MENSURATION INDIRECTE DE L'EAU DE CONDENSATION DE DEUX GROTTES DES MONTS MEHEDINȚI (CARPATES MÉRIDIONALES). IMPLICATIONS ÉCOLOGIQUES DE LA CONDENSATION ENDOKARSTIQUE

PAR

V. DECU, W. HERDLICKA et N. SUCIU

La note comprend les résultats de l'estimation indirecte de l'eau de condensation (sur plaques de verre) de la Peștera (grotte) Cloșani et la Peștera-aven (grotte-aven) din Cioaca cu Brebenei, dans l'intervalle novembre 1979 — août 1980. On a étudié la dépendance de la quantité d'eau condensée par rapport à la distance de l'entrée des cavités karstiques, de même que, la corrélation avec la pression et l'humidité relative de l'air, ainsi que la corrélation avec la différence de température entre l'air et le substratum. On présente, également, certaines implications écologiques de l'eau de condensation endokarstique.

I. INTRODUCTION

La condensation est le processus physique du passage du contenu de l'eau dans l'atmosphère, de l'état de vapeur, à l'état liquide.

Ce sont trois facteurs dont dépend l'existence du phénomène de condensation dans le souterrain, à savoir :

— fissuration de la roche, qui permet la pénétration de l'air à l'intérieur du massif karstique ;

— le régime thermique, qui détermine la circulation de l'air par la différence de température entre l'intérieur du massif et son extérieur ;

— l'état hygrométrique des courants d'air.

Les conditions nécessaires pour le début du processus de la condensation dans le karst, consistent en la sursaturation (la tension des vapeurs d'eau doit être plus grande que la tension de l'équilibre qui correspond à la température de l'air) et en l'existence de la phase liquide ou des noyaux de condensation. Dans les cavités karstiques, la condensation a lieu en prédominance sur les parois (la seconde condition est accomplie) et la sursaturation est réalisée par le refroidissement de l'air turbulent ou moléculaire, à la suite de l'échange de chaleur entre les parois et l'air.

La quantité d'eau de condensation qui prend naissance sur les parois des fissures et des cavités souterraines résulte du jeu aléatoire de multiples détails locaux : forme, texture, localisation topographique des parois « condensants », tectonique générale des massifs, variations topographiques et chronologiques de la température motivant cette condensation, taux hygrométrique de l'air « matière première », vitesse des circulations atmosphériques souterraines, etc. (Ginet, Decou, 1977).

Trav. Inst. Spéol. « Emile Racovitza », t. XXI, p. 43—52, Bucarest, 1982

On a enregistré (ou calculé) jusqu'à présent en différentes régions karstiques, des quantités variées d'eau condensée : 5 cm^3/m^2, par jour, (hiver), dans la grotte-laboratoire de Hautecourt (Jura français) ; 7,8 cm^3/m^2, par jour (l'été), dans le Gheţarul de la Scărişoara (Monts Apuseni) ; 20 1/sec. (l'été) dans le réseau de la Dent de Crolles (Grande-Chartreuse), etc. Outre de tels cas favorables, lorsqu'à certains moments de l'année l'eau de condensation constitue une source réelle d'eau souterrains, dans le reste elle ne doit cependant intervenir que localement et de manière assez précaire. « La condensation semble être plus un facteur de régulation du régime hydrologique karstique, qu'un mécanisme d'alimentation actif des circulations d'eau souterraine ; elle est susceptible d'amortir des baisses temporaires de l'humidité hypogée, tout en étant capable d'empêcher que certains réseaux hydrographiques souterrains ne s'assèchent totalement lors de longues périodes sans pluie : c'est à ce double titre que la condensation souterraine a un indéniable intérêt biologique, et qu'elle a été ici mentionnée» (G i n e t, D e c o u, 1977).

*

Les méthodes utilisées dans la mensuration de l'intensité du processus de condensation endokarstique dans les grottes, ont été fondées, tout spécialement, sur l'estimation du volume de l'eau condensée sur un substratum métallique. Par exemple, A n d r i e u x (1968) a utilisé une grille de 400 cm^2 divisée en 25 carrés, sur lesquels il a mesuré les gouttes déposées, tout en leur établissant leur diamètre. Puis, en calculant, il a obtenu le volume d'eau condensée. Ginet (1977) dans la grotte—laboratoire de Hautecourt s'est servi de « condensomètres » en tôle d'aluminium à surface de 1 m^2, disposés parallèlement à 3 cm de distance chacun. V i e h m a n n et R a c o v i ţ ă (sous presse) ont utilisé un cône métallique dans le Gheţarul de la Scărişoara.

On a fait également usage d'une méthode par laquelle on a estimé la quantité d'eau condensée, en pesant certains matériaux poreux (comme par exemple des plaques de lumachelle) avant et après une période de temps, durant laquelle elles ont été suspendues dans des cavités souterraines.

En nous rapportant aux méthodes ci-dessus envisagées, nous devons faire une remarque, à savoir : *dans tous les cas on n'a pas mesuré l'eau de condensation atmosphérique, ni celle pariétale, mais on a induit un phénomène de condensation sur différents substratums.*

II. LA MÉTHODE UTILISÉE DANS LA PEŞTERA CLOŞANI ET LA PEŞTERA-AVEN DIN CIOACA CU BREBENEI

En l'occurence dans ces deux grottes on a utilisé des « condensomètres » en plaques de verre, à dimensions de 30/16/0,6 cm, par paires (3 cm distance), montées au-dessus de récipients collecteurs (fig. 1). On a aussi installé des récipients collecteurs démunis de plaques de verre, et des morceaux de fils de fer (utilisés pour l'assemblage des parties componentes des condensomètres), pour pouvoir ainsi éliminer l'eau qui se produit hors des plaques de verre.

Tous les condensomètres ont été protégés contre l'eau d'égouttement du plafond par des plaques de polystyrène disposées en plan incliné. Les mensurations ont été faites à des intervalles de 20 à 30 jours et elles ont consisté en :

— mensuration de la quantité d'eau condensée et suintant dans le vase collecteur ;

— appréciation de l'état d'humectage des plaques de verre (respectivement sèches /a/, humides /b/, à grosses gouttes /c/, à suintement et gouttes /d/) et de la surface affectée ;

— mensuration de la température, de la pression et de l'humidité de l'air du voisinage des condensomètres ;

— mensuration de la température des plaques de verre et des parois des cavités karstiques, à l'aide des thermomètres installés à 5 cm de profondeur dans les deux substratums.

Les condensomètres ont été placés dans deux cavités karstiques (P. Cloșani et P. –- av. din Cioaca cu Brebenei), qui possèdent des morphologies et, implicitement, des conditions spéoclimatiques différentes.

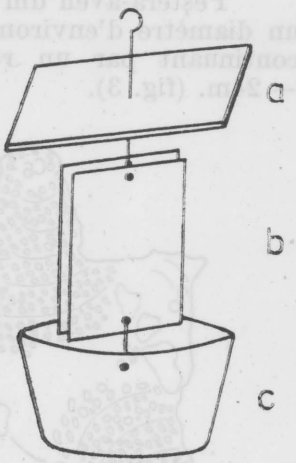

Fig. 1. Schéma d'un condensomètre ; a — plaque de protection (polystyrene) b — plaques de verre ; c — récipient colecteur.

Peștera Cloșani est formée de deux galeries horizontales fossiles, finissant en cul-de-sac (« Galeria Laboratoarelor »/galerie des laboratoires/ et la « Galeria M. Ghica »/galerie M. Ghica/) qui partent au niveau de la même entrée de petites dimensions (2/1,5 m) et qui, à 15 m et, respectivement à 25 m de l'entrée, présentent un seuil négatif (fig. 2).

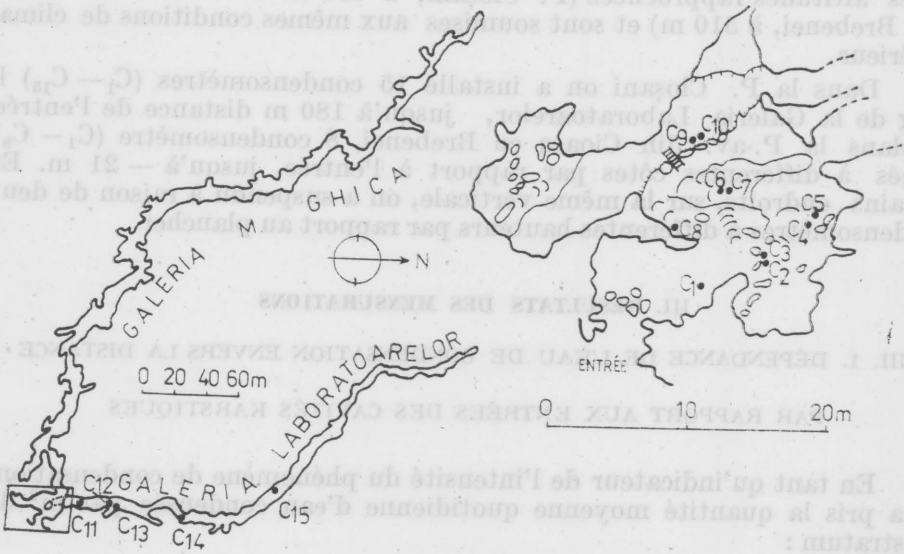

Fig. 2. Emplacement des condensomètres (C_1—C_{15}) dans la P. Cloșani.

Peştera-aven din Cioaca cu Brebenei, a une entrée circulaire, avec un diamètre d'environ 1 m, ensuite une descente verticale de 6 m se continuant par un rétrécissement en une salle qui descend jusqu'à — 24m. (fig. 3).

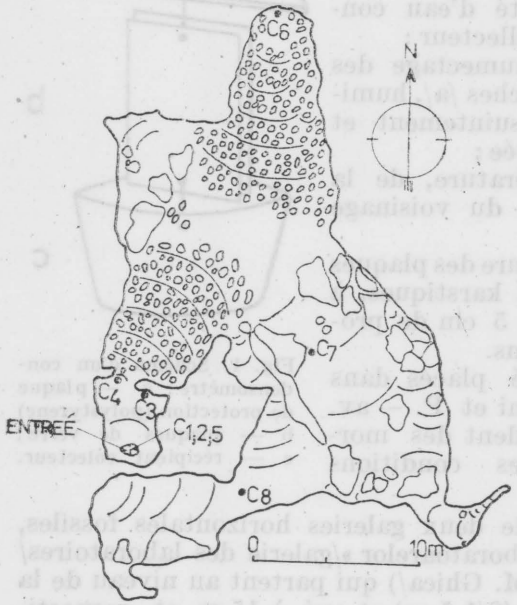

Fig. 3. Emplacement des condensomètres (C_1—C_8) dans la P.-av. din Cioaca cu Brebenei.

Les deux grottes sont situées dans la même zone (Cornetul Satului à des altitudes rapprochées (P. Cloşani, à 450 m et P.-av. din Cioaca cu Brebenei, à 510 m) et sont soumises aux mêmes conditions de climat extérieur.

Dans la P. Cloşani on a installé 15 condensomètres (C_1 — C_{15}) le long de la Galeria Laboratoarelor, jusqu'à 180 m distance de l'entrée, et dans la P.-av. din Cioaca cu Brebenei, 8 condensomètre (C_1 — C_8), placés à différentes côtes par rapport à l'entrée, jusqu'à — 21 m. En certains endroits, sur la même verticale, on a suspendu à raison de deux condensomètres à différentes hauteurs par rapport au plancher.

III. RÉSULTATS DES MENSURATIONS

III. 1. DÉPENDANCE DE L'EAU DE CONDENSATION ENVERS LA DISTANCE PAR RAPPORT AUX ENTRÉES DES CAVITÉS KARSTIQUES

En tant qu'indicateur de l'intensité du phénomène de condensation, on a pris la quantité moyenne quotidienne d'eau condensée par m^2 de substratum :

$$y(ml/m^2.jour)$$

On a étudié la dépendance par rapport à la distance (longueur quant à la P. Cloşani et dénivellation dans le cas de la P.-av. din Cioaca cu Brebenei) à partir des entrées des deux cavités karstiques, de la quantité moyenne quotidienne, pour la période novembre 1979 — août 1980. Puisque les données se groupent autour de certaines droites sur papier logarithmique et semi-logarithmique, on a cherché des dépendances exponentielles ou des puissances : $y = ae^{bx}$ ou $y = ax^b$; x(m) = distance en mètres.

Après le nivellement (transformation en relations linéaires) des formules de plus haut, on a calculé les paramètres *a* et *b* par la méthode des plus petits carrés. On a choisi la formule pour laquelle la somme des carrés des erreurs des points mesurés de ceux calculés, est plus petite. On a obtenu, ainsi, pour la Galeria Laboratoarelor (Tableau 1, fig. 4) :

$$y = .66{,}7 \times e^{-0.1x}$$

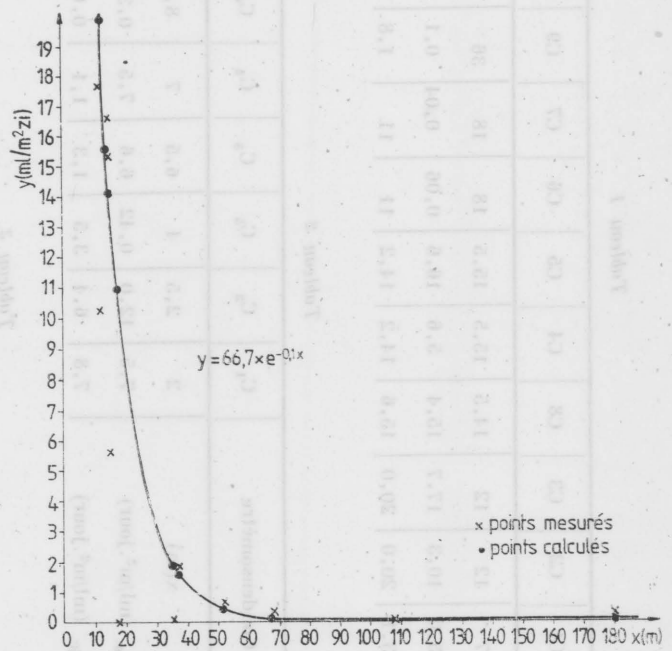

Fig. 4. Dépendance de la quantité de l'eau de condensation envers la distance (longueur) par rapport à l'entrée de la P. Cloşani.

Par conséquent, *y* diminue exponentiellement avec la distance à partir de l'entrée de la grotte.*

Pour P.-av. din Cioaca cu Brebenei (Tableau 2, fig. 5) on a de même une dépendance exponentielle, mais plus atténuée :

$$y = 17{,}5 \times e^{-0.4x}$$

* Les erreurs dans le cas des condensomètres C_2 et C_4 s'expliquent par leur emplacement hors du courant d'air prédominant.

Tableau 1

Condensomètre	C1	C2	C3	C8	C4	C5	C6	C7	C9	C10	C11	C12	C13	C14	C15
x(m)	7	12	12	14,5	15,5	15,5	18	18	36	37	52	67	68	109	180
$y_{mes.}$ (ml/m².jour)	35,0	10,3	17,7	15,4	5,6	16,6	0,06	0,04	0,1	1,9	0,7	0,06	0,25	0,02	0,14
$y_{calc.}$ (ml/m².jour)	33,1	20,0	20,0	15,6	14,2	14,2	11	11	1,8	1,6	0,4	0,02	0,07	0,001	10^{-3}

Tableau 2

Condensomètre	C_1	C_2	C_5	C_3	C_4	C_6	C_7	C_8
x(m)	2	2,5	4	6,5	7	8,5	11	21
$y_{mes.}$ (ml/m².jour)	7,5	12,0	0,42	6,6	7,5	0,3	0,06	0,46
$y_{calc.}$ (ml/m².jour)	7,8	6,4	3,5	1,3	1,1	0,6	0,2	

Tableau 3

Dates des mensurations	IX'79	X'79	XII'79	I'80	II'80	III'80	IV'80	V'80	VII'80	VIII'80
y(ml/m².jour)	2,2	1,8	0,5	0,0	1,3	0,0	0,9	2,0	6,0	1,7
$\varphi = (Ta - Tv)$ (°C)	0,25	0,35	0,45	0,0	0,20	—0,25	—0,25	0,25	0,65	0,70
$\theta = (Ta - Tp)$ (°C)	0,6	1,0	0,65	0,2	0,5	0,4	0,2	0,15	0,18	0,05

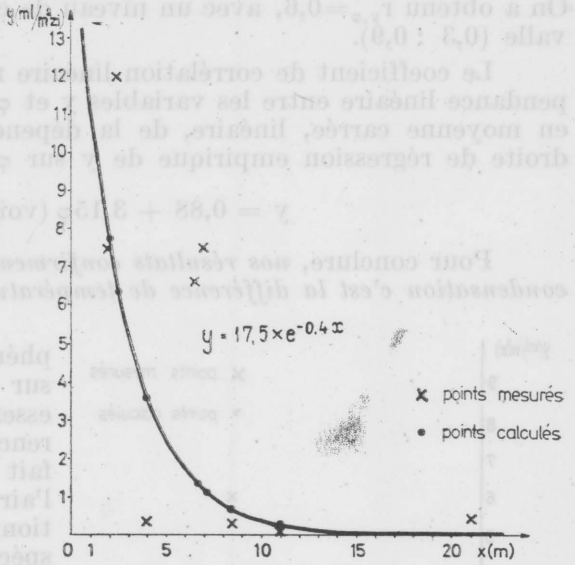

Fig. 5. Dépendance de la quantité de l'eau de condensation envers la distance (dénivellation) par rapport à l'entrée, de la P.-av. din Cioaca cu Brebenei.

III.2. ANALYSE DE CORRÉLATION

Pour l'étude de la dépendance entre l'eau de condensation (y) et les paramètres du microclimat de la cavité karstique (pression, humidité et température de l'air) on a calculé les coefficients de corrélation respectifs en les comparant avec les valeurs critiques pour différents niveaux de confiance, en vue d'accepter ou de repousser l'hypothèse sur la corrélation des grandeurs respectives.

La corrélation avec la pression de l'air, n'est pas significative; la condensation ne se produit pas par compression.

La corrélation avec l'humidité relative de l'air, est de même non-significative; les variations de l'humidité ne déterminent pas d'appreciables modifications du phénomène de condensation. (Dans le cas de la P.-av. din Cioaca cu Brebenei, les corrélations sont encore plus non-significatives, à cause du petit nombre de mensurations).

La corrélation avec la différence de température entre l'air et le substratum, est la seule qui soit significative. Elle n'a été calculée que pour C_{10} (Galeria Laboratoarelor, P. Cloşani), car au point respectif le microclimat est plus stable et les moyennes des mensurations faites estiment assez bien les moyennes mensuelles.

On a calculé le coefficient de corrélation empirique : $r_{y,\varphi}$, où l'on a noté par $\varphi = Ta - Tv$, la différence entre la température de l'air et le verre du condensomètre. Vu que y mesuré représente la moyenne de la quantité d'eau condensée dans l'intervalle entre deux mensurations, les valeurs qui correspondent à φ ont été de même tenues comme moyennes sur l'intervalle (la moyenne des mensurations des extrémités de l'intervalle (Tableau 3).

On a obtenu $r_{y,\varphi}=0,6$, avec un niveau de confiance de 90% dans l'intervalle (0,3 : 0,9).

Le coefficient de corrélation linéaire $r_{y,\varphi}$ est une mesure de la dépendance linéaire entre les variables y et φ. La meilleure approximation en moyenne carrée, linéaire, de la dépendance $y(\varphi)$, est donné par la droite de régression empirique de y sur φ :

$$y = 0,88 + 3,15\varphi \text{ (voir fig. 6)}$$

Pour conclure, *nos résultats confirment que le facteur principal de la condensation c'est la différence de température entre l'air et le substratum.*

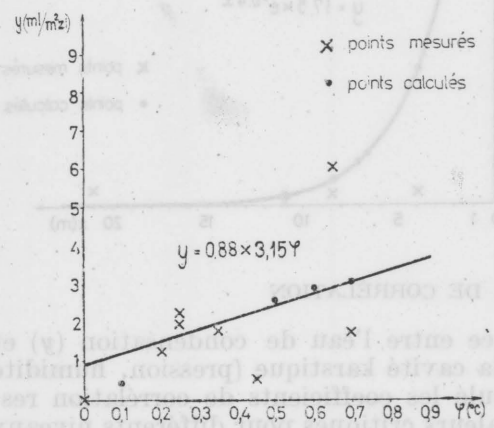

Fig. 6. Corrélation entre la quantité de l'eau condensée et la différence de température entre l'air et le substratum.

Si nous supposons que le phénomène de la condensation sur les parois de calcaire est, en essence, le même, la seule différence étant la manière dont se fait l'échange de chaleur entre l'air et la paroi (échange conditionné par la masse, la chaleur spécifique de la paroi de calcaire et le flux de chaleur reçu de l'extérieur), alors, en remplaçant φ par $\theta = Ta - Tp$ (différence de température entre l'air et la paroi), on peut obtenir une estimation de la quantité d'eau condensée pendant une année, sur 1 m^2 de paroi, dans la zone du condensomètre C_{10}. En procédant de la sorte, on obtient le résultat suivant :

$$Y_{paroi} = 842,4 \text{ ml/m}^2;\ Y_{paroi} > Y_{verre}\ (Y_{verre} = 745,0 \text{ ml/m}^2)$$

Par conséquent il faut s'attendre à ce que la condensation soit plus intense sur les parois de calcaire et, par suite, que l'eau de condensation soit significative pour la réserve d'eau du karst.

IV. IMPLICATIONS ÉCOLOGIQUES DE LA CONDENSATION ENDOKARSTIQUE

Les massifs de calcaire reçoivent l'air et l'eau par une multitude de fissures, cavités et microcavités, plus ou moins profondes. Au moment où leurs parois se refroidissent, elles peuvent devenir de véritables condenseurs si un air plus chaud les baigne.

Dans une cavité souterraine, entre deux parois ou entre celles-ci et le plancher, il existe des différences de température et, en conséquence, des conditions pour que des courants de convexion locaux se forment. A la surface des parois et du plancher (qui peuvent être ou non

de la roche corrodée, de la calcite ou de l'argile — substratums dont le comportement diffère par rapport à la condensation ou à l'évaporation), sur les parties humides (soumises au phénomène de condensation) ou sur celles seches (soumises à l'évaporation), prennent naissance des microclimats différents. La localisation de ces parties (humides ou seches) a une dynamique qui dépend de la morphologie des grottes et de la saison (le sens d'échange des courants d'air entre la cavité souterraine et l'extérieur). Cette dynamique est des plus apparente dans les zones vestibulaires des grottes horizontales dont les entrées sont relativement grandes et la circulation des courants bidirectionnelle.

Dans le cas des parois, les parties seches sont délimitées de celles humides par une ligne oblique, descendante (vers l'intérieur) l'hiver et ascendante l'été. Cette ligne de séparation entre les deux parties, représente en fait une zone de mélange des deux courants (exogène et endgène) ayant une étendue différente, en fonction de la morphologie des grottes et de la saison. La zone est très fréquentée par divers espèces cavernicoles (la plupart étant des éléments subtroglophiles estivantes ou hivernantes) dont certaines d'entre elles se placent, suivant leur préférence, sous l'influence du courant exogène, tandis que d'autres, sous celui endogène (voir M o t a ş, D e c o u, B u r g h e l e, 1967 ; G i n e t, D e c o u, 1977 ; D e c o u, H e r d l i c k a, 1978).

S'il s'agit des planchers de la zone vestibulaire, le phénomène de la condensation prend une grande importance pendant l'été, dans les périodes de sécheresse pour la faune édaphique et hémiédaphique qui se concentre à la base des parois, dans les crevasses entre le sol argileux (très hygroscopique) et la roche, à la surface desquelles la condensation peut avoir lieu.

Le phénomène de condensation est de même important pour la faune hypogée qui peuple les autres milieux souterrains, comme par exemple, le réseau de fissures et le réseau de microespaces, localisés à l'intérieur, et respectivement, au-dessus des calcaires.

Mais la condensation endokarstique n'est pas importante seulement pour la survie pendant les périodes de sécheresse et la distribution spatiale de la faune hypogée (qui ne peut vivre que dans une atmosphère très humide), mais aussi bien pour le développement de la végétation sur les calcaires et spécialement pour celle qui croît sur les calcaires dénudés.

On sait que dû à la fissuration de la masse des calcaires, les eaux de précipitation s'infiltrent, l'infiltration étant directement proportionnelle au degré de karstification des massifs. L'existence de la fissuration provoque l'annulation de l'écoulement à la surface des calcaires, ce qui donne naissance à des zones étendues endorhéiques, caractérisées par une aridité prononcée. Mais dans la fissuration (y compris les plus petites fissures du lapiaz) dans laquelle des courants de convexion locaux peuvent se former, peut se produire de l'eau de condensation (T r o m b e, 1952). Celle-ci peut, partiellement, compenser les pertes d'eau des horizons supérieurs des masses de calcaire karstifié. Le développement d'arbres sur des calcaires dénudés (et particulièrement sur des abrupts) ne peut avoir d'explication que si l'on admet la production de l'eau de condensation dans leur masse.

V. CONCLUSIONS

— Dans toutes les expériences faites jusqu'à présent dans les grottes, en vue de déterminer les quantités d'eau de condensation, on n-a pas mesuré effectivement l'eau de condensation atmosphérique ou pariétale, mais on a induit un phénomène de condensation sur différents substratums (tôle de fer, tôle d'aluminium, fil de fer, verre).

— Dans les deux grottes où ont été effectuées les mensurations (P.Cloşani et. P-av. din Cioaca cu Brebenei) la condensation diminue exponentiellement avec la distance à partir des entrées des deux cavités souterraines.

— La corrélation entre le phénomène de condensation et la différence de température entre l'air et le substratum est significative ; les corrélations avec la pression et l'humidité relative de l'air ne sont pas significatives.

— Dans le cas d'un des 15 condensomètres (C_{10}) de la Galeria Laboratoarelor (P. Cloşani), placée dans une zone à microclimat plus stable, on a calculé la valeur de 745,0 ml eau de condensation/m^2 de verre, au cours d'une année. En considérant que le phénomène de condensation sur les parois de calcaire est en essence le même, la seule différence étant une autre manière d'échange de chaleur entre l'air et la paroi, on peut estimer que sur un mètre carré de calcaire se produit une plus grande quantité d'eau de condensation que sur un mètre carré de verre, pendant une année : 842,4 ml. Cette quantité est significative pour la réserve d'eau du karst.

— Le phénomène de la condensation endokarstique est importante non seulement comme source d'eau souterraine, mais également pour la survie durant les périodes de sécheresse et la distribution spatiale de la faune de divers milieux hypogés. Il est de même très important pour le développement de la végétation sur les calcaires, spécialement pour ceux dénudés.

BIBLIOGRAPHIE

1970 ANDRIEUX C., *Evapocondensation souterraine*. Ann. Spéléol., **25**, *3*.
1978 DECOU V., HERDLICKA W., *Recherches écologiques dans les grottes des Monts Mehedinți (Carpates Méridionales)*. Trav. Inst. Spéol. « Emile Racovitza », **XVII**.
DECU V., DONIȚĂ, N., HERDLICKA W., LASCU C., *Aspecte ale problemei conservării ecosistèmelor forestiere și subterane din zonele carstice*. Pontus euxinus, **2** (sous presse).
1977 GINET R., DECOU V., *Initiation à la biologie et à l'écologie souterraines*. Paris.
1967 MOTAȘ C., DECOU V., BURGHELE A., *Sur l'association pariétale des grottes d'Oltènie (Roumanie)*. Ann. Spéléol., **22**, *3*.
1975 RACOVIȚĂ GH., *La classification topoclimatique des cavités souterraines*. Trav. Inst. Spéol. « Emile Racovitza », **XIV**.
RACOVIȚĂ GH., HERDLICKA W., SUCIU N., *Factorii abiotici*, in : « Fauna cavernicolă a României », vol. I. (sous presse).
1974 RUMȘISKI L. Z., *Prelucrarea matematică a datelor experimentale*. București.
1952 TROMBE F., *Traité de Spéléologie*. Paris.

Institut de Spéologie « Emile Racovitza »
Bucarest
Reçu le 27 février 1982