

Modélisation mathématique des données dans les bilans topo-climatiques souterrains

Gheorghe RACOVITĂ

Résumé

Après un bref rappel des aspects théoriques concernant le transfert d'énergie dans l'aérodynamique souterraine, on analyse sur des exemples concrets la signification que les courbes fonctionnelles ont en tant que modèles mathématiques de la variation des facteurs topo-climatiques.

Abstract

After a short recollection of theoretical aspects concerning the transfer of energy in underground aerodynamics, we analyse on definite examples the significance of functional curves like mathematical models of topo-climatic elements variation.

Contrairement à une opinion fondée sur des apparences mais assez répandue aujourd'hui encore, la pratique des mesures souterraines montre que les paramètres topo-climatiques de l'atmosphère des grottes sont fort variables dans le temps comme dans l'espace, même si cette variabilité reste comprise dans des limites bien plus restreintes qu'à l'extérieur. Dans de telles conditions d'hétérogénéité, une valeur singulière de la température ou de l'humidité relative de l'air n'a qu'une signification relative et ne peut aucunement rendre compte de l'état général de l'atmosphère souterraine. Par conséquent, pour aboutir à une image globale sur le topo-climat d'une cavité, il y a deux conditions à accomplir. Premièrement, de disposer d'un nombre suffisamment grand de données, ce qui peut être obtenu par des études topo-climatiques intensives. Deuxièmement, d'exprimer l'ensemble de ces données d'une façon encore plus synthétique que celle offerte par les bilans climatiques habituels, tels que ceux-ci ont été conçus jusqu'à présent (ANDRIEUX, 1971). On peut en trouver une modalité adéquate dans les équations numériques correspondant aux courbes fonctionnelles qui s'adaptent statistiquement à la distribution des valeurs réelles. En ce qui suit, nous allons examiner comment s'applique une telle méthode d'analyse et quelles sont les informations qu'on peut finalement en tirer, en prenant comme exemple la température de l'air, car c'est le paramètre qui s'avère être le plus facile à modéliser par cette méthode. Notre examen portera d'une part sur les valeurs absolues et d'autre part sur les amplitudes des variations, donc sur

les deux principaux aspects sous lesquels on considère ordinairement la température de l'atmosphère souterraine.

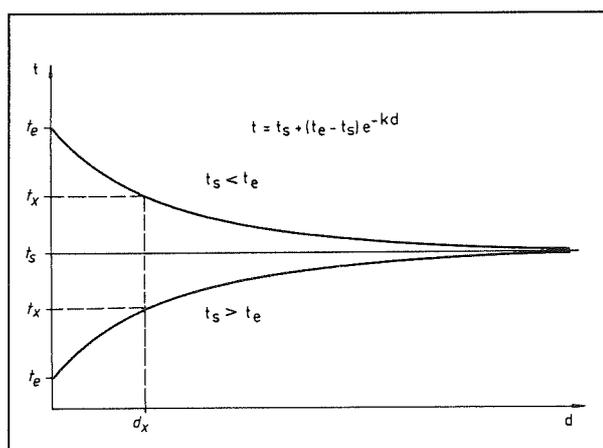


Figure 1: Modèle théorique des valeurs que prend la température d'une masse d'air lorsqu'elle pénètre à l'intérieur d'une grotte.

Lorsqu'une masse d'air ayant, évidemment, un état thermique différent de celui de l'atmosphère souterraine, pénètre de l'extérieur dans une cavité quelconque, la théorie des échanges d'énergie engendrée par cette ventilation montre que la température varie le long de la

cavité d'après une loi exponentielle (Fig. 1), jusqu'à ce qu'elle atteigne une valeur d'équilibre t_s propre à la cavité en question (ANDRIEUX, 1971, CHOPPY, 1984). L'équation générale qui traduit cette variation exponentielle s'écrit :

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

et permet de calculer la température t_x que l'air doit théoriquement avoir à une distance d_x mesurée à partir de l'ouverture de la grotte. Il va sans dire que, selon le sens du rapport entre la température souterraine d'équilibre et la température externe t_e , la courbe correspondant à cette équation est soit descendante, soit ascendante.

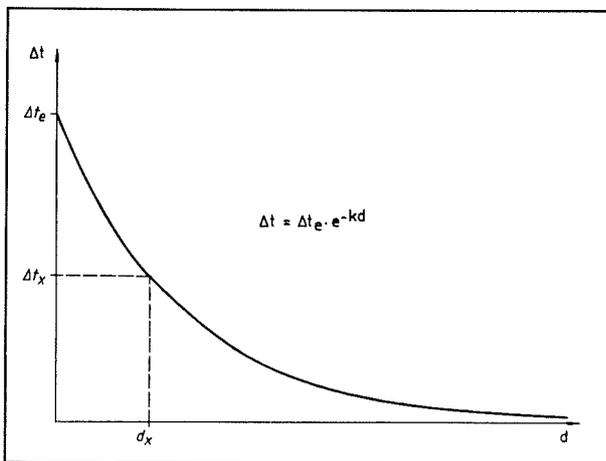


Figure 2 : Modèle théorique de l'amortissement des variations thermométriques souterraines en fonction de la distance rapportée à l'ouverture de la cavité.

En ce qui concerne l'amplitude des variations thermométriques, on sait que, en règle générale, celles-ci ont tendance à diminuer à l'intérieur des grottes, la loi qui préside à un tel phénomène d'amortissement progressif des variations étant théoriquement toujours exponentielle. L'équation qui y correspond est plus simple :

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

car la courbe ne peut avoir dans ce cas qu'un seul sens (Fig. 2).

Après ces très sommaires références aux aspects théoriques de la question, essayons de préciser dans quelle mesure les données thermométriques réelles répondent aux lois physiques que nous venons de

rappeler. Comme l'espace dont nous disposons est limité, nous nous bornerons à seulement deux exemples, choisis parmi les grottes des Monts *Apuseni* (Roumanie), mais qui suffisent pour en tirer les conclusions que nous estimons importantes dans notre analyse.

Le premier exemple nous est offert par la grotte de *Valea Leșului* (RACOVITĂ & COCEAN, 1977), dont la longueur connue atteint actuellement 1 253 m. C'est une cavité à ventilation unidirectionnelle, dont l'entrée fonctionne en tant qu'ouverture inférieure du réseau karstique; à son niveau, il y a donc un courant d'air entrant en hiver et sortant en été.

La distribution des moyennes thermiques saisonnières et annuelles en fonction de la distance rapportée à l'entrée, c'est-à-dire la configuration des gradients thermiques qui se constituent le long de la cavité, présente des aspects différents (Fig. 3).

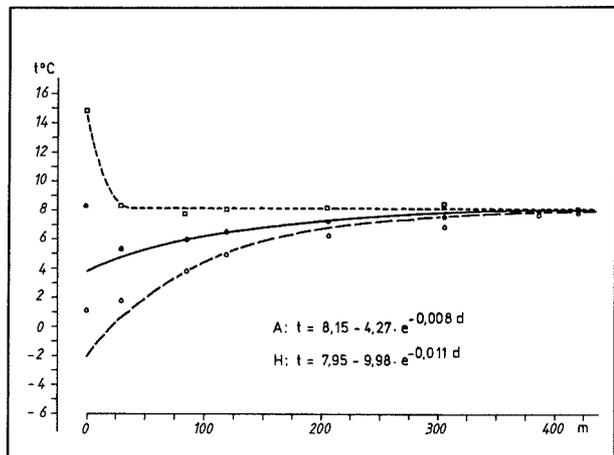


Figure 3 : Gradients thermiques saisonniers (traits interrompus) et annuel (trait continu) dans la grotte de Valea Leșului (points noirs = valeurs réelles annuelles; cercles = valeurs réelles hivernales; carrés = valeurs réelles estivales) et équations numériques des courbes théoriques correspondantes.

En régime d'hiver, quand il y a pénétration d'air externe dans la grotte, les moyennes thermométriques s'ordonnent selon une courbe exponentielle ascendante; on voit donc le gradient de température se conformant aux lois physiques des échanges aérodynamiques. En régime d'été, quand la ventilation change de sens, celle-ci transporte des masses d'air ayant déjà parcouru un trajet souterrain suffisamment long pour qu'elles soient arrivées en état d'équilibre thermique avec le massif calcaire. Par conséquent, les températures sont à peu près uniformes tout le long de la cavité (à l'exception de l'entrée, où il y a une nette influence externe) et leur

distribution spatiale ne peut être modélisée par aucune courbe fonctionnelle. En tant que résultante de la combinaison des gradients saisonniers, le gradient annuel conserve, naturellement, l'allure exponentielle, étant toutefois de plus faible ampleur; cette dernière particularité est clairement mise en évidence par la valeur numérique elle aussi plus faible que prend le coefficient k dans l'équation générale (1).

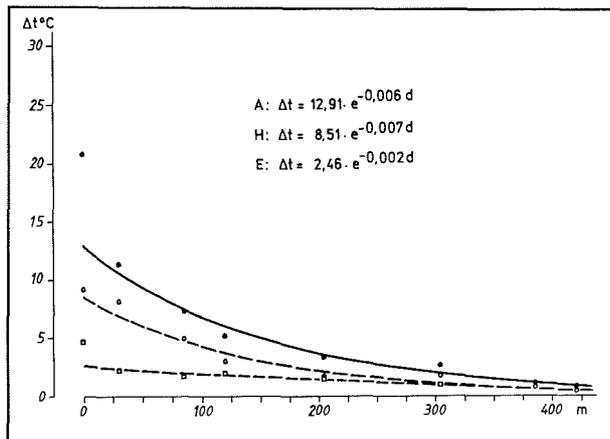


Figure 4: Amortissement des variations thermométriques dans la grotte de Valea Leșului. (points noirs = valeurs réelles annuelles; cercles = valeurs réelles hivernales; carrés = valeurs réelles estivales) et équations numériques des courbes théoriques correspondantes.

Pour les amplitudes thermiques, les mesures donnent des résultats analogues. En effet, on retrouve le modèle exponentiel en premier lieu pour l'amortissement des variations thermométriques durant l'hiver, tandis qu'en été on constate de nouveau une tendance bien marquée d'uniformisation et aussi d'abaissement des valeurs (Fig. 4). Néanmoins, une courbe exponentielle peut cette fois-ci y être adaptée, mais son choix ne se justifie que par l'application tout à fait rigoureuse des critères de signification statistique. Quant aux amplitudes annuelles, celles-ci sont, évidemment, plus fortes que les saisonnières car elles représentent l'addition et, dans de telles conditions, elles ne peuvent que conserver le modèle exponentiel de distribution spatiale.

Le second exemple qu'il est utile d'analyser est celui de la grotte dite "*Ghețarul de la Scărișoara*" (RACOVIȚĂ, 1967), dont les particularités topoclimatiques sont bien différentes de celles de la grotte de Valea Leșului. En effet, il s'agit maintenant d'une cavité à ventilation bidirectionnelle intermittente, dans laquelle les échanges aérodynamiques avec l'extérieur sont limités strictement à la saison hivernale. Notons que ce régime topoclimatique constitue le mécanisme fondamental par lequel s'est formé et se conserve à l'intérieur de la grotte

un dépôt de glace pérenne de 70 000 m³ de volume et dont l'ancienneté remonte à environ 4 000 ans.

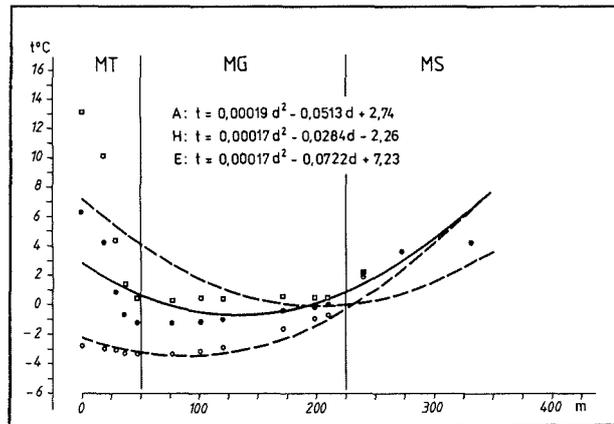


Figure 5 : Gradients thermiques saisonniers et annuel dans la grotte de Scărișoara.

La modélisation des gradients thermiques qui prennent naissance dans la grotte de Scărișoara nous amène à constater que, dans les conditions spécifiques de cette cavité, la distribution spatiale des moyennes thermométriques n'est plus conforme à la loi exponentielle générale, mais répond dans tous les cas à des courbes paraboliques (Fig. 5), donc à des fonctions du deuxième degré. En outre, l'arrangement des valeurs réelles par rapport aux courbes théoriques montre des discontinuités qui représentent autant de limites de zones méroclimatiques. Nous rappelons que de telles zones se constituent lorsque certains secteurs d'une cavité, définis ou non par des éléments topographiques, présentent au point de vue thermo-hygrométrique des traits particuliers (RACOVIȚĂ, 1975). Dans notre cas, l'ensemble topoclimatique se divise en trois méroclimats : un méroclimat de transition dans le secteur qui fait suite à l'entrée, un méroclimat glaciaire dans le secteur occupé par les spéléothèmes de glace et un méroclimat de stabilité dans le secteur profond (le dénivellement total étant de -105 m). Cette division méroclimatique se trouve en parfait accord avec les modèles mathématiques des gradients thermométriques, car l'analyse statistique des données conduit à des paraboles à axe vertical précisément par suite de l'accumulation d'air froid qui se maintient à l'intérieur de la grotte. Dans le même ordre d'idées il faut remarquer que c'est toujours durant l'hiver, donc en phase active de la thermocirculation intermittente, que les valeurs réelles se rapprochent le plus de la courbe théorique. Enfin, on doit mentionner que les moyennes thermométriques reprennent des distributions exponentielles à l'intérieur des zones méroclimatiques, mais nous n'insistons pas sur ce détail, qui a fait l'objet d'une analyse plus approfondie (RACOVIȚĂ, 1984).

Malgré ces multiples éléments particuliers liés aux gradients de température, la modélisation des amplitudes thermiques a des solutions similaires à celles obtenues pour la grotte de Valea Le șului, puisque l'amortissement des variations se fait selon des courbes toujours exponentielles, en période d'hiver aussi bien qu'au niveau du cycle annuel (Fig. 6). Il y a toutefois deux aspects à souligner. D'une part, que la séparation en zones méroclimatiques reste possible au point de vue des amplitudes thermiques aussi, sans modification de l'extension de ces zones. D'autre part, que les équations correspondant aux deux courbes exponentielles mettent en évidence des différences importantes par rapport à la situation précédente, notamment un amortissement bien plus rapide des variations, quantifié par les valeurs supérieures que prend le coefficient k . Et il faut ajouter qu'il y a des grottes dans lesquelles cet amortissement n'accepte plus un modèle exponentiel. **précise et détaillée.**

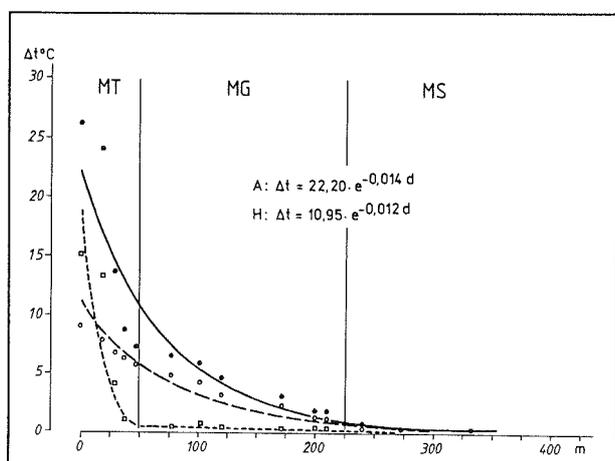


Figure 6 Amortissement des variations thermométriques dans la grotte de Scărișoara.

Quoique très bref, cet exposé nous permet de formuler plusieurs conclusions susceptibles de généralisation.

1. Les données topo-climatiques obtenues par mesures ne sont conformes aux lois théoriques des échanges aérodynamiques souterrains que lorsque ces mesures sont effectuées dans les conditions d'un courant d'air entrant. Par conséquent, on n'est en droit d'attacher une signification physique qu'aux valeurs saisonnières, parce que les moyennes annuelles renferment des composantes de facture toujours antagoniste, toute ventilation souterraine changeant son sens d'une saison à l'autre.

2. Il est pratiquement impossible de donner aux mesures topo-climatiques une interprétation correcte et complète avant d'avoir établi le régime de ventilation de la grotte en question.

3. En tant que modèles théoriques des variations des paramètres thermo-hygro-métriques, les courbes fonctionnelles ont toujours un haut degré de signification statistique et peuvent être effectivement employées comme expression synthétique des particularités topo-climatiques des grottes. Cette signification réside dans le fait que de telles courbes mettent en évidence non seulement des différences qu'on peut qualifier de qualitatives, car elles concernent leur forme (c'est-à-dire le type même des fonctions mathématiques qui les définissent), mais aussi des différences quantitatives, illustrées par les valeurs numériques qui prennent les coefficients de l'un et même type d'équation. On arrive ainsi à disposer d'un moyen particulièrement utile et efficace pour comparer les grottes au point de vue topo-climatique, cette comparaison pouvant être faite d'une manière directe et globale et en même temps

BIBLIOGRAPHIE

- ANDRIEUX, C., 1971. Contribution à l'étude du climat des cavités naturelles des massifs karstiques.5. - Les bilans climatiques. *Ann. Spéléol.*, 26, 2 : 367-386.
- CHOPPY, J., 1984. *Processus climatiques dans les vides karstiques. Température de l'air.* Phénomènes karstiques, Spéléoclub de Paris.
- , G., 1967. Nouvelles contributions à l'étude du topo-climat de la grotte "Ghețarul de la ...". *Ann. Spéléol.* 22, 4 : 757-786.
- , G., 1975. La classification topo-climatique des cavités souterraines. *Trav. Inst. Speol. "E."*, 14 : 197-216.
- , G., 1984. Sur la structure méroclimatique des cavités souterraines. *Theor. Appl. Speleol.*, 1 : 123-130.
- , G. & COCEAN, P., 1977. Recherches climatologiques dans la Grotte de Valea Le șului. *Trav. Inst. Speol. "E. Racoviță"*, 16 : 183-201.

Adresse de l'auteur :

Gheorghe
Institutul de Speologie "Emil Racoviță"
Str. Clinicilor, nr. 5
R-3400 CLUJ NAPOCA
ROUMANIE