K_3}$$



### e) L'anisotropie thermique des calcaires compacts

La conductivité thermique des calcaires compacts dépend de la direction du flux thermique par rapport à la normale du plan de sédimentation.

Les échantillons mesurés présentent deux conductivités principales correspondant au plan de stratification et à la normale de celui-là :

$$K_a \text{ et } K_c \text{ (} K_a > K_c \text{)}.$$

Pour une direction quelconque  $\theta$ , la conductivité est donnée par :

$$(6) \quad K_\theta = K_a + (K_c - K_a) \cos^2 \theta$$

Dans le cas des échantillons de « Cioaca cu brebenei », l'angle d'inclinaison par rapport à la verticale (la direction de propagation du flux thermique) du plan de sédimentation est approximativement l'angle d'entre la verticale et le plan de stratification ( $\theta = 30^\circ$ ). Pour que la valeur de  $K$  employée en (2), (4) et (5) fût représentative pour la couche, on considère la moyenne entre les valeurs de l'extérieur et celles de l'intérieur.

### 3. Les résultats obtenus

a) Les résultats des mesurages de laboratoire sont marqués dans le tableau 1.

Tableau 1

	Extérieur	Intérieur	Stalactite
$K_a \left( \frac{\text{cal}}{\text{cm s } ^\circ\text{C}} \right)$	$0,00210 \pm 0,00002$	$0,00709 \pm 0,00002$	$0,00703 \pm 0,00002$
$K_c \left( \frac{\text{cal}}{\text{cm s } ^\circ\text{C}} \right)$	$0,00134 \pm 0,00002$	$0,00448 \pm 0,00002$	
$\rho c \left( \frac{\text{cal}}{\text{cm}^3 ^\circ\text{C}} \right)$	$0,66 \pm 0,02$	$0,66 \pm 0,02$	$0,53 \pm 0,02$

Pour  $\theta = 30^\circ$  on a obtenu  $K_1$  à l'aide de la relation (6) :

$$K_1 = K(30^\circ) = (0,0040 \pm 0,00002) \frac{\text{cal}}{\text{cm s } ^\circ\text{C}}$$

et le nombre d'onde :

$$k_1 = (0,0041 \pm 0,00004) \text{ cm}^{-1}$$

b) En appliquant la relation (1) pour :  $x = 30$  cm,  $75$  cm et  $117$  cm et pour  $L = 800$  cm, on a obtenu la valeur moyenne pour  $k$  :

$$k = (0,0044 \pm 0,0001) \text{ cm}^{-1}$$

À l'aide des relations (2) et (3) on a obtenu :

$$K = (0,0032 \pm 0,0006) \frac{\text{cal}}{\text{cm s}^\circ\text{C}}$$

$$\rho c = (0,62 \pm 0,07) \frac{\text{cal}}{\text{cm}^3 ^\circ\text{C}}$$

Pour comparer, on ajoute le tableau 2 :

Tableau 2

le milieu <sup>2</sup>	$\rho c \left( \frac{\text{cal}}{\text{cm}^3 ^\circ\text{C}} \right)$	$K \left( \frac{\text{cal}}{\text{cm s}^\circ\text{C}} \right)$
calcaires compacts	0,66	0,0040
couche de calcaires	0,62	0,0032
granit	0,54	0,0060
valeur moyenne pour des roches	—	0,0042
a i r	0,0003	0,000058
e a u	1,0	0,0014

On a déterminé  $F$  et  $p$  des relations (4) et (5). Dans la relation (4) on a employé la valeur  $k = (0,0045 \pm 0,001) \text{ cm}^{-1}$ , déterminée par la méthode des différences finies, à l'aide des mesurages d'avril 1980 dans les points :  $x = 30$  cm,  $75$  cm,  $117$  cm, et les points supplémentaires :  $x = 5$  cm,  $10$  cm,  $139$  cm,  $157$  cm.

On a obtenu :

$$F = (0,21 \pm 0,06) \text{ ou } F = (21 \pm 6)\%$$

$$p = (0,42 \pm 0,20) \text{ ou } p = (42 \pm 20)\%$$

#### 4. Conclusions

— Les calcaires compacts sont anisotropes de point de vue thermique. Il y a une conductivité maximale dans le plan de sédimentation et une conductivité minimale dans la direction perpendiculaire à celui-ci.

— Les propriétés thermiques des calcaires dépendent de la structure de la fissuration autant que du poids des fissures et de leur teneur en eau.

<sup>2</sup> Les quatre dernières valeurs proviennent de Carslow and Jaeger, 1957.



0 cm, 75 cm et 117 cm  
ne pour k :

u :

EC

	$K \left( \frac{\text{cal}}{\text{cm s } ^\circ\text{C}} \right)$
	0,0040
	0,0032
	0,0060
	0,0042
	0,000058
	0,0014

5). Dans la relation (4)  
 $n^{-1}$ , déterminée par la  
ges d'avril 1980 dans les  
plémentaires:  $x = 5 \text{ cm}$ ,

6)%

20)%

de point de vue thermi-  
an de sédimentation et  
pendiculaire à celui-ci.  
épendent de la structure  
et de leur teneur en eau.

nd Jaeger, 1957.

— De p et F on obtient le volume moyen de l'eau contenu dans la couche :  $V = p.F.L.S$ , et la colonne d'eau correspondante :  $l' = V/S$ . On obtient :  $l' = 665,6 \text{ mm}$  (la somme annuelle des précipitations à la Station météorologique Cloșani de l'Institut de Spéologie est de 970 mm). La couche a donc une capacité de rétention remarquable.

— La température de l'air a une évolution semblable à celle de la température des parois, excepté les points de la zone vestibulaire de la grotte. C'est-à-dire que les amplitudes thermiques sont amortisées en profondeur et le maximum de température est retardé par rapport à celui de l'extérieur. Le flux thermique transmis par la couche de calcaires est donc un facteur spéléoclimatique.

### Bibliographie

- 1960 CIGNA, A., *Air Temperature Distribution near the Entrance of Caves*. Atti del Symposium Internazionale di Speleologia, Villa Monastero, Varena.  
1976 BLEAHU, M., DECU, V et colab., *Peșteri din România*. Editura științifică și enciclopedică, București.  
1957 CARSLOW, H. S. and JAEGER, J. C., *Conduction of Heat in Solids*. Oxford at the Clarendon Press.  
1977 DEMETRESCU, C., *Contribuții la studiul fluxului termic al pământului în Transilvania*, thèse de doctorat (Manuscrit), Univ. București, Faculté de Physique.  
1968 HUTT and BERG, *Thermal and Electrical Conductivities of sandstone Rocks and Sediments*, Geophysics, 33, 3, 489—500.

Institut de Spéologie « Emile Racovitza »  
Bucarest

Reçu le 28 Janvier 1981