

DONNÉES THERMOMÉTRIQUES RELATIVES À L'ATMOSPHÈRE DE LA GROTTÉ POARTA LUI IONEL (MONTS DU BIHOR, ROUMANIE)

DANIELA BORDA, GHEORGHE RACOVITĂ

Résumé. Le travail traite de l'analyse des valeurs obtenues par enregistrement continu de la température de l'air, effectué sur la durée d'un cycle annuel et en utilisant cinq dispositifs électroniques de type *data logger*. Tel qu'on pourrait le supposer en considérant uniquement la morphologie de la grotte, les données montrent que la grande galerie qui compose le niveau inférieur de celle-ci est soumise aux effets d'une ventilation bidirectionnelle permanente, tandis que la galerie supérieure se caractérise par une prégnante stabilité. Par suite de tels échanges aérodynamiques, les influences externes sont assez fortes pour que les températures varient le long de l'année avec une évidente périodicité non seulement saisonnière, mais aussi nyctémérale. Quoique dépourvues de pareilles périodicités, les amplitudes journalières sont assez importantes, dépassant souvent 1°C à l'extrémité de la galerie inférieure. Il s'ensuit que, en dehors de la convection, les influences externes peuvent se propager par conduction aussi.

Abstract: "AIR TEMPERATURE DATA IN POARTA LUI IONEL CAVE (BIHOR MOUNTAINS, ROMANIA)". The authors analyzed the one-year temperature cycle values continuously registered in Poarta lui Ionel Cave by using five data loggers. Pursuant to the distinctive cave morphology, the big gallery that forms the basal level is under a permanent bidirectional ventilation effect, while the upper gallery is characterized by an obvious stability. According to the dynamics of air exchanges, the outside influences are strong enough, so that to the cave temperature vary during a year period with an evident periodicity, not only seasonal, but also daily. In spite of the lack of a similar periodicity, the daily amplitudes are quite important, exceeding 1°C in the extremity of the basal gallery. These facts mean that, beside the convection phenomena, the outside influences can also propagate in the cave by conduction.

Key words: subterranean climatology, air temperature, Poarta lui Ionel Cave.

1. DESCRIPTION SOMMAIRE DE LA CAVITÉ

La grotte dite Poarta lui Ionel (Porte de Jeannot) s'ouvre à une altitude de 805 m, dans le versant droit de la Vallée d'Ordâncușa, à environ 1,5 km en amont de la confluence de celle-ci avec la rivière de Gârda Seacă (bassin supérieur de l'Arieșul Mare). L'entrée est représentée par un portail de proportions imposantes (20 m en hauteur et 15 m en largeur), en face duquel s'est formé un grand cône d'éboulis.

La cavité se développe sur deux niveaux majeurs de karstification, nettement séparés et bien différents au point de vue morphologique. Sa longueur totale est de 324 m, avec une dénivellation positive de 35 m.

Le niveau inférieur se compose d'une galerie généralement horizontale, très vaste dans sa première partie et coudée deux fois en angle presque droit (Fig. 1). En hiver, de nombreux et variés spéléothèmes de glace prennent naissance dans le secteur qui fait suite à l'entrée. Peu après le premier coude, une massive coulée stalagmitique transversale forme un ressaut de 6 m de hauteur, au delà duquel la galerie devient moins large et plus basse. Peu avant son extrémité, dans le plancher argileux apparaît une large excavation en forme d'entonnoir, d'environ 10 m de diamètre. A une quinzaine de mètres de l'entrée, un petit cours d'eau apparaît au pied de la paroi gauche, mais en périodes pluvieuses, les eaux peuvent sortir au premier coude de la galerie et même se déverser de cette excavation. Rappelons pour mémoire que, tel qu'il a été démontré par coloration à la fluorescéine, la Poarta lui Ionel est l'exurgence du long drainage souterrain qui parcourt la Grotte de Zgurăști (ONAC *et al.*, 2010).

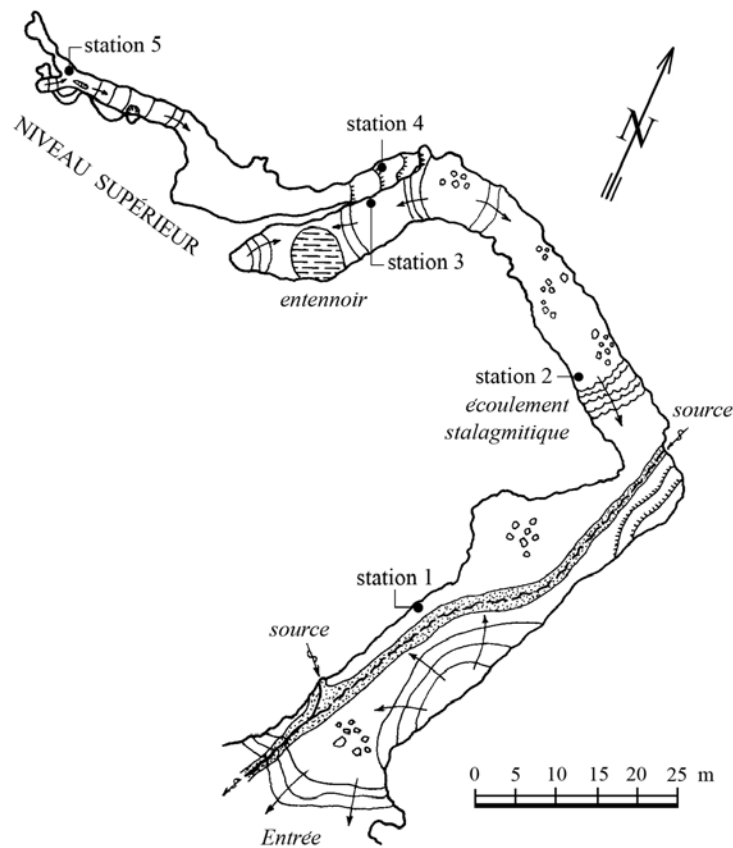


Fig. 1. Plan de la grotte Poarta lui Ionel, avec l'emplacement des stations de mesures (d'après Onac *et al.*, 2010).

Le niveau supérieur n'a été découvert qu'en 1988, car il communique avec la galerie inférieure uniquement par deux ouvertures extrêmement petites, situées à une quinzaine de mètres de hauteur sur la paroi droite de celle-ci et au voisinage du plafond de la galerie supérieure. Afin d'y faciliter l'accès, un court passage artificiel a été foré la même année à travers un dépôt de calcite. Pour des raisons liées à la protection du milieu souterrain, ce passage a été complètement obturé en 2008. Néanmoins, l'opération a été faite de manière à rendre toujours possibles des visites rigoureusement motivées. La galerie principale qui compose le niveau supérieur prend clairement fin devant une paroi compacte. Cependant, il n'est point exclu qu'une cheminée proche de cette paroi et qui paraît suivre le trajet d'une diaclase la mette en liaison avec une autre cavité, l'Avenul Mic de sub Zgurăști, situé à peu près sur le même alignement vertical. En outre, cette galerie communique par un puits peu profond avec quelques couloirs de faible extension.

2. PRÉLÈVEMENT DES DONNÉES

Les valeurs thermométriques ont été déterminées continuellement le long d'un cycle annuel à peu près complet, entre le 16 novembre 2008 et le 8 novembre 2009, donc après que la cavité ait regagné son état naturel. Les appareils utilisés ont été des dispositifs électroniques de type *data logger* (Tiny tag TGP-4500), ayant une précision de 0,01°C et réglés de manière que les données soient enregistrées tous les 60 minutes. Ces dispositifs ont été placés en cinq stations, dont trois dans la galerie inférieure, à 27 m, 67 m et 99 m de distance par rapport à l'entrée de la grotte. Malheureusement, la température externe n'a pas pu être enregistrée dans des conditions conformes aux standards météorologiques.

3. RÉGIME DE VENTILATION

Dans le large l'espace de la galerie inférieure, l'existence d'éventuels courants d'air est plutôt difficile à constater. En effet, la seule observation faite auparavant à cet égard est celle de JEANNEL et RACOVITZA (1929), qui notaient que „*l'agitation de l'air est nulle ou sensible seulement dans la galerie profonde*” (p. 435), la raison étant la voûte s'abaisse qu'ici jusqu'à 2 m du plancher. La configuration générale de la cavité, horizontale et pratiquement à une seule ouverture, suggère néanmoins qu'au moins ce secteur doit être le siège d'une ventilation bidirectionnelle permanente (ANDRIEUX, 1971; RACOVITĂ, 1975). L'hypothèse a été vérifiée par des observations faites à l'aide de la fumée le 14 février 2010, quand un courant d'air froid, localisé évidemment au voisinage du plancher, arrivait jusqu'au fond de cette galerie. Cependant, sa vitesse était si faible qu'elle n'a pu être mesurée qu'à l'entrée de la grotte, où elle était de l'ordre de 20 cm/s. Par ailleurs, le grand développement auquel arrivent les spéléothèmes saisonniers de glace prouve que, durant l'hiver, les influences externes peuvent être assez importantes. Quant au

secteur supérieur, les mêmes observations ont mis en évidence une ventilation toute aussi faible, ascendante devant l'entrée de la galerie mais descendante dans le secteur terminal de celle-ci. Faute d'informations sur les rapports spatiaux que la cavité pourrait avoir dans le cadre du massif karstique, cet étrange inversement de sens est difficile à comprendre. En revanche, on peut supposer que l'air y est évacué par une ouverture supérieure, le plus vraisemblablement celle de l'aven mentionné ci-dessus. L'hypothèse est d'autant plus plausible que des situations similaires se retrouvent dans d'autres cavités aussi, telles la grotte de Vârtoș (Monts du Bihor) (RUȘDEA, 1985) ou celle de Fața Apei (Monts Pădurea Craiului) (RACOVIȚĂ et CRĂCIUN, 1981). Et dans tous ces cas, le transport des masses d'air se réalise par des conduits bien étroits.

4. ANALYSE DES TEMPÉRATURES MOYENNES JOURNALIÈRES

L'évolution au cours de l'année des moyennes thermiques journalières révèle d'emblée une tranchante différence entre les deux niveaux de la grotte. En effet, dans toutes les trois stations de la galerie inférieure, la température de l'air présente des variations notables, avec un manifeste caractère saisonnier, tandis qu'elle est sensiblement plus stable au niveau supérieur (Fig. 2). Il s'ensuit que l'espace de la cavité est divisé en deux zones méroclimatiques (RACOVIȚĂ, 1984), une de perturbation dans la galerie inférieure et une autre de stabilité dans la galerie supérieure.

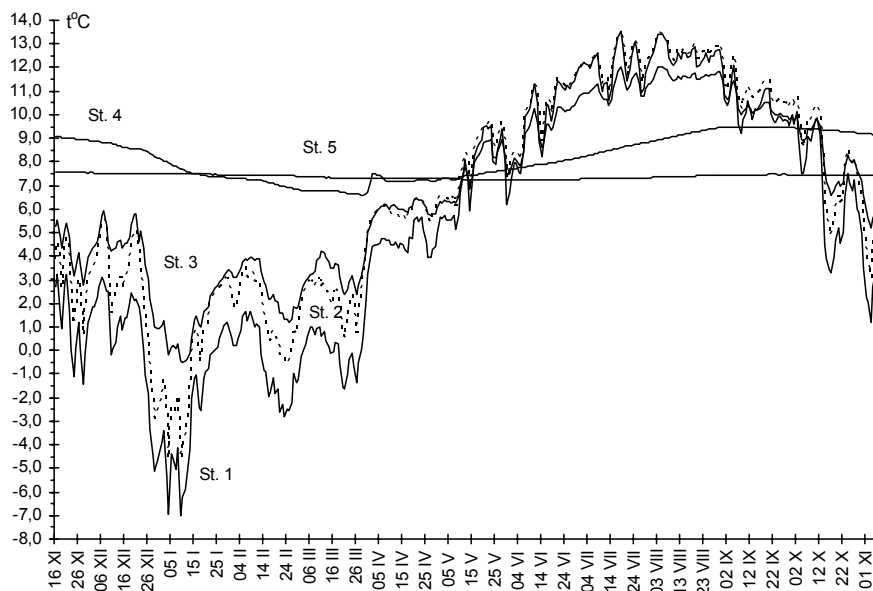


Fig. 2. Variations au cours de l'année des moyennes journalières.

Dans de telles conditions, la modalité la plus convenable par laquelle on peut délimiter les phases de ventilation qui se succèdent le long d'un cycle annuel est d'identifier les moments où la température externe devient constamment supérieure, respectivement inférieure à la valeur d'équilibre propre à la grotte. Or, on peut considérer avec une approximation acceptable que la température externe n'est pas très différente de celle mesurée à la station 1 et que la valeur d'équilibre est équivalente à la température moyenne annuelle de la station 5 (la plus éloignée de la surface), qui est de 7,39°C. On arrive ainsi à préciser que la période hivernale a commencé le 28 octobre et a pris fin le 9 mai¹, tandis que celle estivale a duré depuis le 16 juin jusqu'au 3 octobre; ces deux périodes principales sont donc séparées par des intervalles de transition, dont celui automnal a été plus court. Il va sans dire que, ainsi datées, les limites des diverses phases de ventilation ne peuvent être valables que pour le cycle 2008-2009. À certains points de vue, des comparaisons avec les constatations faites dans d'autres cavités restent néanmoins possibles. Sans entrer en détails, citons le fait que des périodes de transitions de même inégales ont été mises en évidence par le même procédé dans la Grottes de Ours de Chișcău, mais dans ce cas, la période automnale a été plus longue que celle vernale (RACOVITĂ *et al.*, 2002–2003).

En période hivernale, un gradient thermique évident apparaît tout le long de la galerie inférieure. Le faible nombre d'enregistreurs qui ont pu être mis en place ne permet pas de lui donner une expression quantitative. On peut toutefois observer que la différence d'entre les stations 2 et 3 varie selon la température, car elle est visiblement plus grande quand la température est plus basse (Fig. 2). Sur le trajet ascendant de l'air froid qui entre dans la grotte durant l'hiver, le ressaut formé par la coulée stalagmitique constitue donc un barrage naturel qui ne s'oppose à la thermocirculation que lorsque la vitesse de ventilation est relativement faible. En outre, il est lieu de préciser que cet obstacle ne détermine pas une accumulation d'air froid, tel que pourrait le suggérer le fait que la densité des stalagmites de glace est maxime dans le secteur qui le précède. En effet, on ne doit pas ignorer que de semblables formations se développent de préférence à des températures négatives plus modérées, auxquelles la vitesse de congélation de l'eau de percolation est plus faible (RACOVITĂ et ONAC, 2000).

Vers la fin de l'hiver, plus précisément au mois d'avril, la différence de température entre les stations 2 et 3 diminue jusqu'à devenir presque nulle, pour qu'au cours de la période vernale de transition un état d'homogénéité thermique s'installe dans toute la galerie.

En période estivale, la différence thermique la plus réduite, voir l'identité, apparaît entre les stations 1 et 2 et le sens du gradient thermique s'inverse, car c'est à ces stations que la température est maintenant la plus élevée. Compte tenu de la

¹ Du fait que les enregistrements thermométriques ont commencé en novembre 2008, donc en période hivernale, la durée de celle-ci a été établie en considérant les deux années civiles, 2008 pour sa fin et 2009 pour son début.

manière générale dont se déroule une thermocirculation bidirectionnelle, ce dernier fait est anormal, puisque l'inversion saisonnière du sens de la thermocirculation n'est point de nature à déterminer une température plus basse en profondeur de la grotte. Il s'ensuit que la cause de ce phénomène est non pas la convection, mais la conduction, parfaitement possible compte tenu des grandes dimensions de l'entrée et aussi du fait que la lumière du jour pénètre facilement, surtout en été, jusqu'au premier coude de la galerie.

Dans le niveau supérieur, une allure saisonnière dans la variation de la température ne se conserve qu'à la station 4, située à seulement 4 m du passage artificiel (Fig. 2). Dans cette évolution, la phase de perturbation est celle durant laquelle la température augmente, le plus probablement par suite de l'influence due à l'air chaud externe qui circule au voisinage de la voûte. En d'autres termes, l'abaissement hivernal de la température n'est pas l'effet d'une influence quelconque, mais la conséquence d'une suppression de celle-ci. Significatif à cet égard est le fait que la température y arrive à son maximum avec un décalage d'environ un mois par rapport aux trois stations de la galerie inférieure, parce que l'influence externe s'y manifeste forcément sur toute la durée de la phase estivale de ventilation.

Un autre élément à noter sur la courbe thermométrique enregistrée à la station 4 est la rapide hausse qui s'est produit le 1^{er} avril 2009 et dont l'amplitude a été de 0,66°C. Comme cette anomalie positive a été suivie d'un léger abaissement des valeurs, il est possible qu'elle soit due à un facteur anthropique.

À la station 5, placée à peu près au-dessous de la cheminée qui se trouve dans la partie terminale de la galerie (Fig. 1), la température est pratiquement constante, et cela en dépit de l'existence à proximité de possibles voies de circulation d'air.

5. ANALYSE DES VALEURS THERMOMÉTRIQUES HORAIRES

Afin de détailler les principaux éléments déduits de l'examen des moyennes journalières, deux séquences de six jours ont été extraites des chroniques des données brutes, l'une spécifique à la période hivernale, l'autre à celle estivale (Fig. 3). Le premier aspect à remarquer est représenté par les cycles journaliers qui apparaissent sur chacune des courbes correspondant aux trois stations de la galerie inférieure, mais avec d'importantes différences liées à la saison.

En régime d'hiver, les variations que la température présente au cours de 24 heures sont amples et pratiquement synchrones aux stations 1 et 2. Les maxima sont enregistrés vers la fin des après-midis et les minima, dans la première partie des matins, donc avec un certain décalage par rapport aux moments où ces valeurs extrêmes sont atteintes normalement en surface. En absence de données sur les températures externes, la cause de ce décalage reste obscure, car le synchronisme des variations exclut la possibilité qu'elle soit représentée par le temps dont l'air externe arrive à chacune des deux points de mesure. En évidente opposition avec ces constatations, la périodicité nyctémérale est considérablement atténuée à la

station 3, en premier lieu par suite du rôle de barrière que joue le ressaut stalagmitique. Enfin, aux deux stations situées dans la galerie supérieure, la variation de la température devient pratiquement linéaire, avec la même tendance d'abaissement à la station 4 que nous avons mentionnée précédemment.

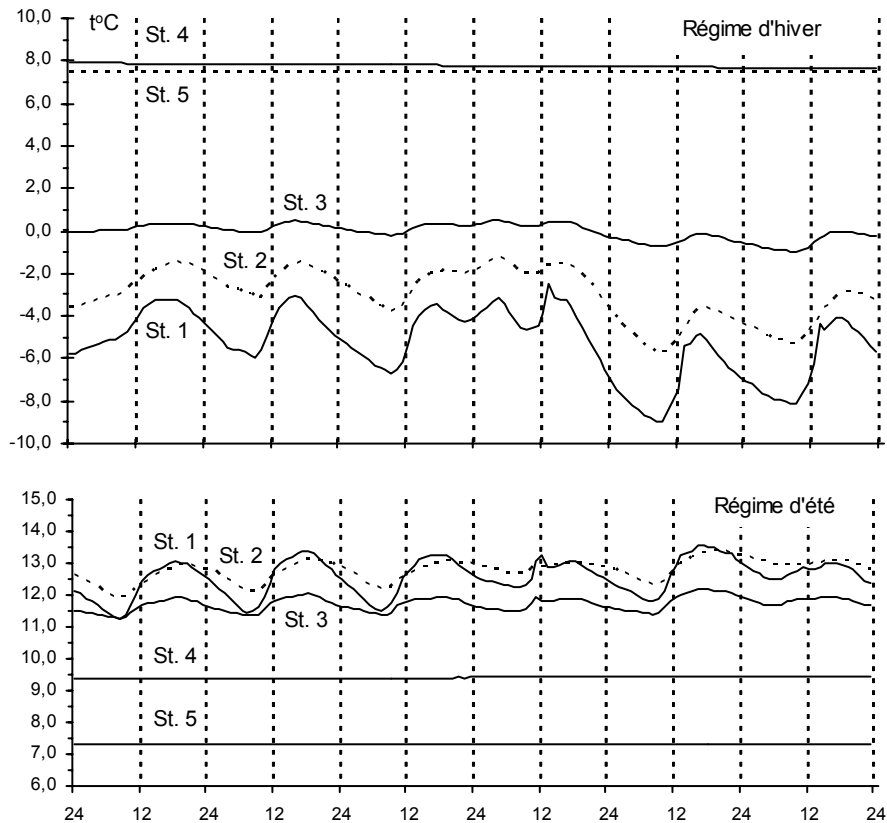


Fig. 3. Valeurs horaires de la température enregistrées dans l'intervalle 5–10 janvier 2009 (régime d'hiver), respectivement 25–30 août 2009 (régime d'été).

En régime d'été, la cyclicité journalière aux stations 1 et 2 est moins ample et les deux courbes se superposent en grande mesure, illustrant ainsi une homogénéité thermique qui ne peut être que le résultat de l'influence externe propagée par conduction. Ce phénomène doit être aussi la cause pour laquelle la distance d'entre ces courbes diminue beaucoup au cours de la journée, quand la température enregistrée à la station 1 arrive à dépasser de quelques dixièmes de degrés celle de la station 2. À la station 3, la même cyclicité est légèrement plus prononcée par rapport à la période hibernale, car compte tenu du sens de la thermocirculation, elle se manifeste dans une masse d'air provenant de la surface et qui n'est pas arrivé à

l'état d'équilibre thermique avec la roche encaissante. Dans le niveau supérieur de la cavité, toute variation de la température est effacée, de sorte que les valeurs s'ordonnent le long d'une ligne horizontale.

6. ANALYSE DES AMPLITUDES THERMIQUES JOURNALIÈRES

Par suite des grandes dimensions aussi bien de l'entrée que de la galerie inférieure, les variations que la température présente au cours d'une journée restent assez amples sur tout le développement de cette galerie. En effet, les maxima absolus des amplitudes journalières sont de 4,16°C à la station 1, de 2,55°C à la station 2 (les deux enregistrée le 13 octobre 2009) et de 1,64°C à la station 3 (le 8 décembre 2008).

En flagrante opposition avec les moyennes thermiques journalières, les amplitudes thermiques calculées pour les trois premières stations présentent au cours de l'année des variations extrêmement irrégulières (Fig. 4). Aussi, il est préférable que leur analyse soit faite non pas sur les valeurs brutes, mais sur celles filtrées par la méthode des moyennes mobiles (Fig. 5).

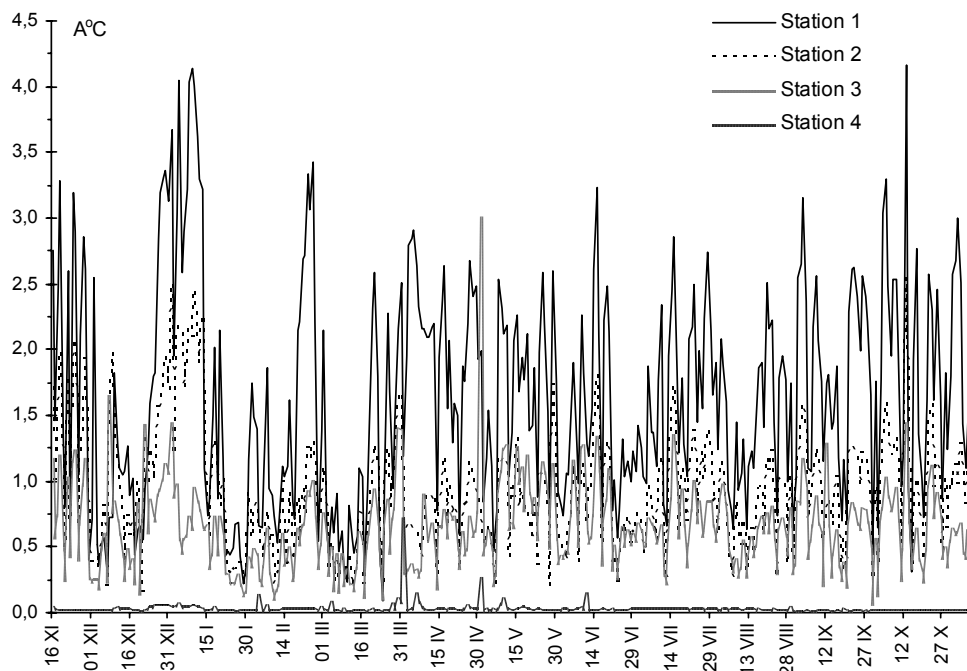


Fig. 4. Variation au cours de l'année des amplitudes journalières.

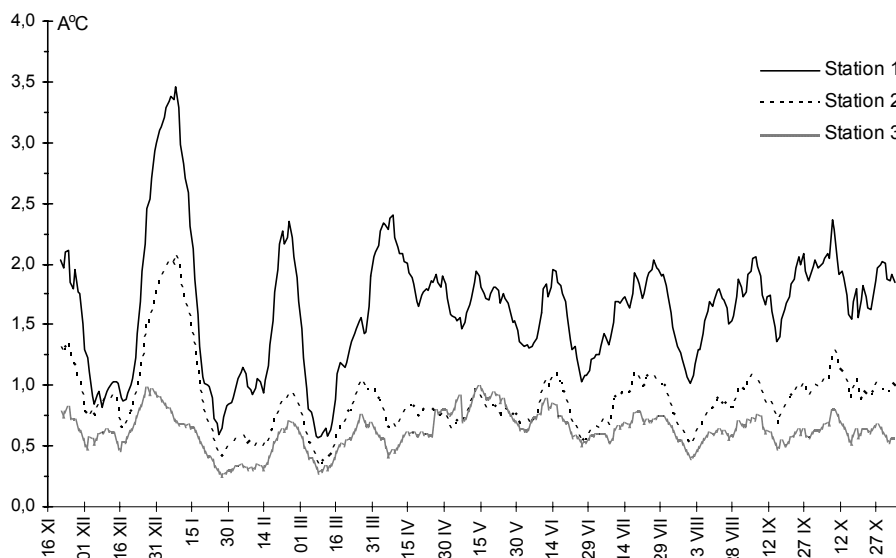


Fig. 5. Courbes des amplitudes thermiques aplanies par la méthode des moyennes mobiles (période de 11 valeurs).

Les nouvelles courbes mettent nettement en évidence des hautes et des baisses qui se succèdent tout le long du cycle annuel sans aucune périodicité saisonnière; elles doivent donc être attribuées aux fluctuations aléatoires de la température externe. Par ailleurs, une telle périodicité peut être décelée dans les différences qui existent entre les trois stations au point de vue grandeur des amplitudes. On voit en effet qu'en période hivernale, la distance d'entre les courbes correspondant aux stations 1 et 2 augmente quand la thermocirculation s'intensifie par suite d'un refroidissement plus accentué à l'extérieur. C'est spécialement ce qui s'est passé durant les intervalles ayant comme point central les dates de 9 janvier (température externe moyenne $-7,04^{\circ}\text{C}$) et 24 février (température externe moyenne $-2,56^{\circ}\text{C}$) (Fig. 2). Notons en outre que les divers niveaux auxquels les courbes se placent au cours du deuxième épisode, quand le refroidissement a été plus modéré, illustrent le plus clairement l'effet de barrière du ressaut stalagmitique. Pour le reste de l'année, la courbe correspondant à la station 1 se détache nettement des deux autres, fait qui relève une fois de plus la propagation par conduction des variations thermiques dues à la radiation solaire.

Dans le méroclimat de stabilité propre à la galerie supérieure, les amplitudes se réduisent sensiblement, leur moyenne annuelle étant de seulement $0,02^{\circ}\text{C}$ à la station 4 et de $0,01^{\circ}\text{C}$, donc pratiquement nulle, à la station 5. Le seul élément digne d'être mentionné est que la perturbation thermique enregistrée le 1^{er} avril 2009 à la station 4 apparaît sur la courbe des amplitudes sous la forme d'un pic singulièrement évident, de $0,71^{\circ}\text{C}$ (Fig. 4). Aussi, l'hypothèse qu'il ait pour cause une action anthropique devient bien plus plausible.

7. CONCLUSIONS

La grotte Poarta lui Ionel est par excellence une cavité à ventilation bidirectionnelle permanente; néanmoins, il est possible qu'à celle-ci une ventilation unidirectionnelle s'ajoute dans le niveau supérieur.

Dans l'ensemble de l'espace souterrain se différencient deux zones méroclimatiques nettement séparées: une zone de perturbation dans la galerie inférieure et une zone de stabilité dans la galerie supérieure.

La propagation des variations thermométriques externes dans l'atmosphère souterraine se fait de manière prépondérante par convection, mais avec une vitesse si faible, que le courant d'air est à peine décelable.

Dans la première partie de la galerie inférieure, largement ouverte à la surface, la thermocirculation de l'air est doublée d'un transfert par conduction des fluctuations dues à la radiation solaire.

REMERCIEMENTS. La présente étude n'aurait pas pu être réalisée sans le précieux concours de M. Nigel Palemr de Gemini Data Loggers UK Ltd, qui a bien voulu nous fournir les dispositifs électroniques de mesure. Nous le prions d'agréer l'expression de notre profonde gratitude. Nous remercions également M. Christian Ciubotărescu, président de l'Association spéléologique «Sphinx», et son collègue M. Avram Negrea pour l'assistance technique accordée dans la grotte.

Le travail a été réalisé dans le cadre du projet de recherche Grant ID-2325, financé par le Conseil national de la recherche scientifique dans l'enseignement supérieur (CNCSIS).

BIBLIOGRAPHIE

- ANDRIEUX, C., *Contribution à l'étude du climat des cavités naturelles des massifs karstiques. IV. – Influence de la morphologie des galeries, de la forme et de l'orientation des ouvertures sur le climat souterrain.* Ann. Spéléol., **XXVI** (1), 5–30, 1971.
- JEANNEL, R., & RACOVITZA, E., *Énumération des grottes visitées, 1918–1927 (7-ème série).* Arch. Zool. exp. gén., **68**, (2), 293–608, 1929.
- ONAC, B.P., RACOVITĂ, Gh. & BRAD, T. (eds.), *Atlasul peșterilor din România. I. Bazinul Arieșului Mare.* Ed. Todesco, Cluj-Napoca, 96 p., 2010.
- RACOVITĂ, Gh., *La classification topo-climatiques des cavités souterraines.* Trav. Inst. Spéol. «E. Racovitza», **XIV**, p. 197–216, 1975.
- RACOVITĂ, Gh., *Sur la structure méroclimatique des cavités souterraines.* Theor. Appl. Karstol., **1**, 123–130, 1984.
- RACOVITĂ, Gh. & CRĂCIUN, V. *Note sur le topo-climat de la grotte de Fața Apei.* Trav. Inst. Spéol. «E. Racovitza», **XX**, 1981, 157–178.
- RACOVITĂ, Gh. & ONAC, B.P., *Scărișoara Glacier Cave. Monographic study.* Edit. Carpatica, Cluj-Napoca, 139 p., 2000.
- RACOVITĂ, Gh., ONAC, B.P., FEIER, Ioana & MENICHETTI, M., *Étude thermométrique de la Grotte des Ours de Chișcău (Roumanie). Résultats préliminaires.* Trav. Inst. Spéol. «E. Racovitza», **XLI–XLII**, 177–190, 2002–2003.
- RUȘDEA, Evelin, *Étude topo-climatique de la grotte Ghețarul de la Vârtope (Monts du Bihor).* Theor. Appl. Karstol., **2**, 131–140, 1985.

Institut de Spéologie «Émile Racovitza» de l'Académie Roumaine
Département de Cluj-Napoca
Str. Clinicilor nr. 5, 400006 Cluj-Napoca, Roumanie
daniela.borda@hasdeu.ubbcluj.ro