ADAPTATION DES COURBES FONCTIONNELLES AUX VARIATIONS DES PARAMÈTRES TOPOCLIMATIQUES SOUTERRAINS

GH. RACOVIȚĂ

Après un bref rappel des lois physiques qui président au transfert de chaleur engendré par la thermocirculation souterraine, on passe en revue les résultats auxquels aboutit l'adaptation de différentes courbes fonctionnelles à des séries de données thermométriques prélevées dans des grottes appartenant aux principaux types topoclimatiques. On démontre ainsi l'utilité de ces courbes en tant qu'expression synthétique des bilans climatiques souterrains.

Le développement des études intensives qui a marqué la climatologie souterraine au cours des dernières décennies a eu pour conséquence une augmentation considérable du volume de données, en créant ainsi la possibilité de dresser les premiers bilans complets sur les paramètres physiques qui caractérisent l'atmosphère des grottes. Ces bilans ont été élaborés d'habitude par le calcul de plusieurs moyennes saisonnières, annuelles ou multiannuelles (moyennes générales, des maxima, des minima etc.) des valeurs que les facteurs topoclimatiques prendent à l'intérieur des cavités karstiques (A n d r i e u x, 1971). On obtient ainsi une image globale et caractéristique pour chaque cavité, mais qui rend mal compte des aspects dynamiques des phénomènes et, en outre, reste peu utile lorsqu'on essaye de comparer directement les particularités topoclimatiques des différentes grottes.

Ces inconvénients peuvent être aisément éliminés par le modelage mathématique de la variation spatiale ou temporelle des divers facteurs. En principe, il s'agit d'établir l'équation numérique correspondant à la courbe fonctionnelle qui s'adapte avec le plus haut degré de signification statistique à la distribution des valeurs réelles du paramètre pris en considération. La pratique montre que la grandeur qui se prête le mieux à un tel traitement mathématique est la température de l'air, qui joue aussi le rôle le plus important dans l'aérodynamique souterraine.

1. CONSIDÉRATIONS THÉORIQUES

Les courbes fonctionnelles peuvent être utilisées en tant que modèle mathématique pour les deux aspects fondamentaux de la thermométrie souterraine, à savoir le gradient qui se constitue à partir de l'ouverture d'une cavité et l'amortissement des variations à l'intérieur de celle-ci. L'étude des échanges d'énergie qui accompagnent toute ventilation souterraine mène à des équations générales quantifiant chacun de ces deux aspects.

Lorsqu'une masse d'air externe pénètre dans une cavité quelconque, sa température se modifie selon une loi exponentielle (fig. 1) jusqu'à ce qu'elle atteint la valeur d'équilibre propre à la cavité en question (S c h o-

Trav. Inst. Spéol. « Émile Racovitza », t. XXXII, p. 169—182, Bucarest, 1993

e l l e r, 1962, A n d r i e u x, 1971, C h o p p y, 1984). L'équation qui traduit cette loi s'écrit :

$$t = t_s + (t_e - t_s)\, e^{-kd} \tag{1}$$

et permet de calculer la température t_x que l'air doit prendre à une distance d_x de l'entrée. Il va sans dire que, selon le rapport d'entre la température externe t_e et la température souterraine d'équilibre t_s, la courbe correspondant à cette équation est soit descendante, soit ascendante. Notons aussi que le coefficient k a un déterminisme physique, car il dépend de la masse spécifique et de la capacité calorifique de l'air, de la vitesse de ventilation et de la résistence thermique moyenne (A n d r i e u x, 1971).

Quant à l'amortissement des variations thermométriques, celui-ci se réalise théoriquement d'une manière de même exponentielle (fig. 2), mais, étant donné que ce phénomène ne peut avoir par définition qu'un seul sens, l'équation générale qui lui correspond devient (C h o p p y, 1984) :

$$\Delta t = \Delta t_e \cdot e^{-kd} \tag{2}$$

Dans les deux cas, les fonctions théoriques sont établies en assimilant la grotte à un conduit de section uniforme et entouré d'un milieu à température constante, qui est la température de la roche encaissante.

2. ÉLÉMENTS MÉTHODOLOGIQUES

Le modelage des données réelles ne peut être restreint à une application directe des deux formules générales, d'ailleurs assez incomode par suite du nombre de paramètres qui y interviennent. En effet, tel qu'on le verra en détails dans le chapitre suivant, la distribution de ces données est plutôt variable et il y a toute une famille de courbes qui peuvent s'y adapter en dehors de celle exponentielle. Il s'agit donc de choisir parmi ces multiples alternatives celle recommandée par le plus haut degré de signification statistique, en utilisant pour cela le rapport de corrélation non linéaire

$$\eta = \sqrt{1 - \frac{\Sigma (y_i - y_t)^2}{\Sigma (y_i - \bar{y})^2}} \tag{3}$$

avec y_t = ordonnées déduites de l'équation théorique testée, ainsi que le paramètre t

$$t = \frac{\eta}{\sqrt{1 - \eta^2}} \cdot \sqrt{n - 2}, \tag{4}$$

dont la valeur doit être rapportée à un seuil de signification de 1 %.

L'algorithme que nous avons suivi pour aboutir aux valeurs numériques des coefficients des différentes équations comprend deux pas : la

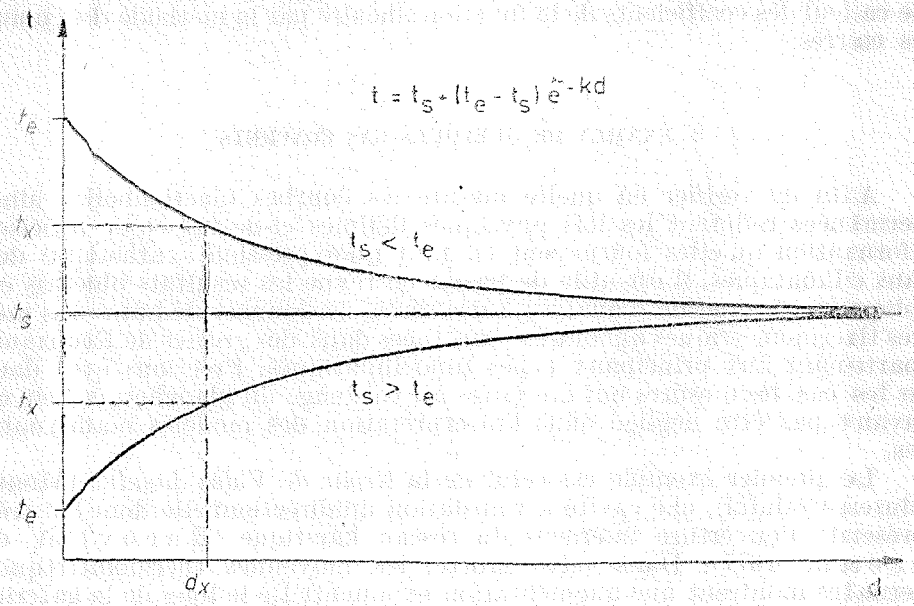

Fig. 1. — Variation théorique exponentielle de la température de l'air le long d'une cavité souterraine. Explications dans le texte.

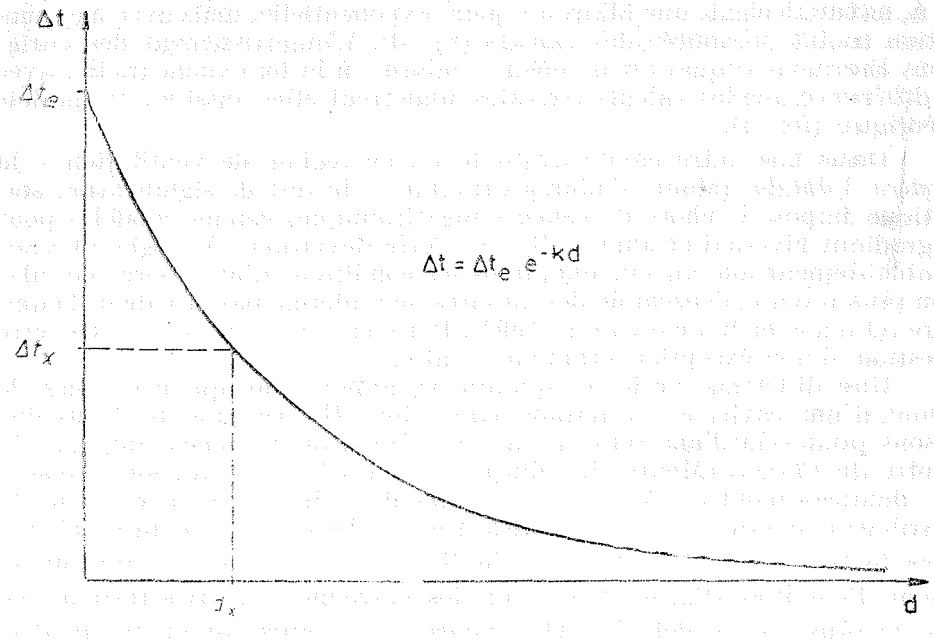

Fig. 2. — Modèle théorique exponentiel de l'amortissement des oscillations thermométriques souterraines en fonction de la distance rapportée à l'ouverture de la cavité.

linéarisation des fonctions par des moyens adéquats pour chacune d'elles et le calcul des coefficients de la fonction linéaire par la méthode des moindres carrés.

3. EXAMEN DE QUELQUES CAS CONCRETS

Afin de vérifier en quelle mesure les courbes fonctionnelles ainsi déterminées reflètent les lois physiques définies ci-dessus et de préciser l'information qu'elles fournissent en tant qu'expression synthétique des bilans climatiques, il est utile de passer en revue les résultats obtenus en appliquant ce procédé d'analyse à des séries de données déduites des mesures thermométriques qui ont été effectuées dans des grottes de Roumanie appartenant aux principaux types topoclimatiques. Précisons que, dans tous les cas, les mesures ont été faites au voisinage du plancher, ce fait ne pouvant pas être négligé dans l'interprétation des modèles mathématiques.

Le premier exemple est celui de la *Grotte de Valea Leșului* (Monts Pădurea Craiului), une cavité à ventilation unidirectionnelle dont l'entrée représente l'ouverture inférieure du réseau karstique (R a c o v i ț ă et C o c e a n, 1977). Dans cette grotte, les moyennes thermométriques hivernales montrent une augmentation exponentielle le long de la galerie, donc dans le sens du courrant immergent, tandis que celles estivales sont pratiquement invariables (à l'exception de la valeur correspondant à l'entrée, certainement influencée par radiation) et, par conséquent, non modelables. La résultante — le gradient constitué par les moyennes annuelles — a, naturellement, une allure toujours exponentielle, mais avec augmentation moins prononcée des valeurs (fig. 3). L'amortissement des variations thermométriques est de même conforme à la loi exponentielle, avec la différence que les valeurs estivales admettent elles aussi un tel modèle théorique (fig. 4).

Dans une autre cavité ayant le même régime de ventilation — la *Peștera Vântului* (Monts Pădurea Craiului) — le test de signification statistique impose le choix de courbes logarithmiques comme modèles pour le gradient hivernal et annuel (fig. 5). Cette déviation à la règle est vraisemblablement due au fait que, dans les conditions d'une thermocirculation plus intense, l'ensemble des mesures ne renferme pas la valeur d'équilibre (O n a c et R a c o v i ț ă, 1992). Par conséquent, il ne peut pas être question d'une exception proprement dite.

Une différence vraiment qualitative apparaît lorsqu'on envisage le climat d'une cavité à ventilation bidirectionnelle permanente. Nous disposons pour cela d'une série de mesures faites durant deux ans dans la Grotte de *Cloșani* (Monts Mehedinți) (R a c o v i ț ă et al., sous presse). Ces données montrent que les gradients de température déduits de la distribution des moyennes hivernales et annuelles correspondent au niveau topoclimatique à des hyperboles équilatères ayant pour asymptote la valeur d'équilibre (fig. 6), tandis que les moyennes estivales restent une fois de plus non modelables. On remarque, en outre, qu'un tel modèle implique une fragmentation méroclimatique de l'ensemble de la cavité

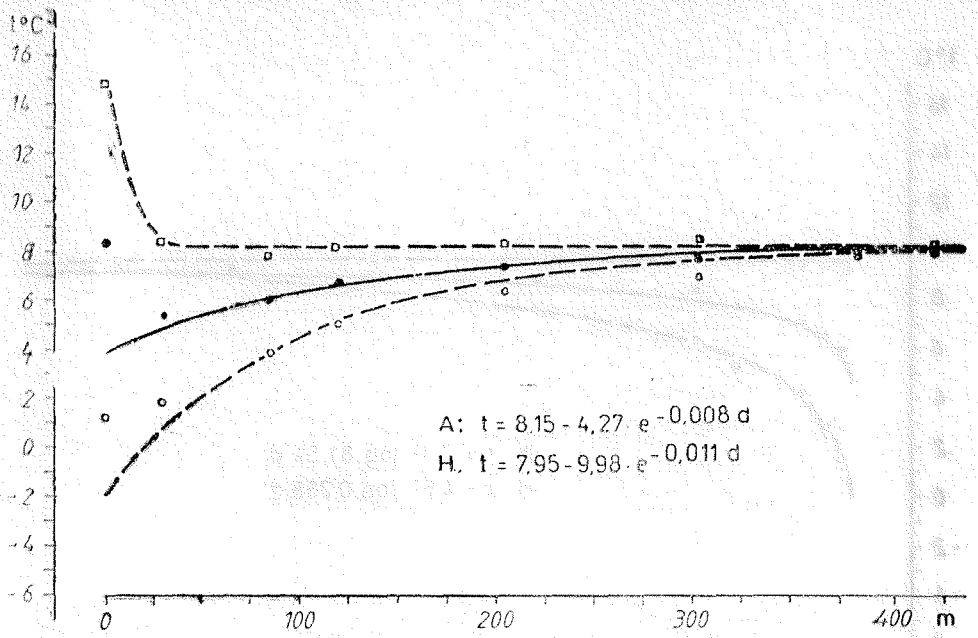

Fig. 3. — Courbes théoriques correspondant aux gradients thermiques saisonniers (traits interrompus) et annuel (trait continu) de la Grotte de Valea Leşului et équations numériques qui les définissent. Points noirs = valeurs réelles annuelles; cercles = valeurs réelles hivernales; carrés = valeurs réelles estivales.

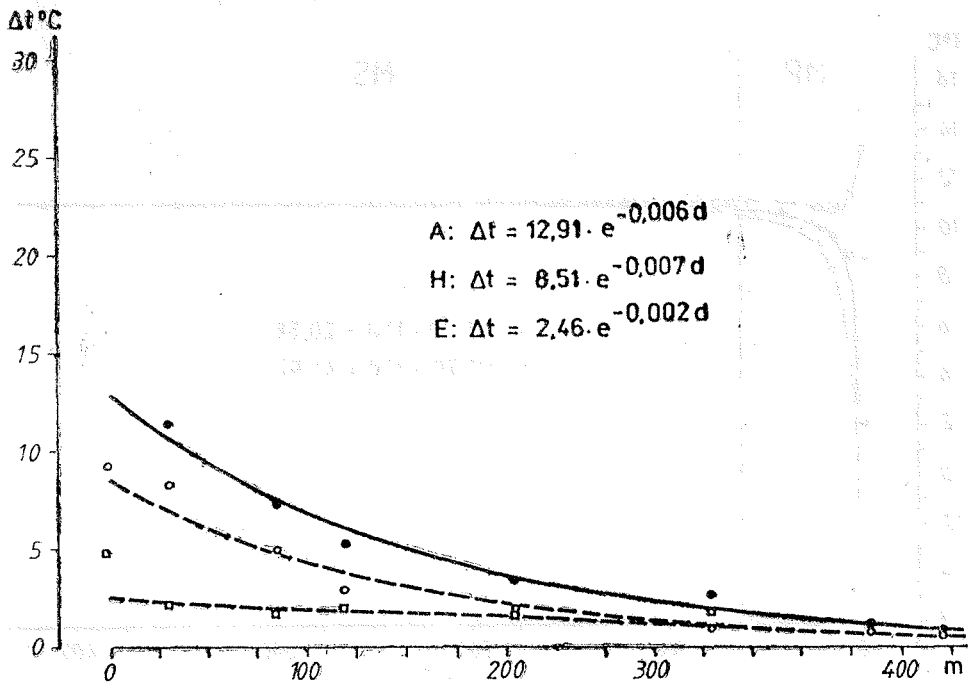

Fig. 4 — Amortissement des variations thermométriques dans la Grotte de Valea Leşului. Mêmes détails que pour la fig. 3.

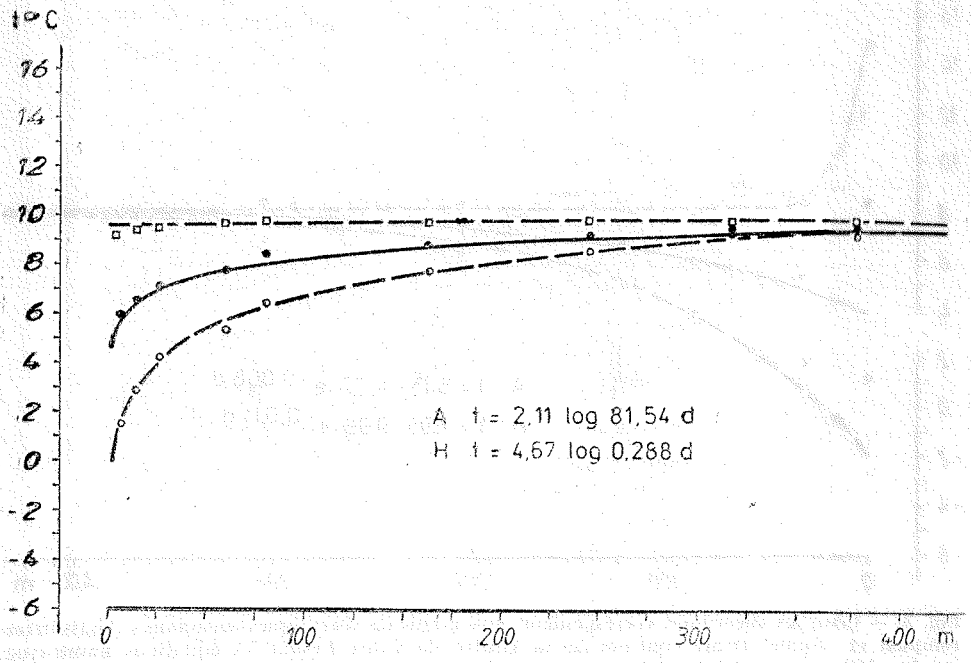

Fig. 5. — Gradients thermiques saisonniers et annuel dans la Peștera Vântului.

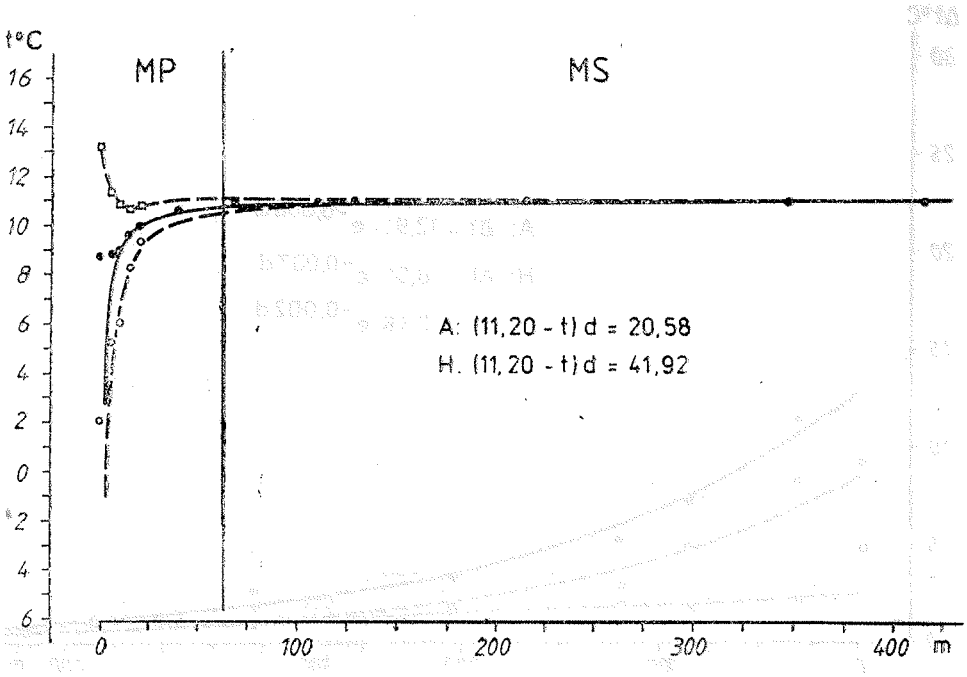

Fig. 6. — Gradients thermiques saisonniers et annuel dans la Grotte de Cloșani. MP = méroclimat de perturbation; MS = méroclimat de stabilité.

(R a c o v i ț ă, 1984). En effet, la localisation de la convection bidirectionnelle sur les 60 premiers mètres de la galerie impose la séparation de ce secteur à méroclimat de perturbation du reste de la cavité, nettement dominée par un méroclimat de stabilité. Des courbes toujours hyperboliques, mettant en évidence la même structure méroclimatique, s'avèrent être le modèle le plus adéquat pour l'amortissement des variations thermométriques aussi, à l'échelle tant saisonnière qu'annuelle (fig. 7).

Une analyse plus approfondie nous amène à retrouver le modèle exponentiel lorsqu'on se rapporte uniquement au secteur occupé par le méroclimat de perturbation. Cette constatation est encore plus évidente dans le cas de la Grotte de *Vadu-Crișului* (Monts Pădurea Craiului), où la termocirculation bidirectionnelle intéresse une centaine de mètres (R a c o v i ț ă et C r ă c i u n, 1970). Elle se vérifie en égale mesure pour les moyennes (fig. 8) que pour les amplitudes des variations thermométriques (fig. 9), mais seulement en ce qui concerne les valeurs hivernales et annuelles.

Tel qu'on aurait pu s'attendre, des aspects tout à fait originaux caractérisent les grottes à ventilation bidirectionnelle intermittente, les soi-disant « pièges à air ». On en trouve un excellent exemple dans la grotte *Gheţarul de la Scărișoara* (Monts du Bihor), une cavité descendante réputée pour l'impressionnant dépôt de glace pérenne qu'elle abrite (R a c o v i ț ă, 1967). L'accumulation d'air froid entretenue par la thermocirculation hivernale et qui se trouve à l'origine de la conservation de ce dépôt dans la zone centrale de la cavité a pour conséquence la constitution d'un gradient thermique à double sens, car la température de l'air augmente à partir de cette zone centrale d'un côté vers l'extérieur et d'autre côté vers les parties les plus profondes de la cavité. Il s'ensuit que la distribution des moyennes thermométriques saisonnières et annuelles suit dans tous les cas des paraboles à axe vertical (fig. 10). En même temps, la structure méroclimatique qu'on peut déduire de l'écart des valeurs réelles par rapport aux courbes théoriques devient plus complexe. Elle comprend un méroclimat de transition limité au voisinage de la surface, un méroclimat glaciaire se superposant à l'extension des spéléothèmes de glace et un méroclimat de stabilité profond et relativement plus chaud.

Contrairement à cette pregnante particularité des gradients thermiques, mais tout en ce conformant à la même structure méroclimatique, la distribution spatiale des amplitudes thermométriques reprend la forme exponentielle habituelle ; une fois encore, les amplitudes estivales en font exception (fig. 11). Ce fait n'est pourtant pas surprenant, puisqu'il est lié au sens unique de l'amortissement des variations thermométriques que nous avons déjà invoqué.

Le dernier cas qui nous reste à examiner est celui d'une cavité à ventilation complexe. Un tel régime caractérise la grotte *Gheţarul de la Vârtop* (Monts du Bihor), dans laquelle on a identifié un courant unidirectionnel doublé au cours de l'été d'une convection bidirectionnelle qui se renferme devant une étroiture distancée d'environ 60 m de l'entrée (R u ș d e a, 1985). Cette aérodynamique hétérogène a pour conséquence immédiate l'impossibilité de trouver un modèle unique statistiquement acceptable pour les gradients de température au niveau topoclimatique, de sorte qu'on est amené à traiter séparément les données concernant chaque zone méroclimatique à part (fig. 12).

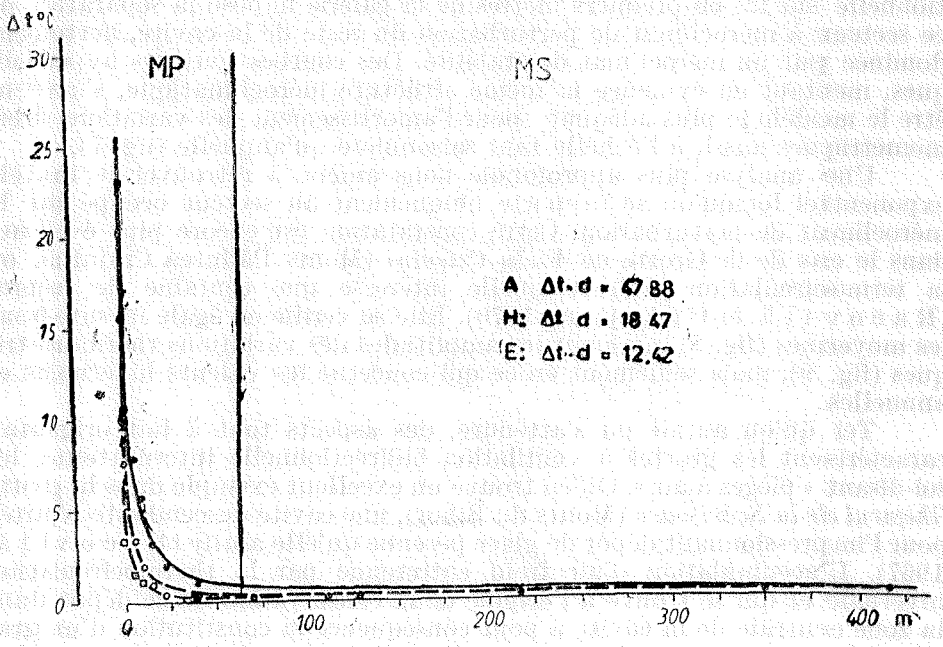

Fig. 7. — Amortissement des variations thermométriques dans la Grotte de Cloșani.

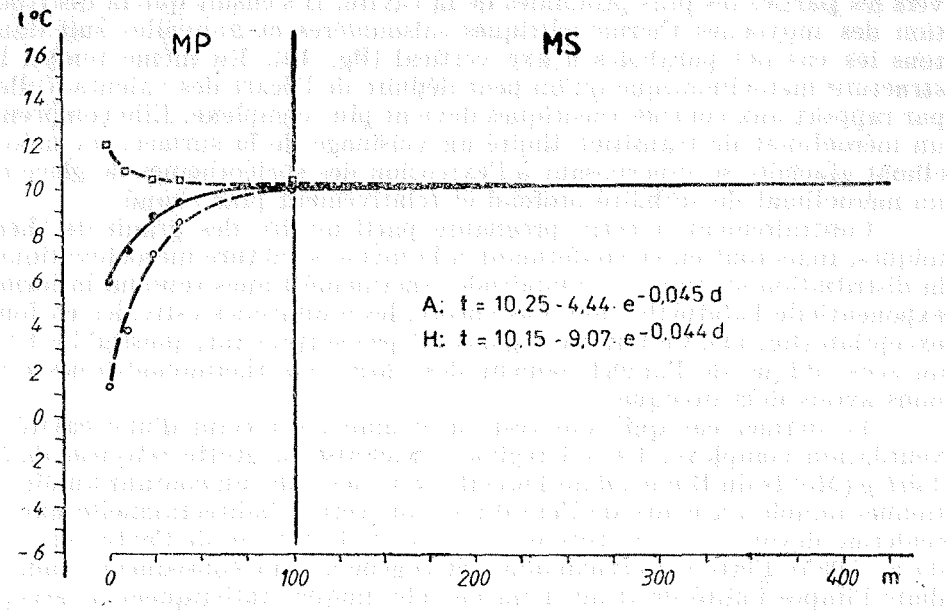

Fig. 8. — Gradients thermiques saisonniers et annuel dans la Grotte de Vadu-Crișului.

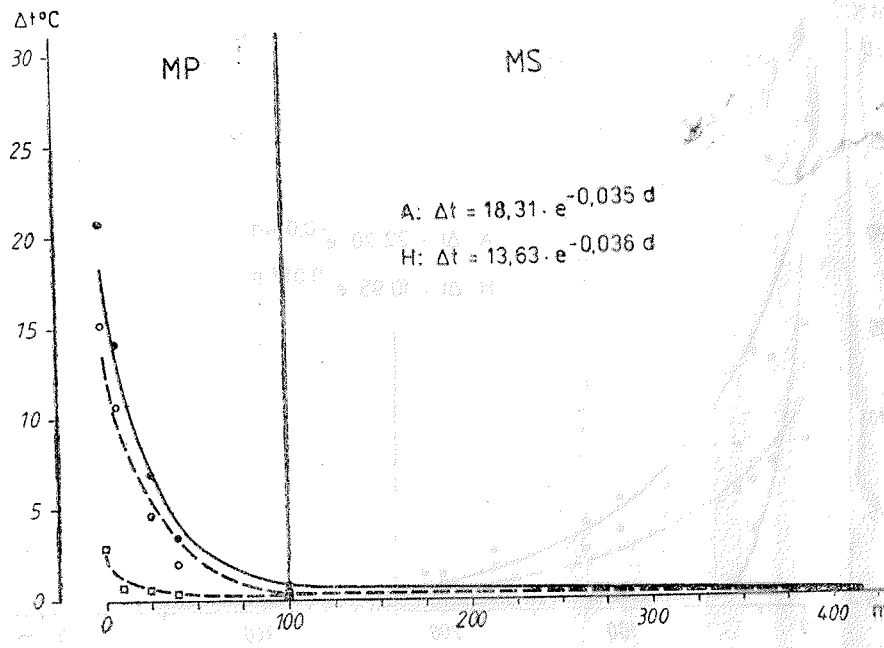

Fig. 9. — Amortissements des variations thermométriques dans la Grotte de Vadu-Cri

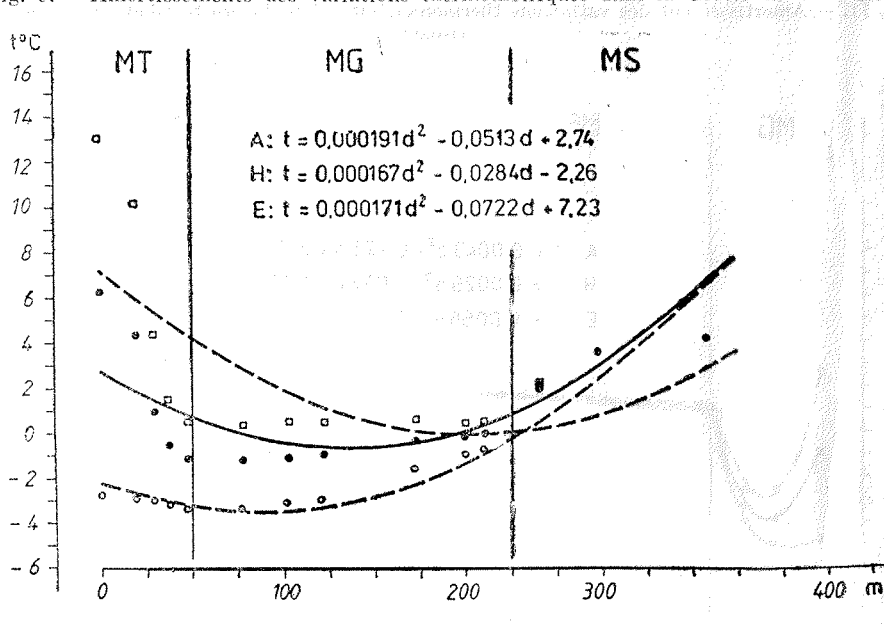

Fig. 10. — Gradients thermiques saisonniers et annuel dans la grotte Gheţarul de la S
şoara. MT = méroclimat de transition; MG = méroclimat glaciaire; MS = méroclima
stabilité.

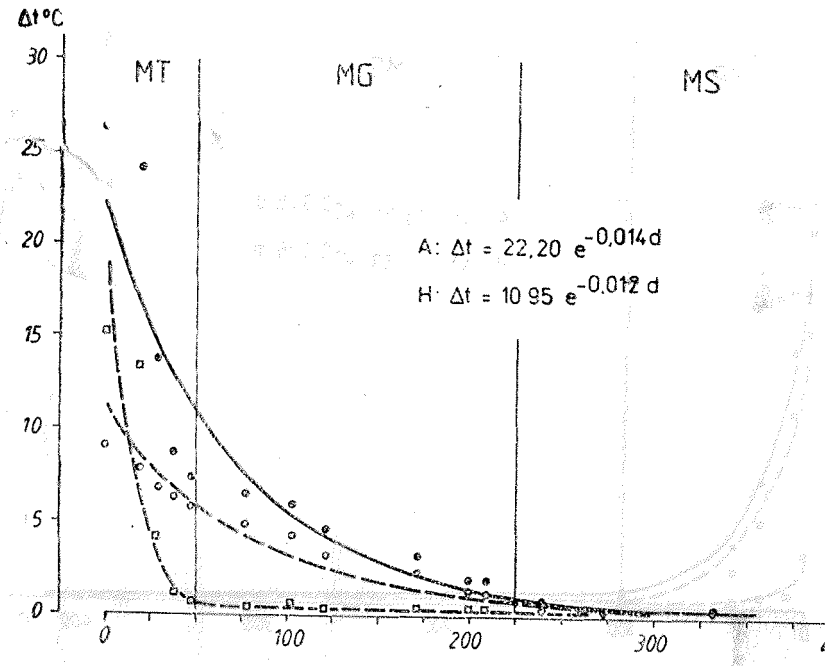

Fig. 11. — Amortissement des variations thermométriques dans la grotte Gheţarul risoara.

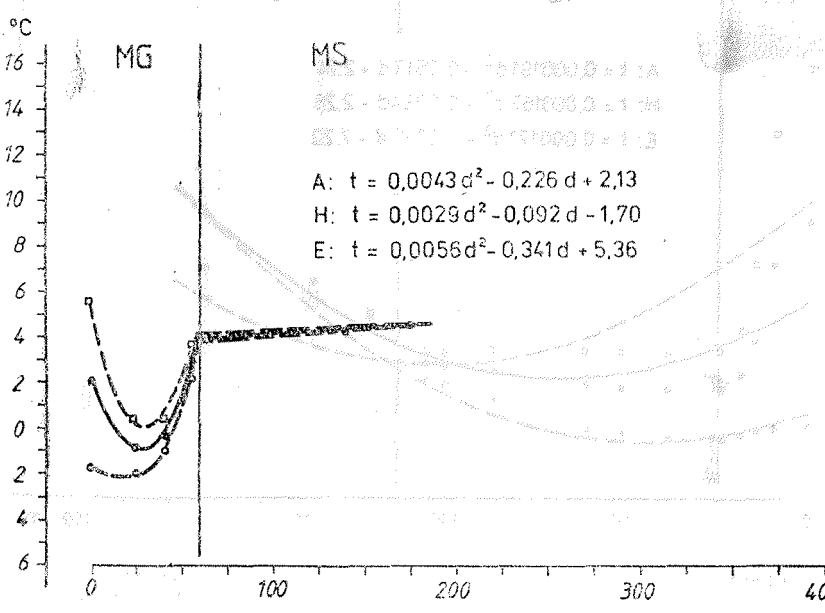

Fig. 12. — Gradients thermiques saisonniers et annuel dans la grotte Gheţarul de MG = méroclimat glaciaire; MS = méroclimat de stabilité.

La zone affectée par la ventilation bidirectionnelle a un méroc de facture glaciaire et on y voit des spéléothèmes de glace persister dans l'été et parfois même d'un hiver à l'autre. Il est donc logiqu retrouver dans ce méroclimat les mêmes gradients paraboliques qui ét si caractéristiques pour la grotte de Scărișoara. Quant aux tempéra du méroclimat de stabilité qui s'installe dans le reste de la cavité, cell sont tellement uniformes qu'elles se distribuent constamment le long d droite pratiquement horizontale, pour laquelle il n'est plus lieu de cal une équation numérique.

Une nouvelle similitude avec la grotte de Scărișoara appar l'égard de l'amortissement des variations thermométriques, car les a tudes annuelles diminuent vers l'extrémité de la cavité en suivan courbe exponentielle classique (fig. 13). On doit néanmoins remarquer le coefficient k de l'équation qui définit cette courbe prend maintenant valeur numérique supérieure, qui traduit une stabilisation plus ra des températures. D'autre part, cette similitude n'efface pas la différence d'entre les deux zones méroclimatiques que nous avons mentionné. Même si elle est apparemment moins visible sur le m exponentiel, elle devient tout à fait évidente lorsqu'on transpose les m valeurs en coordonnées demi-logarithmiques, en linéarisant ainsi les bes (fig. 14). On arrive ainsi à une démonstration très convaincant possibilités que les modèles fonctionnels offrent pour en déduire la s ture méroclimatique des cavités souterraines.

4. CONCLUSIONS

Les équations théoriques exponentielles qui définissent le tran de chaleur lié à l'aérodynamique souterraine se vérifient entièreme les mesures topoclimatiques répondent à la condition nécessaire (mais suffisante) d'être faites au niveau et dans le sens du courant immerg Ce n'est que dans cette situation qu'aux courbes fonctionnelles qui s'a tent au valeurs réelles on peut accorder une signification vraiment sique. Cette signification est forcément limitée aux valeurs saisonn des paramètres topoclimatiques, puisque la thermocirculation souter change de sens selon la saison dans n'importe quelle de ses variantes doit toutefois observer que la distribution des valeurs annuelles (moye ou amplitudes des variations) a la tendance de reproduire le modèle sa nier qui correspond au courant immergent, car les mesures faites au ni du courant émergent donnet en règle générale des valeurs particul ment uniformes et donc dépourvues d'influence sur la grandeur rel de la résultante annuelle.

Par ailleurs, la condition qu'on vient de mentionner expliqu différences qui apparaissent souvent entre le niveau topoclimatiqu celui méroclimatique. Notamment dans les cavités à ventilation bi tionnelle permanente, le modèle exponentiel ne reflète plus la distrib des valeurs dans l'ensemble de la grotte, mais il reste parfaitement a table dans les limites du méroclimat de perturbation, c'est-à-dire sément du secteur affecté par la thermocirculation.

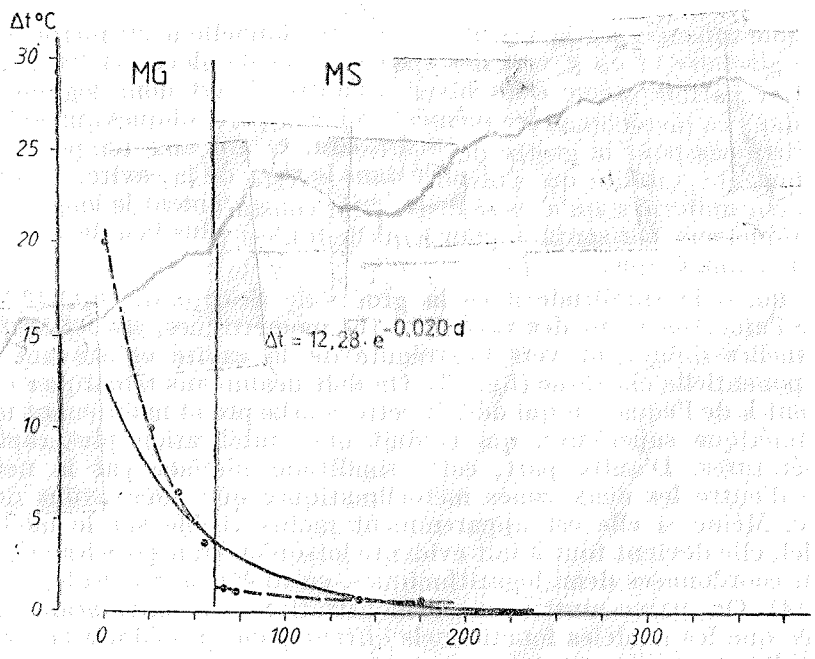

Fig. 13. — Amortissement des variations thermométriques annuelles dans la ş
ţarul de la Vârtop. Trait continu = courbe théorique globale pour l'ensemble topo
traits interrompus = courbes théoriques partielles pour les zones méroclima

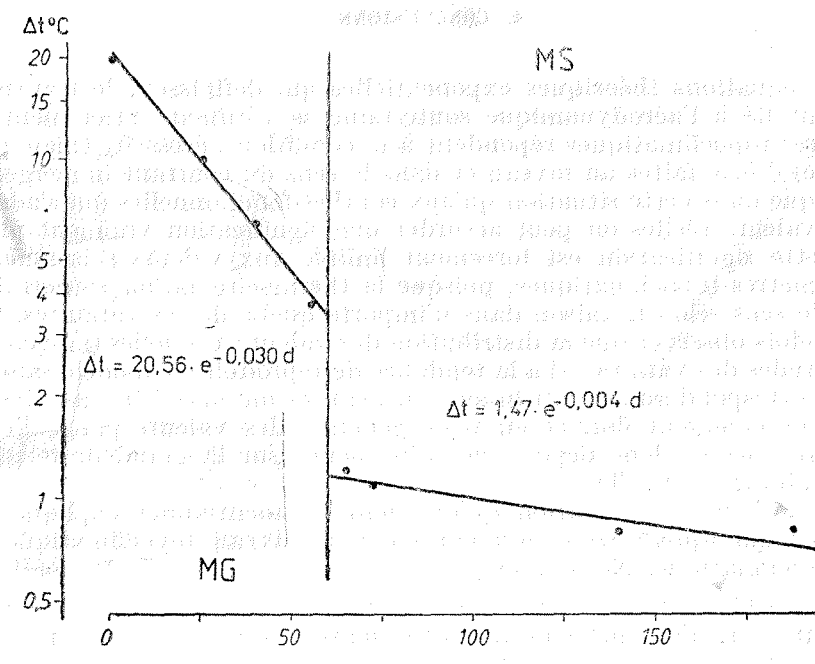

Fig. 14. — Transposition en coordonnées demi-logarithmiques des courbes exponen
tielles représentées dans la fig. 13.

Dans toutes autres circonstances, les courbes fonctionnelles qui modèlent la variation spatiale des facteurs topoclimatiques n'ont qu'une signification purement statistique. Cependant, cette signification est particulièrement importante, parce que c'est elle qui confère à ces courbes la qualité d'élément synthétique dans les bilans climatiques. De ce fait, elle permet la comparaison directe des topoclimats qui caractérisent diverses cavités, indifféremment si celles-ci ont ou non le même régime de ventilation. Les différences ainsi établies peuvent être d'ordre qualitatif si elles concernent le type de courbes, ou seulement quantitatif si elles ne portent que sur la valeur numérique des coefficients d'un et du même type de courbes.

La signification des modèles fonctionnels n'est pas dépourvue de rapport avec le sens anthropique de la notion de « grotte», car elle implique la position qu'une cavité accessible à l'homme occupe dans le réseau karstique dont elle fait partie. Si, par exemple, un tel réseau est parcouru par un courant unidirectionnel, on conçoit facilement que le modèle qui s'adapte aux paramètres topoclimatiques est conforme à la fonction théorique exponentielle seulement en régime hivernal si la cavité accessible se trouve à l'extrémité inférieure du réseau et seulement en régime estival lorsque la cavité représente le secteur supérieur de celui-ci.

La possibilité d'utiliser les courbes fonctionnelles en tant que moyen de comparaison entre les topoclimats souterrains constitue une raison pratique pour laquelle il est préférable de se borner dans une telle analyse à un nombre fini de fonctions élémentaires, que de chercher des fonctions complexes pour arriver à un modelage mathématiquement idéal de chaque série de données.

Quoique le nombre de bilans climatiques souterrains dont nous disposons à présent est encore fort insuffisant, on peut considérer comme généralisable une certaine correspondance entre les catégorie topoclimatiques des grottes et les différents types de modèles théoriques. Au moins en ce qui concerne les gradients de température, il paraît, en effet, que les cavités à ventilation unidirectionnelle se caractèrisent par des modèles exponentiels, celles à ventilation bidirectionnelle permanente par des modèles hyperboliques et celles à ventilation bidirectionnelle intermittente par des modèles paraboliques. Mais il est certain que cette correspondance est plutôt une hypothèse qu'une règle acquise.

BIBLIOGRAPHIE

1971 ANDRIEUX, C., *Contribution à l'étude du climat des cavités naturelles des massifs karstiques. V — Les bilans climatiques.* Ann. Spéléol. **26**, *2*, 367—386.

1984 CHOPPY, J., *Processus climatiques dans les vides karstiques. 3 — Température de l'air.* Phénomènes karstiques, Spéléo-Club de Paris, 73 pp.

1992 ONAC, B., RACOVIȚĂ, G., *Recherches climatologiques dans la Peștera Vântului (Monts Pădurea Craiului, Roumanie).* Theor. Appl. Karstol., **5**, 167—192.

1967 RACOVIȚĂ, G., *Nouvelles contributions à l'étude du topoclimat de la grotte « Gheţarul de la Scărişoara ».* Ann. Spéléol., **XXII**, *4*, 757—786.

1984 RACOVIȚĂ, G., *Sur la structure méroclimatique des cavités souterraines.* Theor. Appl. Karstol., **1**, 123—130.

RACOVIȚĂ, G., BOGHEAN, V., PETRESCU, M., *Le bilan topoclimatique de la Grotte de Cloşani (Monts Mehedinţi, Roumanie).* (sous presse).

1977 RACOVIȚĂ, G., COCEAN, P., *Recherches climatologiques dans la Grotte de Valea Leșului*. Trav. Inst. Spéol. « E. Racovitza », **XVI**, 183—201.
1970 RACOVIȚĂ, G., CRĂCIUN, V., *Note sur le topoclimat de la grotte de Vadu-Crișului*. Trav. Inst. Spéol. « E. Racovitza », **IX**, 61—80.
1985 RUȘDEA, Evelyn, *Etude topoclimatique de la grotte Ghețarul de la Vârtop (Monts du Bihor)*. Theor. Appl. Karstol., **2**, 131—140.
1962 SCHOELLER, H., *Les eaux souterraines*. Masson et Cie., Paris, 642 p.

Institut de Spéologie « E. Racovitza » Section de Cluj
Reçu le 25 mars 1993