SUR LE RÔLE DE LA CONDENSATION SOUTERRAINE DANS LA GENÈSE DES STALAGMITES DE GLACE

PAR

GHEORGHE RACOVIȚĂ et IOSIF VIEHMANN

L'analyse détaillée des facteurs qui peuvent intervenir dans le développement des stalagmites de glace de la grotte glacière de *Scărișoara* mène à la conclusion que la condensation n'est qu'un élément secondaire, ces formations étant alimentées surtout par percolation. On déduit également que la très stricte localisation des champs de stalagmites est due en premier lieu aux gradients souterrains de température et, probablement, à des particularités microtectoniques de la voûte.

Au cours des deux dernières décennies, de nombreux travaux ont pris en discussion les très complexes problèmes que pose la présence des formations de glace pérenne dans la bien connue grotte glacière de *Scărișoara* (Monts Bihor), en essayant d'élucider surtout les mécanismes qui président à la dynamique de ces formations. Parmi ces problèmes, d'une grande importance est celui de l'origine de l'eau d'égouttement, sur le compte de laquelle prennent naissance les stalagmites de glace et dont le rôle dans le développement de celles-ci à été déjà précisé (Gh. Racoviță, I. Viehmann, 1966, M. Șerban, 1970).

Théoriquement, l'eau d'égouttement ne peut provenir que de deux sources : soit de la percolation — ce qui est classique —, soit de la condensation, et l'existence dans la grotte d'un phénomène de condensation suffisamment intense pour être susceptible de participer à la genèse des stalagmites de glace a été récemment démontrée (Gh. Racoviță, I. Viehmann, 1984).

Le fait majeur sur lequel s'appuie l'hypothèse que l'eau de condensation peut intervenir dans la constitution des stalagmites de glace réside dans le groupement de celles-ci dans des champs bien délimités et ayant une position topographique nettement définie à l'intérieur de la cavité (M. Șerban, D. Coman, R. Givulescu, 1948, Gh. Racoviță, V. Crăciun, 1970). En effet, ces champs se trouvent à une certaine distance par rapport au bloc de glace qui correspond à l'épicentre de la glaciation de caverne, dans chacune des trois salles qui s'ouvrent sur les côtés de ce bloc, c'est-à-dire l'Eglise, la Petite Réserve et la Grande Réserve (fig. 1), et cette distance est d'autant plus grande que la salle en question est plus spacieuse. En outre, l'observation montre que la fréquence d'égouttement de l'eau d'alimentation des stalagmites de glace est elle aussi directement proportionnelle aux dimensions des salles. On pourra donc logiquement supposer que l'emplacement si exact des champs de stalagmites est déterminé par la position qu'occupent les zones où la condensation atteint son maximum d'intensité.

Il faut pourtant mentionner que cet emplacement peut avoir aussi une cause d'ordre thermique, car il apparaît que la glace de caverne ne se développe sous forme de stalagmites que dans un domaine bien défini

Trav. Inst. Spéol. « Emile Racovitza », t. XXIII, p. 89—97, Bucarest, 1984

de température (Gh. Racoviță, V. Crăciun, 1970). Il s'ensuit que, dans les conditions spécifiques des gradients de température de la grotte de *Scărișoara*, gradients dont l'amplitude augmente justement pendant la période hivernale de développement des formations de glace Gh. Racoviță, 1967), ce domaine n'est atteint qu'à une certaine

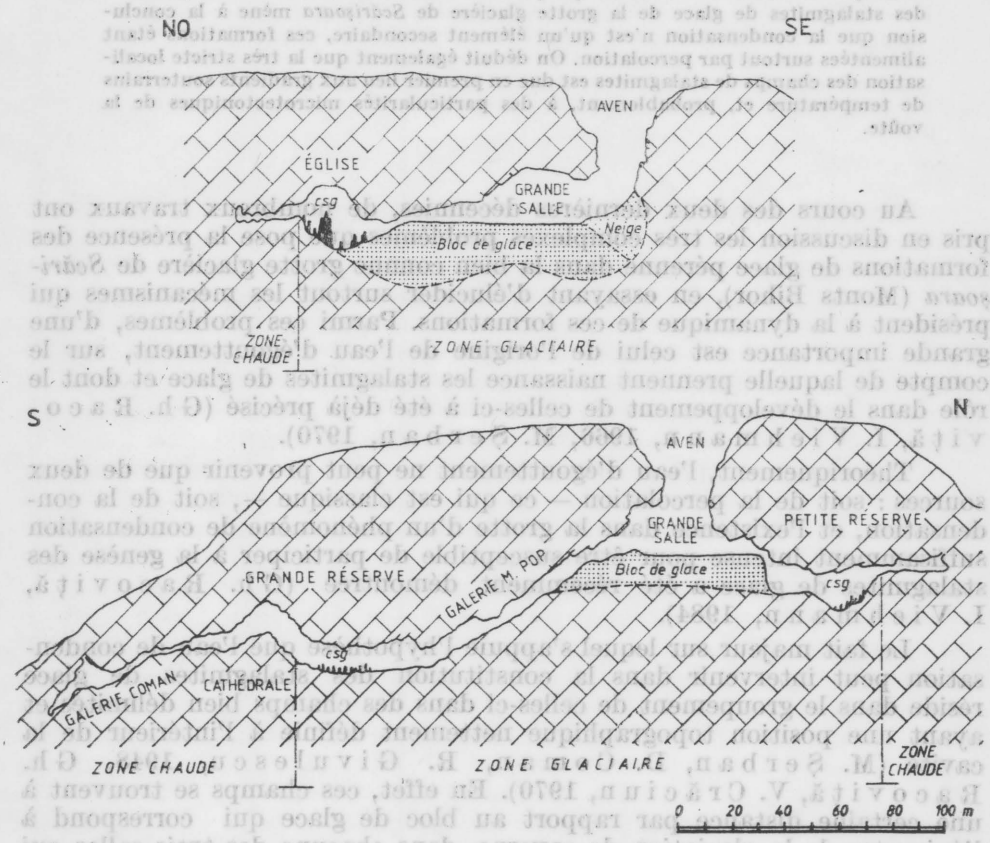

Fig. 1. — Coupes longitudinales de la grotte de *Scărișoara*, montrant l'emplacement des champs de stalagmites de glace (*csg*) par rapport à la topographie de la surface karstique.

distance de l'épicentre de la glaciation de caverne. Comme cette distance est évidemment proportionnelle à la longueur totale de chacune des trois salles, elle sera minimum dans l'Eglise et maximum dans la Grande Réserve (fig. 1).

Il y a ici lieu de faire une précision. A l'encontre de l'Eglise, dans les deux Réserves les champs de stalagmites sont séparés du bloc de glace par un espace dans lequel la glace n'apparaît que sous forme de croûtes ou, au plus, de quelques massifs stalagmitiques isolés. Cette particularité de la distribution spatiale des types morphologiques de la glace est due au fait que, dans les secteurs en question, la voûte de la grotte

arrive à geler pendant l'hiver, tout apport d'eau (qu'elle soit de percolation ou de condensation) étant ainsi supprimé (M. Şerban, 1970). Ce phénomène ne peut pas avoir lieu dans l'Eglise parce que la voûte forme ici une coupole bine marquée, qui permet la constitution d'une grande poche d'air chaud. Les champs de stalagmites de glace des deux Réserves ne peuvent donc être homologués d'une manière stricte qu'avec le groupement de stalagmites du fond de l'Eglise. Quant aux grands massifs stalagmitiques qui en occupent la partie centrale, ils devraient se retrouver dans les deux Réserves aussi, entre le bloc de glace et les champs de stalagmites, mais ils en font défaut justement à cause du fait que la voûte gèle ici pendant l'hiver.

Les précisions qu'on pourra faire au sujet des facteurs qui président à la localisation des champs de stalagmites de glace et,implicitement, au sujet de l'origine de l'eau d'alimentation de ces formations, doivent faire appel aux données expérimentales. Ainsi que nous l'avons mentionné, l'étude de la condensation souterraine de la grotte de *Scărișoara* a fait l'objet d'un travail antérieur (Gh. Racoviță, I. Viehmann, 1984). Ce travail se base sur deux séries de mesures, dont la plus longue couvre l'intervalle avril 1965 — janvier 1967. Nous allons donc prendre en considération en ce qui suit le même intervalle pour essayer de définir l'origine de l'eau d'alimentation des stalagmites de glace.

Les données obtenues à la suite des mesures effectuées mensuellement sur la fréquence d'égouttement de plusieurs stalagmites de glace de chacune des trois salles (tab. 1) confirment en premier lieu les diffé-

Tableau 1

Fréquence d'égouttement des stalagmites de glace et valeurs des facteurs déterminants

Date	Fréquence d'égouttement[1]			Condensation Grande Réserve [2]	Précipitations (mm/mois	Température externe (°C)[3]
	Eglise	Petite Réserve	Grande Réserve			
III 1965	95	37	242	—	48,2	−0,5
IV	67	97	328	68	60,4	1,8
V	0	57	52	61	101,9	7,2
VI	100	135	1050	62	93,5	11,9
VII	0	30	16	53	61,0	13,7
IX	0	19	17	60	18,5	12,4
X	0	2	3	61	9,2	5,6
XI	10	2	70	88	87,0	0,2
I 1966	0	9	56	100	67,8	−6,1
II	33	49	343	77	32,9	1,7
III	0	38	146	84	90,5	−1,6
IV	94	38	146	76	105,7	5,8
V	0	12	27	76	102,9	8,5
VI	22	39	55	60	142,4	10,6
VII	0	29	33	64	140,6	13,6
IX	0	40	51	66	49,4	9,5
XI	33	38	122	88	79,9	2,0
I 1967	0	26	40	156	74,2	−6,4

[1] Nombre moyen de gouttes/10 minutes, déterminé pour 3 stalagmites de glace de l'Eglise, 4 stalagmites pour la Petite Réserve et 6 stalagmites pour la Grande Réserve.
[2] Valeurs obtenues par mesures condensométriques (en $cm^3/m^2/48$ heures).
[3] Valeurs moyennes mensuelles.

rences dont nous avons parlé au sujet de la quantité d'eau d'alimentation. Mais les valeurs moyennes de 25, 39 et, respectivement, 215 gouttes par 10 minutes ne se montrent significativement différentes (en calculant le paramètre *t*) (M. Steinbach, 1961) que dans la comparaison entre la Grande Réserve et les deux autres salles, et non pas dans celle entre l'Eglise et la Petite Réserve aussi. Malgré ce manque de signification statistique, la Petite Réserve se fait pourtant remarquée par une plus grande constance dans le rythme d'égouttement car, sur un intervalle de 18 mois, les stalagmites de glace y ont été actives en permanence, tandis que celles de l'Eglise n'ont reçu de l'eau d'alimentation que 8 mois seulement (tab. 1). Ce premier résultat pourra donc apparaître comme un fait qui renforce la présomption que les stalagmites sont alimentées par condensation.

La conclusion est pourtant bien différente si on compare les fréquences d'égouttement de l'Eglise, de la Petite Réserve et de la Grande Réserve d'une part entre elles et d'autre part avec la distribution des précipitations atmosphériques et de la température moyenne mensuelle de l'extérieur au cours de la période prise en considération (fig. 2)[1]. On constate d'abord qu'il y a un parallélisme assez net entre les variations que la fréquence d'égouttement présente dans chacune des trois salles. On observe ensuite, surtout dans la Grande Réserve, que cette fréquence comprend plusieurs maximums, dont certains sont évidemment dûs à la fonte des neiges (ceux du mois d'avril et du mois de février 1966, quand la température moyenne mensuelle a été d'une façon anormale positive). En éliminant ces valeurs, ainsi que celles des mois d'hiver (quand la couche de neige rend dès le début impossible toute influence des précipitations sur la percolation), et en comparant la fréquence moyenne d'égouttement calculée pour les trois salles avec la quantité mensuelle de précipitation (fig. 3), on arrive à la conclusion qu'entre les deux séries de grandeurs il y a une correspondance directe, surtout pendant la période de 1965. Cette conclusion pourra être théoriquement vérifiée par le calcul du coefficient de corrélation. Il est pourtant évident qu'un tel calcul ne peut pas aboutir à un résultat satisfaisant, parce que les données concernant la fréquence d'égouttement sont obtenues par une seule mesure mensuelle et, par conséquent, elles ne sont pas entièrement équivalentes aux précipitations mensuelles, qui représentent des grandeurs cumulées.

Quant à la comparaison de la fréquence d'égouttement avec l'intensité de la condensation, le problème est bien plus simple. Tel que nous l'avons démontré (Gh. Racoviță, I. Viehmann, 1984), la quantité d'eau formée par condensation le long de la branche ascendante de la ventilation bidirectionnelle de la grotte présente une variation saisonnière évidente, avec augmentation significative au cours de l'hiver, et cette variation n'a aucune liaison avec le caractère aléatoire de la fréquence d'égouttement de la Grande Réserve (tab. 1, fig. 2, A).

En rassemblant les faits, c'est-à-dire l'intensification très accentuée de la fréquence d'égouttement au cours de la fonte des neiges, le parallé-

[1] Les données concernant les précipitations et la température mensuelle ont été fournies par la station météorologique de *Băișoara*, qui se trouve à une distance à vol d'oiseau de seulement 45 km de la grotte de *Scărișoara*.

lisme existant en régime estival entre cette fréquence et les précipitations atmosphériques et le manque de corrélation avec la variation saisonnière de la condensation, on aboutit forcément à la conclusion que l'eau d'alimentation des stalagmites de glace tire son origine à la percolation.

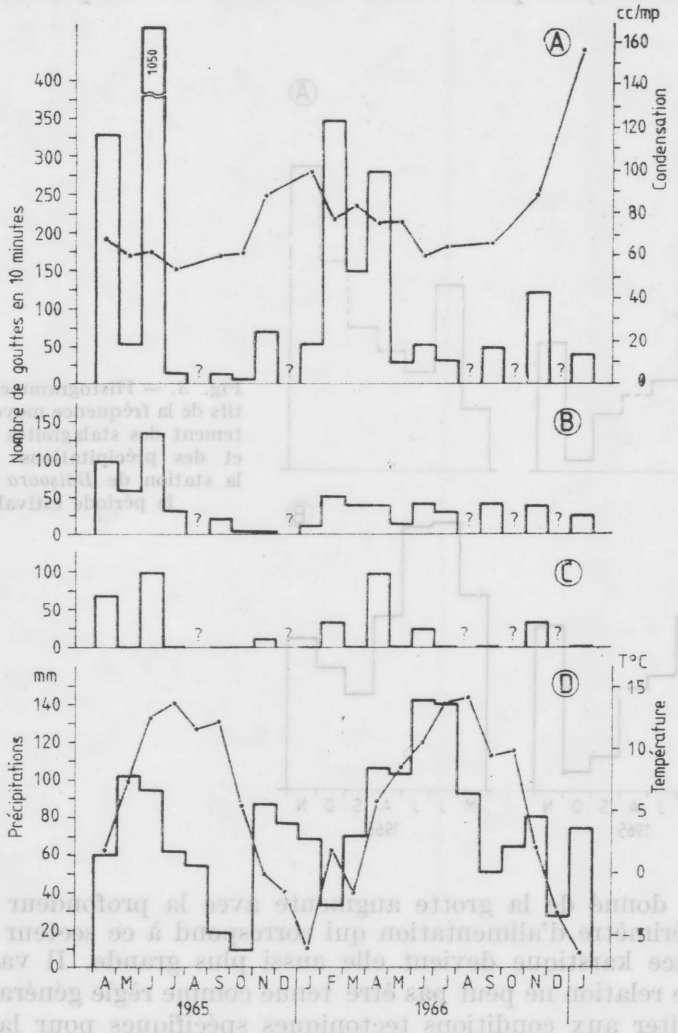

Fig. 2. — Histogrammes des variations de la fréquence d'égouttement des stalagmites de glace de la Grande Réserve (A), de la Petite Réserve (B) et de l'Eglise (C), en comparaison avec l'intensité de la condensation dans la Grande Réserve, ainsi qu'avec les précipitations mensuelles et la température moyenne mensuelle à la station météorologique de *Băişoara* (D).

S'il en est ainsi, il nous reste à expliquer les différences qui existent entre la fréquence d'égouttement caractéristique pour chacune des trois salles (tab. 1). Ces différences sont directement proportionnelles non seu-

lement aux dimensions des salles, mais aussi à l'épaisseur de la couche calcaire qui les couvre au niveau des champs de stalagmites de glace (fig. 1) et qui est d'environ 40 m pour l'Eglise, 54 m pour la PetiteRéserve et 77 m pour la Grande Réserve. On peut supposer que la fréquence d'égouttement, respectivement l'intensité de la percolation dans

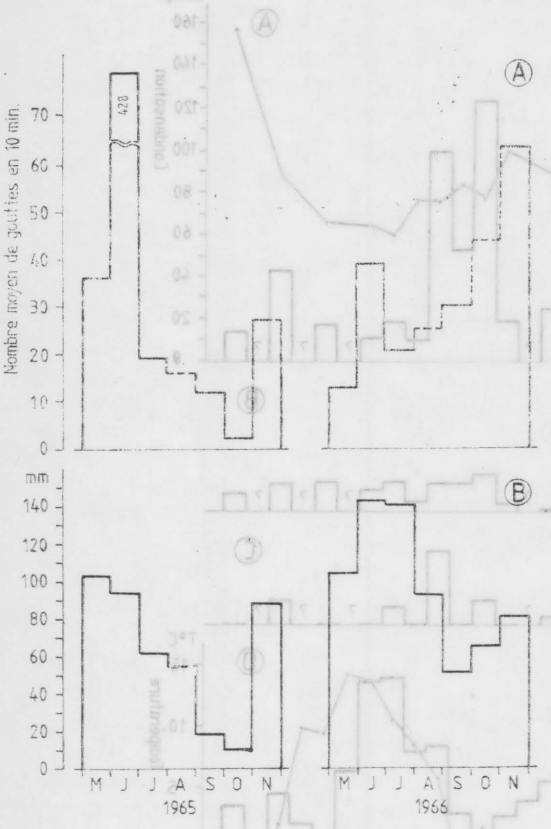

Fig. 3. — Histogrammes comparatifs de la fréquence moyenne d'égouttement des stalagmites de glace (A) et des précipitations mensuelles à la station de *Băișoara* au cours de la période estivale (B).

un secteur donné de la grotte augmente avec la profondeur parce que l'aire du périmètre d'alimentation qui correspond à ce secteur au niveau de la surface karstique devient elle aussi plus grande. Il va sans dire qu'une telle relation ne peut pas être tenue comme règle générale et qu'on doit la limiter aux conditions tectoniques spécifiques pour la grotte de *Scărișoara*.

En ce qui concerne le déterminisme de la localisation des champs de stalagmites, on doit le lier aux effets du gradient de température qui, tel que nous l'avons vu, limite le domaine thermique optimal dans lequel la glace de caverne se développe sous forme de stalagmites à un secteur donné de chacune des trois salles de la grotte. Il est pourtant possible qu'à ces effets s'ajoutent des particularités microtectoniques de la voûte, car au-dessus des champs de stalagmites de glace de la Grande et de la

Petite Réserve, le nombre des stalactites calcitiques est beaucoup plus grand que dans les zones avoisinantes.

Mais le problème n'est pas par cela résolu.

Des mesures journalières faites sur la fréquence d'égouttement de deux stalagmites de glace de la Grande Réserve pendant deux semaines, en février 1965, ont montré que celle-ci est sujet d'une variation lente, en diminuant au début et en augmentant ensuite progressivement, dans la seconde partie de l'intervalle (tab. 2); c'est surtout la stalagmite notée

Tableau 2

Fréquence d'égouttement de deux stalagmites de glace et valeurs théoriques de la condensation dans la Grande Réserve.

Date	Fréquence d'égouttemet		Condensation (g/cm)	
	Stalagmite A	Stalagmite B	valeurs brutes	moyennes mobiles (p =5)
13 II 1965	2′09″	2′28″	3,96	
14 II	2′09″	2′31″	3,33	
15 II	2′08″	2′32″	3,02	3,27
16 II	2′10″	2′37″	3,02	3,23
17 II	2′10″	2′42″	3,02	3,33
18 II	2′10″	2′45″	3,75	3,44
19 II	2, 10′	2′43″	3,85	3,32
20 II	2′10″	2′40″	3,55	3,43
21 II	2′09″	2′38″	2,44	3,58
22 II	2′08″	2′38″	3,54	3,62
23 II	2′08″	2′33″	4,51	3,68
24 II	2′08″	2′30″	4,07	4,12
25 II	2′02″	2′31″	3,86	
26 II	2′06″	2′31″	4,60	

par *B* qui met plus clairement en évidence une telle variation. Notons encore que les deux colonnes de glace étaient placées à la limite distale du champ de stalagmites, en faisant partie du groupe de formations dénommées « thermoindicatrices » (I. Viehmann, Gh. Racoviță, 1968).

Etant donné que ces mesures datent d'une période durant laquelle la température extérieure s'est maintenue en permanence à des valeurs négatives et que, par conséquent, il n'y a pas pu être question d'une fonte de la neige, nous avons essayé de mettre en corrélation la variation de la fréquence d'égouttement avec celle de la condensation souterraine. Malheureusement, on ne dispose pas de mesures directes sur la condensation pour cet intervalle de temps, ce qui nous oblige à faire usage du calcul pour déterminer les valeurs théoriques de ce processus. Mais, tel que nous l'avons démontré (Gh. Racoviță, I. Viehmann, 1984), le calcul donne des résultats parfaitement comparables à ceux obtenus par mesure, de sorte que cette procédure est tout à fait justifiée.

En première approximation, les valeurs théoriques de la condensation, établies à partir des mesures thermohygrométriques qui donnent le contenu en vapeurs d'eau de l'atmosphère souterraine et, par la suite, le pouvoir de condensation de celle-ci (Gh. Racoviță, 1975), ne mon-

trent aucune corrélation avec la fréquence d'égouttement. En substituant la suite de ces valeurs par leurs moyennes mobiles et en la décalant avec un avance de deux jours par rapport à la courbe de la fréquence d'égouttement, on obtient pourtant une corrélation significative à un seuil de 1 % (fig. 4). La motivation de ces opérations est la suivante :

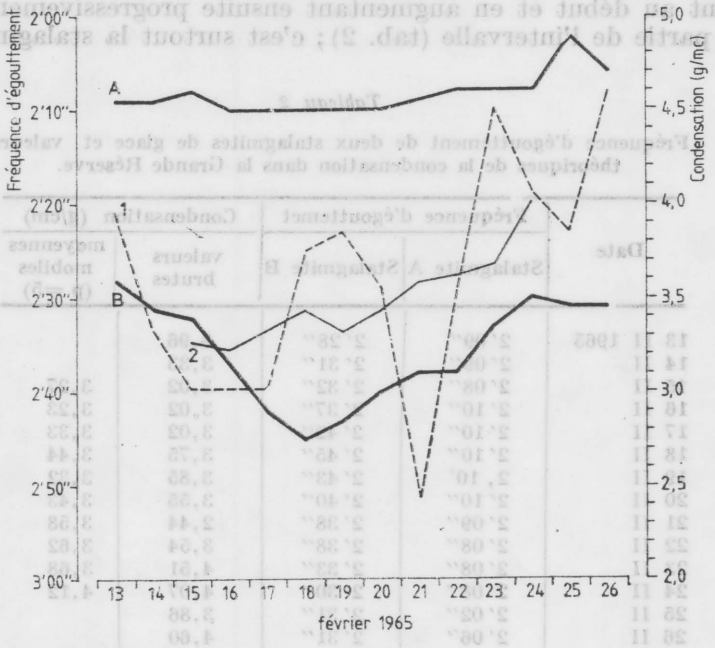

Fig. 4. — Variation de la fréquence d'égouttement de deux stalagmites de glace de la Grande Réserve (A et B) et de l'intensité de la condensation (1 = valeurs brutes ; 2 = moyennes mobiles).

Les moyennes mobiles s'obtiennent en remplaçant chaque membre de la série des valeurs brutes avec la moyenne arithmétique d'un groupe (période) de ces valeurs, dont celle en question occupe la position centrale (M. S t e i n b a c h, 1961). On arrive ainsi à éliminer les variations secondaires du processus et de mettre en évidence sa tendance majeure. Dans notre cas, cela est équivalent à la supposition que — tout en admettant que les stalagmites de glace sont alimentées par condensation — la fréquence d'égouttement ne réagit pas aux changements de détail de l'intensité de ce phénomène, ce qui est tout à fait vraisemblable. Quant au décalage de deux jours il correspond au temps qui doit être nécessaire pour qu'une variation dans l'intensité de la condensation arrive à produire une variation analogue dans la fréquence d'égouttement, et l'existence d'un tel « temps de réaction » est tout aussi vraisemblable.

Par conséquent, pour expliquer la variation journalière de la fréquence d'égouttement dans le cas de ces stalagmites, nous pouvons accepter que l'eau d'alimentation qu'elles reçoivent provient de la condensa-

tion. Cette interprétation trouve une vérification dans la relation quantitative qui existe entre les valeurs absolues de la condensation et de la fréquence d'égouttement. En effet, les mesures effectuées à l'aide du condensomètre montrent que la quantité maximum d'eau formée par condensation au niveau de la voûte est de 78 $cm^3/m^2/24$ heures, soit 0,54 $cm^3/m^2/10'$. D'autre part, plusieurs déterminations faites dans la Grande Réserve donnent un volume moyen de 12 $cm^3/100$ gouttes. On peut aussi admettre, étant donné la densité générale des stalagmites de glace, qu'à chaque formation revient 1 m^2 de voûte. Une stalagmite recevra donc 0,54 cm^3 d'eau de condensation en 10 minutes, ce qui correspond à une fréquence théorique de 4,5 gouttes/10 ou d'une goutte à 2' 13", valeur qui est comprise dans le même domaine que les résultats des mesures effectuées dans la grotte (tab. 2).

La conclusion finale qui s'en détache est que, dans les conditions spécifiques de la grotte glacière de *Scărișoara*, l'eau de condensation participe à l'alimentation des stalagmites de glace, mais non pas d'une façon dominante, de sorte qu'elle ne peut pas être tenue comme responsable de leur localisation spatiale. Ces formations reçoivent en premier lieu de l'eau de percolation et l'emplacement des champs qu'elles constituent est déterminé surtout par le gradient de température.

BIBLIOGRAPHIE

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

1975 RACOVIȚĂ, GH., *La classification topoclimatique des cavités souterraines*. Trav. Inst. Spéol. « E. Racovitza », **XIV**, 197–216.

1970 RACOVIȚĂ, GH., CRĂCIUN, V., *Considérations sur la variation saisonnière des formations de glace de la grotte « Gheţarul de la Scărișoara »*. Livre du Centenaire « E. Racovitza », Ed. Acad. R. S. R., Bucarest, p. 587–616.

1966 RACOVIȚĂ, GH., VIEHMANN, I., *Observaţii asupra dinamicii stalagmitelor de gheaţă din Gheţarul de la Scărișoara — Sala Biserica*. Lucr. Inst. Speol. « E. Racoviţă », **V**, 43–65.

1984 RACOVIȚĂ, GH., VIEHMANN, I., *Etude de l'évapocondensation souterraine dans une grotte glacière*. II^e^ Symp. Karstologie théorique et appliquée, Bucarest, 1984 (sous presse).

1961 STEINBACH, M., *Prelucrarea statistică în medicină și biologie*. Ed. Acad. R.P.R., București, 342 pp.

1970 ȘERBAN, M., *Morphologie comparée des stalagmites de glace de la grotte de Scărișoara (Roumanie)*. Trav. Inst. Spéol. « E. Racovitza », **IX**, 35–60.

1948 ȘERBAN, M., COMAN, D., GIVULESCU, R., *Découvertes récentes et observations sur la glacière naturelle dite « Gheţarul de la Scărișoara »*. Bull. Soc. Sc. Cluj, **X**, 174–210.

1968 VIEHMANN, I., RACOVIȚĂ, GH., *Stalagmite de gheaţă termoindicatoare*. Dări de Seamă ale Ședinţelor Inst. Geol., București, 54, *1*, 353–363.

Institut de Spéologie « E. Racovitza »
Section de Cluj-Napoca

Reçu le 20 février 1984