

# Annales de Spéléologie

EXTRAIT

Revue trimestrielle

Tome 30 - Fascicule 2 - 1975

## ASPECTS DE L'INFLUENCE DES TOURISTES SUR LES MICROCLIMATS DE LA GROTTÉ DE REMOUCHAMPS,

par Bernadette MERENNE-SCHOUMAKER (1)

### Résumé.

On a tenté de mesurer l'influence des touristes sur la température et la teneur en  $\text{CO}_2$  de la grotte de Remouchamps. On a d'abord recherché les variations indépendantes des visiteurs, puis on a effectué des séries d'observations dans la partie climatiquement stable du site. Une action réelle des touristes est démontrée ; elle peut être décomposée en deux influences : une instantanée et une plus longue. L'amplitude des différentes augmentations est aussi précisée.

### Abstract.

This paper deals with the measure of the tourists' influence on the temperature and the  $\text{CO}_2$  rate in the Remouchamps cave. The variations, independent from the visitors, were first determined and then observations were carried out in the climatically stable part of the site. It is proved that the tourists have an actual influence which can be split into two effects : an immediate one and a more lasting one. The various amplitudes of these effects are given.

\*  
\*\*

La majorité des spécialistes des milieux souterrains ayant toujours cherché à étudier les conditions climatiques des grottes en l'absence de toute influence humaine, c'est sans aucun doute Lascaux qui a révélé avec une acuité particulière le rôle perturbateur des visiteurs dans une grotte (2). La voie s'ouvrirait ainsi à de nouvelles recherches. Toutefois, malgré le temps écoulé, ces dernières sont encore limitées (3).

Aussi avons-nous imaginé d'aborder ce problème dans un site belge, la grotte de Remouchamps, dont l'importance touristique va croissant (100 000 visiteurs en 1970 et 160 000 en 1973).

Notre travail a été essentiellement conditionné par les *instruments* que nous avons pu utiliser.

Dans un premier temps, nous avons placé dans la grotte des *appareils enregistreurs* (quatre thermo-

hygraphes et deux thermographes), préalablement testés pendant cinq semaines dans une cave humide de l'Université (4). Ces appareils ont ensuite été placés dans la grotte, où ils ont d'abord fonctionné cinq semaines (du 10 mars au 14 avril 1972), puis à nouveau deux semaines (du 19 mai au 2 juin 1972) et enfin une semaine en juillet (du 21 au 27). Malgré le soin apporté aux réglages préliminaires, l'emploi de ces appareils n'a pas conduit aux résultats escomptés.

---

(2) Voir à ce propos : H. DE SAINT-BLANQUAT (1967) et B. GÈZE (1965), p. 144 et 186.

(3) Comme nous l'a confirmé le Professeur B. GÈZE du Laboratoire de Géologie de l'Institut National Agronomique (Paris) à qui nous avons soumis l'idée de cette étude.

(4) Milieu choisi de préférence à d'autres afin de se placer dans les conditions climatiques les plus voisines possibles de la grotte.

(1) *Séminaire de Géographie, Université de Liège, 7 place du XX Août, Liège, Belgique.*

Cet article est le résultat d'un travail présenté comme thèse annexe en vue de l'obtention du grade de docteur en Sciences Géographiques (avril 1974).

En effet, les instruments n'avaient pas la finesse voulue pour enregistrer de très faibles variations et, de plus, un court séjour dans la grotte provoqua un dérèglement plus ou moins rapide. On se heurtait ainsi à un des problèmes majeurs de la climatologie souterraine, celui des instruments (5).

En raison de tels résultats, il fut décidé de recourir à d'autres appareils, non enregistreurs (*un thermomètre électronique à thermistance et un CO<sub>2</sub> mètre*) et d'effectuer des mesures certains jours bien définis. Ne pouvant disposer d'un instrument précis pour mesurer l'humidité (notamment d'un psychromètre) (6), les observations furent donc limitées aux températures et à la teneur en gaz carbonique.

Le thermomètre électronique à thermistance utilisé a été conçu et réalisé par J. GODISSART. Son principe est le suivant : un pont de Wheatstone, où est inséré le capteur, attaque un amplificateur opérationnel TAA 521 servant d'indicateur de zéro. L'appareil permet des mesures à distance (à plus de 10 m). Sa précision atteint 0,01°C et, comparé au thermomètre classique à mercure, il possède l'avantage d'une très faible inertie (7). Expérimenté les 21 et 22 mai 1972 (dimanche et lundi de la Pentecôte), ce thermomètre a été effectivement employé à quatre reprises : le

23 juillet 1972, le 19 août 1972 et les 6 et 14 janvier 1973.

Le CO<sub>2</sub> mètre utilisé n'est, par contre, pas un appareil nouveau. Employé par les agronomes et les pédologues pour l'analyse de l'air du sol, il fut expérimenté sous terre à diverses reprises par C. EK (8). Choisi en raison de son côté pratique (tout l'appareillage est contenu dans un coffret portatif pesant une quinzaine de kg), il permet de mesurer la teneur en CO<sub>2</sub>, grâce au titrage électrolytique du CO<sub>2</sub> d'un volume connu d'air absorbé par une solution 0,1 N de NaCl, avec une erreur de mesure de l'ordre de 0,1 mg/l (9). Au total, 49 mesures ont été effectuées à cinq reprises : les 21 et 23 juillet 1972, le 19 août 1972 et les 6 et 14 janvier 1973.

Tous les emplacements des mesures ont été reportés sur la figure 1.

D'un autre côté, comme les conditions climatiques de la grotte en l'absence des touristes n'étaient que partiellement connues, nous avons décidé de réaliser des observations à la fois en saison touristique et en dehors de la saison afin de tenter d'*isoler les influences touristiques des autres variations*. Dès lors, la présentation des résultats tient compte aussi de cette dualité.

## 1. — OBSERVATIONS EN MATIÈRE DE TEMPÉRATURE.

### 1.1. — VARIATIONS INDÉPENDANTES DES TOURISTES : LES DEUX GRANDS SECTEURS THERMIQUES DE LA GROTTÉ.

De la confrontation des résultats fournis par les appareils enregistreurs placés successivement, au moins pendant deux semaines, à six endroits différents de la grotte et dans un abri extérieur (local des guides près de l'entrée), il résulte l'existence dans la grotte de deux grands secteurs thermiques différents : un premier subissant des variations saisonnières et même journalières, et s'étendant depuis l'entrée jusqu'au Débarcadère, et un second, stable, se trouvant au-delà du Débarcadère.

#### a) Secteur variable.

Si l'on compare l'évolution des températures pendant la semaine du 10 au 17 mars 1972 dans l'abri extérieur et dans la salle d'entrée de la grotte

(figure 2a), on est amené à formuler les remarques suivantes.

Dans l'abri extérieur, les variations diurnes-nocturnes ont d'abord été faibles, puis nettement plus sensibles à partir du mardi 14 mars. De ce jour au vendredi 17 mars, le maximum atteignait 12-13° et était enregistré entre 14 et 16 h alors que le minimum, variant entre 5 et 7°, se produisait entre 6 et 8 h. De plus, l'augmentation diurne était toujours plus rapide que la diminution nocturne.

Dans la salle d'entrée, on retrouve les deux mêmes parties dans l'évolution de la température de la semaine. Cependant, avant le 14 mars, la température a toujours été plus élevée dans la grotte (environ 8°) qu'à l'extérieur (environ 5°) (10). Après le 14, le thermomètre indique seulement les maxima diurnes, plus élevés d'ailleurs le 15 et le 16 qu'à l'extérieur

(5) Ces difficultés ont été très bien analysées par C. ANDRIEUX (1970), p. 452-455, 458-460 et 465-466.

(6) Voir à ce sujet C. ANDRIEUX (1970), ouvr. cit., p. 465-484.

(7) Communication de J. GODISSART.

(8) Certains résultats sont publiés. Voir notamment F. DELECOUR, F. WEISSEN et C. EK (1968) ; C. EK, F. DELECOUR et F. WEISSEN (1968) et C. EK, S. GLEWSKA, L. KASZOWSKI, A. KOBYLECKI, K. OLEKSYNOWA et B. OLEKSYNOWA (1969).

(9) Pour de plus amples informations sur l'appareil et le dosage, on peut consulter C. EK, F. DELECOUR et F. WEISSEN (1978), ouvr. cit., p. 243-249.

(10) Sauf la nuit du 11 au 12 mars où le minimum fut de 2° et celle du 12 au 13 mars : 3°.

# GROTTE DE REMOUCHAMPS

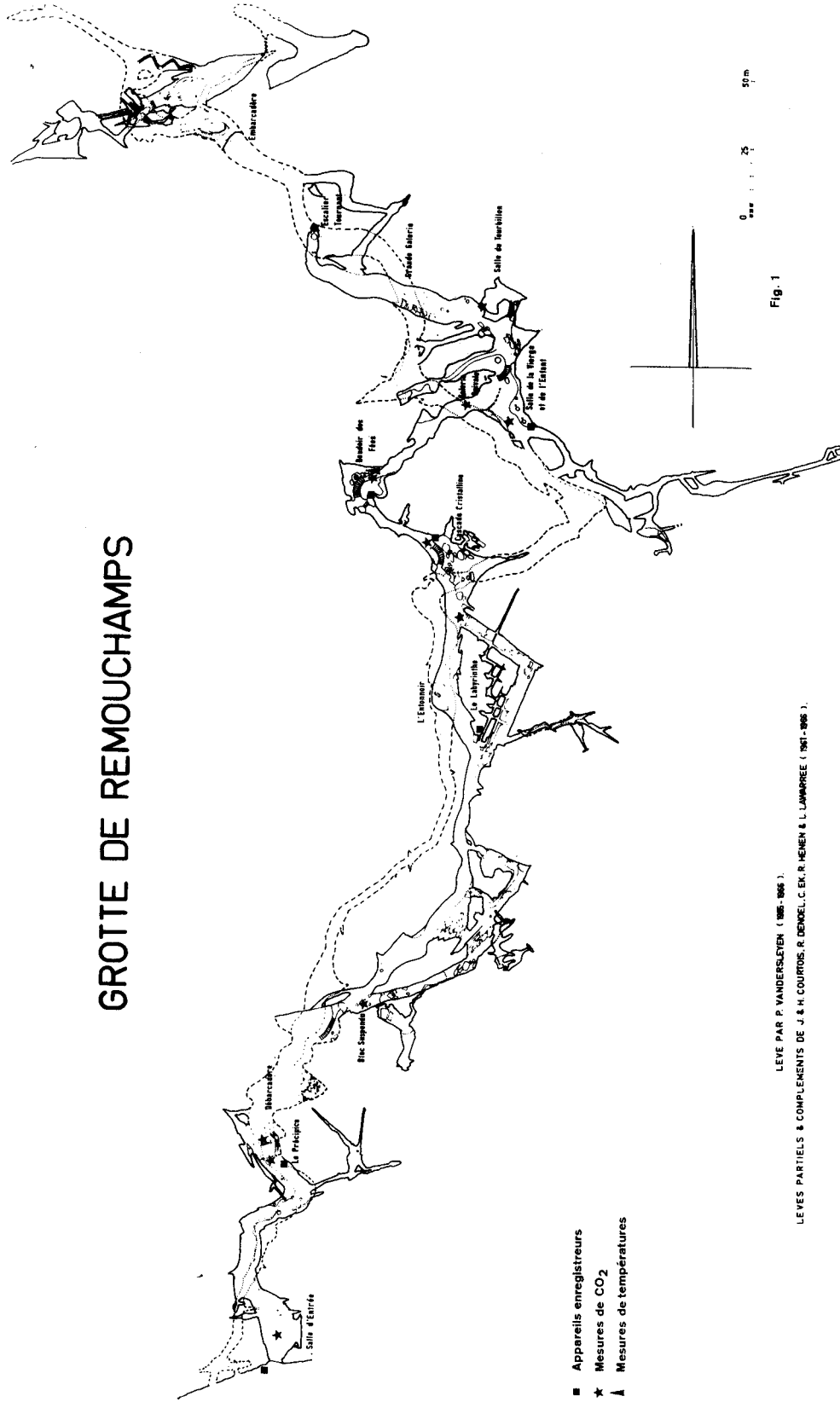


Fig. 1

Fig. 1. — La grotte de Remouchamps et les emplacements des mesures.

(14° contre 12 ou 13°) ; à l'opposé, pendant la nuit, la température se maintient entre 8 et 9° (contre 5 à 7° dans l'abri extérieur).

Les variations des températures dans la salle d'entrée sont donc liées aux variations extérieures. Si la température extérieure est plus froide que la tempé-

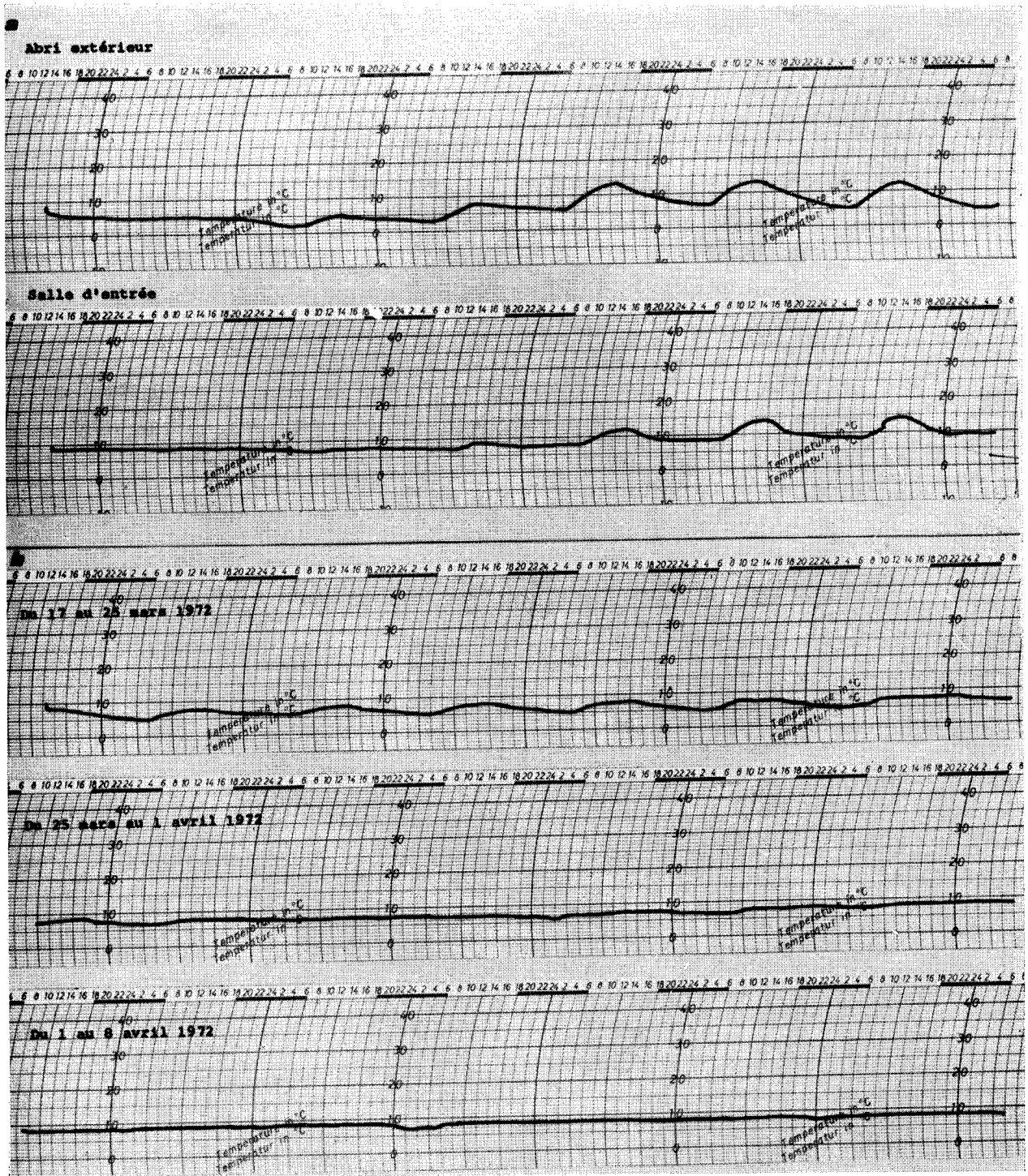


FIG. 2. — Evolution des températures dans le secteur variable de la grotte. 2a : Comparaison entre l'évolution des températures dans l'abri extérieur et dans la salle d'entrée du 10 au 17 mars 1972 ; 2b : Evolution des températures à 10 m en aval du barrage du 17 mars au 8 avril 1972.

rature moyenne de la grotte, fréquemment comprise entre 8 et 10° (11) (cas de la première partie de la semaine et des nuits du 14 au 17 mars), la température de la salle d'entrée reste pratiquement stable et oscille entre 7 et 9°, soit à un niveau voisin de la température moyenne. Par contre, lorsque la température extérieure est plus élevée (cas des journées du 14 au 17 mars), la température de la salle d'entrée augmente également, dépassant celle enregistrée dans l'abri extérieur, en particulier entre 16 et 18 h (12). Ces changements dans la salle d'entrée s'expliquent par l'existence de courants d'air : ceux-ci sont dirigés de l'extérieur vers l'intérieur lorsque la température extérieure est plus élevée que la température moyenne de la grotte et, en sens inverse, lorsque cette dernière température est plus forte.

*Les variations journalières de température sont en réalité sensibles jusqu'au Débarcadère, soit jusqu'à une centaine de m à l'intérieur de la grotte, comme le montrent les relevés d'un thermographe placé à 10 m en aval du barrage (sur le sol, à 1 m du niveau de l'eau), pendant trois semaines consécutives, du 17 mars au 8 avril 1972 (figure 2b). Toutefois, l'amplitude des variations dépend des conditions atmosphériques extérieures (13).*

Ainsi, lorsque le temps est beau et les amplitudes journalières fortes (semaine du 17 au 25 mars), les variations au cours de la journée sont bien visibles, tout en étant moins marquées que dans la salle d'entrée. Néanmoins, pendant le jour, la température reste quasi constante et est comprise entre 7 et 9° ; par contre, pendant la nuit, la température diminue progressivement jusque vers 8 h pour atteindre à ce moment 5 à 6°.

Si les conditions climatiques extérieures sont moins favorables (semaine du 25 mars au 1<sup>er</sup> avril), les variations s'estompent, car le creux nocturne ne se manifeste plus guère.

Enfin, un temps plus humide et plus couvert, caractérisé en outre par des minima nocturnes peu sensibles (semaine du 1<sup>er</sup> au 8 avril), a pour conséquence de réduire encore l'amplitude des variations de telle

sorte que la température reste pratiquement constante.

Contrairement à la salle d'entrée, il existe donc au niveau du barrage un courant d'air dirigé de l'intérieur vers l'extérieur pendant le jour (ce qui explique la palier diurne) et un courant d'air en sens inverse pendant la nuit (ce qui permet de comprendre la diminution nocturne). Cependant, ces courants ne sont manifestes que lorsque la température de l'étage inférieur de la grotte diffère de la température extérieure.

*En conclusion, la région d'entrée de la grotte est le siège de courants d'air favorisés par la configuration de la zone et plus précisément par l'existence de deux passages spacieux, le passage supérieur ou Galerie du Précipice et le passage inférieur emprunté par le ruisseau (14). Ces courants expliquent les variations enregistrées dans ce secteur, variations d'autant plus marquées que les maxima diurnes extérieurs sont élevés, les minima nocturnes très sensibles et la température extérieure différente de la température moyenne de la grotte.*

#### b) Secteur stable.

Si les thermographes placés dans la région d'entrée de la grotte permettent de détecter des variations journalières, d'autres appareils, présentant les mêmes caractéristiques, placés au-delà du Débarcadère, n'indiquent plus aucun écart journalier. Ainsi, les huit semaines de mesure à quatre endroits différents (figure 1) : l'entrée du Petit Labyrinthe, la Cascade Cristalline, le Boudoir des Fées et la Salle de la Vierge et de l'Enfant, soit au total 24 relevés (15), conduisent à une triple conclusion :

- dans la zone prospectée, les variations diurnes-nocturnes sont inférieures à 1°, c'est-à-dire au degré de précision des appareils utilisés (16) ;
- en général, la température est comprise entre 8 et 12°, 10 et 11° étant les valeurs les plus fréquemment observées ;
- de façon plus précise, la température est plus faible à l'entrée du Petit Labyrinthe (en moyenne 9,5°) et dans la Salle de la Vierge et de l'Enfant

(11) C. Ek, Le climat de la grotte dans La grotte de Remouchamps parue à Liège en 1972, p. 44.

(12) La semaine d'observation est sans conteste intéressante car elle est marquée par un changement de temps le 14 mars. En effet, comme en témoignent les maxima et les minima de température enregistrés à Rochefort (station météorologique ayant un site très semblable à Remouchamps), on assiste à un réchauffement sensible à partir du 14, les maxima atteignant 16,8 à 19,9° (contre 3,2 à 10,8 avant cette date) et les minima —1,8 à —3,4° (contre 0,8 à —4,6°) (Source : Institut Royal Météorologique de Belgique (1972), p. 9).

(13) Conditions thermiques extérieures mesurées ici aussi au départ des observations de la station de Rochefort.

(14) L'existence de ces courants avait déjà été relevée précédemment par des chercheurs (Voir C. Ek, Le climat de la grotte, dans La grotte de Remouchamps parue à Liège en 1972, ouvr. cit., p. 44-46). Il s'agit par ailleurs d'un phénomène classique pour les souterrains présentant une différence d'altitude entre leurs orifices (voir F. Trombe, 1952, p. 95-103).

(15) 24 et non 32 en raison du dérèglement de certains appareils pendant les semaines d'observations.

(16) Des thermomètres à maxima ou à minima placés près des appareils enregistreurs ont par ailleurs confirmé ces résultats.

(également 9,5°), légèrement plus élevée au Boudoir des Fées (en moyenne 10°) et plus forte à la Cascade Cristalline, point géométriquement le plus haut des quatre emplacements des mesures (11,5°).

Mise à part la région de l'entrée de la grotte, tout le reste de la section de la galerie supérieure empruntée par les touristes semble appartenir à une zone relativement stable, du moins à l'échelle des mesures hebdomadaires. Si l'on veut isoler au maximum l'influence touristique, il convient donc de choisir de préférence ce secteur stable pour réaliser des mesures plus précises.

## 1.2. — INFLUENCE TOURISTIQUE : LES MESURES AU BOUDOIR DES FÉES.

Cherchant à éliminer au maximum les variations liées à la configuration du lieu d'enquête et à réaliser plusieurs séries de mesures comparables, nous avons décidé de limiter nos investigations à un point bien déterminé : le *Boudoir des Fées*. Le choix de cet endroit découle de deux raisons : d'une part, les relevés des appareils enregistreurs avaient montré que sa température était très voisine de la moyenne du secteur stable et, d'autre part, sa topographie se prêtait très bien à l'installation du thermomètre et au repérage des mouvements des touristes.

En effet, la zone retenue est constituée par un spacieux couloir de 2 à 5 m de large et généralement plus haut que large. Ce couloir comprend en réalité deux parties, une située plus haut où les touristes s'arrêtent généralement face à des concrétions colorées et une autre séparée de la première par un escalier où une halte est aussi prévue afin de pouvoir observer un petit diverticule abondamment concrétionné, dénommé le Boudoir des Fées. C'est à cet endroit que nous avons fixé la sonde.

Comme cela a été dit en introduction, les mesures de température à l'aide du thermomètre électronique à thermistance ont été effectuées à quatre reprises, deux fois en été et deux fois en hiver. Chaque fois, nous avons pris la température dès l'arrivée des touristes à 50 m et nous avons noté dès ce moment les températures toutes les 30 sec. Parallèlement aux mesures, nous avons repéré la position des touristes.

Les résultats de ce travail sont repris sur la figure 3 où l'on a reporté en abscisse le temps et en ordonnée la température. De plus, sur chaque graphique, on trouvera l'indication des deux positions des visiteurs susceptibles d'influencer les mesures :

a = arrêt au-dessus de l'escalier et descente de l'escalier ;

b = passage sous la sonde ou à proximité.

### a) Mesures du 23 juillet 1972.

La sonde avait été fixée horizontalement à une stalactite se trouvant à 2 m du sol et au-dessus du passage des touristes, ce qui permettait de la maintenir du moins partiellement à « l'air libre », c'est-à-dire dans le courant de l'air ascendant expiré par les touristes.

Au début des observations, la température de l'air, relativement stable, oscille entre 11,2° et 11,3°. Un thermomètre à mercure, placé près d'une paroi, indique pour sa part 11,1°. Seuls deux groupes de touristes, soit au total 30 personnes, sont déjà passés à cet endroit depuis l'ouverture de la grotte à 9 h du matin.

Pendant les 18 min des mesures, les effets des deux groupes vont pouvoir être enregistrés : le premier compte 16 personnes et le second 18. Dans les deux cas, la durée de la halte au-dessus et en dessous de l'escalier est la même : 1 min, sauf celle du premier groupe en haut de l'escalier qui dure 1,30 min.

Comme le montre la figure 3a, l'influence du passage des deux groupes est bien nette ; toutefois, elle ne se marque qu'au moment du passage sous la sonde. Chaque fois, l'augmentation de température est très rapide alors que la diminution est beaucoup plus lente : 1/2 min contre 6 à 7. Cette augmentation est de 0,7° pour le premier groupe et de 0,9° pour le second. La diminution est d'abord rapide, puis se ralentit progressivement. La pointe enregistrée lors du passage du second groupe nous semble résulter du passage accidentel d'un touriste à proximité immédiate de la sonde.

### b) Mesures du 19 août 1972.

Pendant l'après-midi de cette journée où près de 1.200 personnes ont visité la grotte, nous avons effectué quatre groupes de mesures :

- de 15 h 25 à 15 h 49, en plaçant la sonde à la même stalactite que le 23 juillet, mais en l'orientant verticalement afin de la maintenir sous la concrétion (figure 3b) (17) ;
- de 15 h 55 à 16 h 17, en remettant la sonde de la même manière que le 23 juillet (figure 3c) ;
- de 16 h 27 à 16 h 38, en localisant la sonde sur une paroi, à 1 m des touristes et à 2 m de haut (figure 3d) ;

(17) Elle se trouve ainsi dans une zone où la présence de la concrétion freine l'ascension de l'air expiré par les touristes.

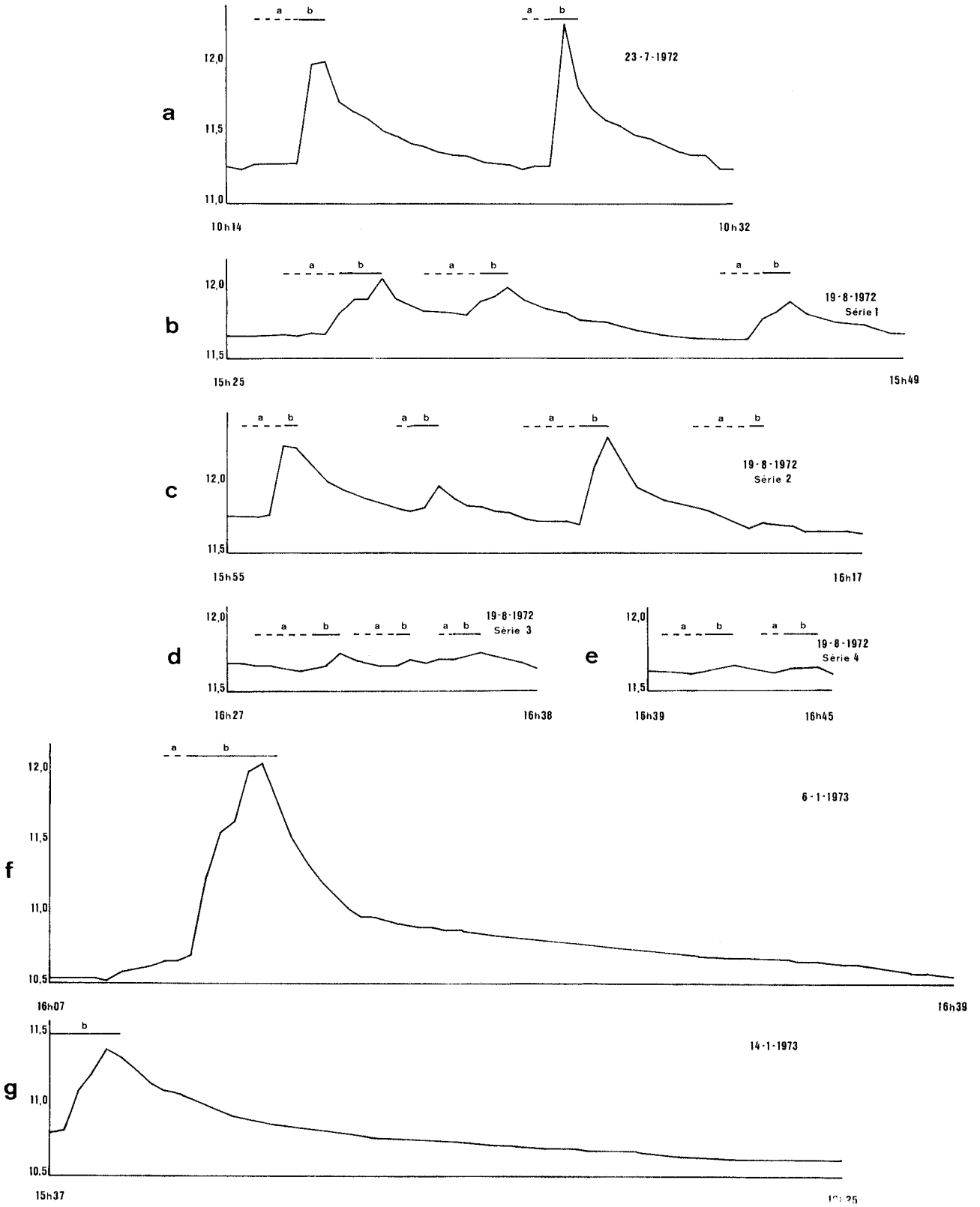


FIG. 3. — Mesures de température au Boudoir des Fées (secteur stable de la grotte). En abscisse, le temps ; en ordonnée, la température. 3a : 23-7-1972 ; 3b : 19-8-1972 Série 1 ; 3c : 19-8-1972 Série 2 ; 3d : 19-8-1972 Série 3 ; 3e : 19-8-1972 Série 4 ; 3f : 6-1-1973 ; 3g : 14-1-1973.



— de 16 h 39 à 16 h 45, en situant la sonde sur une paroi, à 1,50 m des touristes et à 1,20 m du niveau du sol (figure 3e).

Le but de ces quatre séries d'observations était double : réaliser d'abord des mesures comparables à celles du 23 juillet, puis tenter de voir la manière dont les résultats variaient avec la position de la sonde.

Avant le début des mesures, près de 480 personnes étaient déjà passées au Boudoir des Fées. La température de départ était plus élevée qu'en juillet, puisque comprise entre 11,6° et 11,7°.

Pendant la première série d'observations, trois groupes vont se succéder : un de 19 personnes, un deuxième de 15 et un troisième de 19. Les haltes au-dessus de l'escalier durent respectivement 2 min, 2 min et 1,30 min et celles en dessous de la sonde 1,30 min, 1 min et 1 min (figure 3b). Comme en juillet, l'augmentation de température est plus rapide que la diminution. Toutefois, l'augmentation est plus lente et moins forte : elle s'effectue pendant au moins 1,30 min et n'atteint que 1/4°. La diminution est de son côté beaucoup plus régulière, mais ne se produit réellement que si le temps séparant le passage de deux groupes est suffisant, soit environ 7 min.

Durant la deuxième série de mesures, quatre groupes passent sous la sonde ; ils comptent respectivement 22, 21, 22 et 21 personnes. Leurs arrêts au-dessus de l'escalier durent 1,30 min, 0,30 min, 2 min et 2 min et ceux au pied de l'escalier 0,30 min, 1 min, 1 min et 0,30 min (figure 3c). Bien que la sonde soit replacée dans la même position qu'en juillet, les résultats diffèrent quelque peu : l'augmentation est moins nette (seulement 0,5 à 0,6°) et même dans deux cas sur quatre peu ou presque pas sensible. Cependant, contrairement aux résultats précédents, l'accroissement est plus rapide et la diminution va en se ralentissant.

On peut donc conclure, à ce stade des recherches, que l'augmentation de température due au passage des touristes sous la sonde se marque d'autant mieux que la sonde se trouve située à l'« air libre » et que la température de départ est plus faible.

Que faut-il en outre tirer des troisième et quatrième séries d'observations réalisées aussi ce 19 août 1972 et dont les résultats sont repris sur les figures 3d et 3e ? Lorsque la sonde est placée à 1 m des touristes, mais toujours à 2 m de haut, la variation de température maximum enregistrée lors du passage de trois groupes différents est de l'ordre de 1/10° (18). Si la sonde se trouve à 1,50 m des tou-

ristes, l'augmentation de température est encore plus réduite : elle est en effet inférieure à 1/10° (19).

Il semble dès lors logique d'admettre que l'influence des touristes n'est manifeste que jusqu'à 1,50 m de leur passage.

### c) Mesures du 6 janvier 1973.

Les observations réalisées en ce jour d'hiver furent exceptionnelles. En effet, alors que, depuis le 1<sup>er</sup> janvier, le nombre de visiteurs oscillait entre 4 et 19, nous avons eu la chance de pouvoir mesurer les variations de température introduites dans un milieu très stable par un groupe de 87 personnes.

Avant 16 h, seules 10 personnes étaient passées au Boudoir des Fées. Depuis 14 h, le thermomètre électronique indique une température comprise entre 10,5° et 10,6° et le thermomètre à mercure 10,6°. La température est donc plus faible qu'en juillet ou en août. La sonde a été placée comme le 23 juillet 1972, donc à 2 m du sol et à l'« air libre ». Le groupe n'effectue aucun arrêt, mais son passage sous la sonde dure 3 min.

Comme le montre la figure 3f, l'influence du groupe se traduit dès son arrivée à 50 m de la sonde puisque la température s'accroît très lentement de 10,52° à 10,70°, au moment où le premier visiteur passe sous la sonde. Dès cet instant, l'augmentation de température est très rapide : en 2,30 min, la température passe de 10,70° à 12,06° (+ 1,36°). La diminution se fait une nouvelle fois en deux étapes : d'abord une décroissance rapide qui dure 3,30 min et où la température évolue de 12,06° à 10,98° (— 1,08°), puis une décroissance lente qui dure environ 24 min, après laquelle on retrouve une nouvelle stabilité vers 10,53° ; à ce moment, la température de l'air fluctue de nouveau autour de cette valeur. L'influence du passage du groupe est donc très nette et comme dans les cas précédents asymétrique. Elle a même été enregistrée par un thermomètre à mercure qui indiquait à 16 h 18 10,9° alors qu'à 16 h 07 une lecture à ce même thermomètre avait donné 10,6°. La décomposition du phénomène analysé conduit à relever deux étapes : une première de l'ordre de 1° semble correspondre à une influence instantanée tandis qu'une seconde de l'ordre de 1/2° traduit par contre une influence d'ensemble.

### d) Mesures du 14 janvier 1973.

Cette dernière série d'observations réalisée pendant le même mois de janvier 1973 a permis égale-

(18) Ces trois groupes comptaient respectivement 22, 23 et 20 personnes. Leurs arrêts au-dessus et en dessous de l'escalier ont duré 2 min et 1 min, 1,30 min et 0,30 min et 0,30 min et 1 min.

(19) Les observations sont dans ce cas basées sur le passage de deux groupes : un de 18 visiteurs et un de 20 dont les temps d'arrêt au-dessus et en dessous de l'escalier sont de 1,30 min et 1 min et de 1 min et 1 min.

ment d'isoler l'influence du passage d'un groupe (20), groupe toutefois moins important que le précédent, car il ne comptait que 26 personnes.

Malheureusement, en raison de l'annonce très tardive de l'arrivée de ces visiteurs, l'installation des instruments ne fut réalisée qu'en dernière minute ; dès lors, au moment de leur arrivée, le thermomètre n'indiquait pas encore la température réelle du milieu ambiant, mais une température légèrement plus élevée influencée par le placement de la sonde. Nous admettrons donc la température de la fin des observations soit 10,62° comme température de départ.

Le passage du groupe sous la sonde pendant 2,30 min (figure 3g) amène une augmentation de température de 0,78°. La diminution s'opère à nouveau en deux étapes : une rapide conduisant à une perte d'environ 1/2° et une plus lente de l'ordre de 1/4°. Au total, la diminution dure 22 min contre 27 min dans le cas précédent.

A la lumière des mesures des 6 et 14 janvier 1973, on peut donc dire que *l'influence du passage d'un groupe n'est pas proportionnelle au nombre de visi-*

*teurs composant ce groupe, mais semble être la résultante de deux influences qui se superposent : une influence instantanée et une influence d'ensemble, la première étant plus forte que la seconde.*

*En conclusion*, l'influence des touristes sur la température de l'air ambiant est réelle. Cette influence résulte des échanges calorifiques s'effectuant par convection, conduction et rayonnement (21). Le phénomène peut être décomposé en deux influences : l'une est très instantanée et l'autre s'efface moins rapidement. Dans le cas d'un groupe composé de 15 à 25 personnes, la première serait de l'ordre d'un 1/2° et la seconde de 1/4°. Si le groupe est plus important, les deux influences sont plus nettes, mais l'augmentation de température n'est pas proportionnelle au nombre des visiteurs. La variation de température est toujours un phénomène asymétrique, car la croissance est plus rapide que la diminution. De plus, cette variation est moins sensible lorsque la température de départ est plus élevée et est également influencée par le temps de passage du groupe. Enfin, l'influence du groupe est bien visible jusqu'à 1,50 m de ce dernier, mais est plus marquée si la sonde se trouve placée à l'« air libre ».

## 2. — OBSERVATIONS EN MATIÈRE DE TENEUR DE L'AIR EN GAZ CARBONIQUE.

### 2.1. — VARIATIONS INDÉPENDANTES DES TOURISTES : LES MODIFICATIONS DE LA TENEUR EN CO<sub>2</sub> DANS LA GROTTÉ.

La teneur en CO<sub>2</sub> d'une grotte est loin d'être constante. En effet, elle varie avec l'éloignement, la profondeur et surtout la configuration des lieux. En général, les teneurs les plus élevées se rencontrent dans les coins de salle en raison de l'apport de gaz par les fissures et la lenteur de la diffusion dans les recoins peu ventilés. La teneur est, par contre, plus faible dans la masse d'air principale des salles. Des mesures effectuées dans les grottes belges entre mai et juillet 1966 ont montré de telles variations et ont amené les auteurs de ces recherches à conclure que, sauf dans le cas de petites cavités, la teneur de la masse d'air principale variait entre 1 et 2 mg/l, soit 2 à 4 fois plus que la teneur à l'air libre (environ 0,56 mg/l) (22).

14 mesures réalisées le 14 janvier 1973 en quasi-absence des touristes (23), à 1,60 m du niveau du

sol, à 10 endroits différents (24), indiquent combien *la teneur en CO<sub>2</sub> peut varier à l'intérieur de la grotte en saison non touristique*. En effet, les résultats varient de 1,2 mg/l dans la salle d'entrée à 4,4 dans la Grande Galerie. De plus, cette augmentation est loin d'être progressive comme le montre la figure 4, sur laquelle nous avons reporté les teneurs en fonction des distances réelles où elles ont été observées, distances toujours mesurées par rapport à l'entrée de la grotte. Toutefois, on peut repérer trois secteurs différents :

— un premier s'étendant depuis l'entrée jusqu'au Balcon du Précipice où la teneur est comprise entre 1,2 et 1,3 mg/l ; ce secteur correspond à la zone thermique variable décrite plus haut. La teneur en CO<sub>2</sub> bien que réduite est néanmoins deux fois plus forte qu'à l'air libre ;

(21) La convection est le transport de chaleur dû à un transport de matière chaude vers des régions plus froides ; la conduction est le passage direct de chaleur par contact de deux objets à des températures différentes tandis que le rayonnement est l'échange de chaleur sous la forme de radiations émises par l'un quelconque des corps en présence et absorbées, totalement ou partiellement, par les autres (A. HAUTOT, (s.d.), p. 199).

(24) A quatre endroits, deux mesures différentes furent effectuées afin d'opérer un contrôle de la validité des instruments.

(20) Avant ce moment, seules 20 personnes étaient passées au Boudoir des Fées.

(22) C. EK, F. DELECOUR et F. WEISSEN, (1968), *ouvr. cit.*, p. 249-257.

(23) Avant la fin des mesures, 20 personnes seulement avaient visité la grotte.

— un deuxième se situant entre le Débarcadère et le Boudoir des Fées, soit entre 95 et 385 m, où la teneur moyenne varie entre 2,1 et 2,3 mg/l. La teneur plus élevée au Débarcadère (2,7) pourrait s'expliquer par l'influence de l'eau et celle plus réduite à la sortie du Grand Labyrinthe (1,6) par une plus forte aération ;

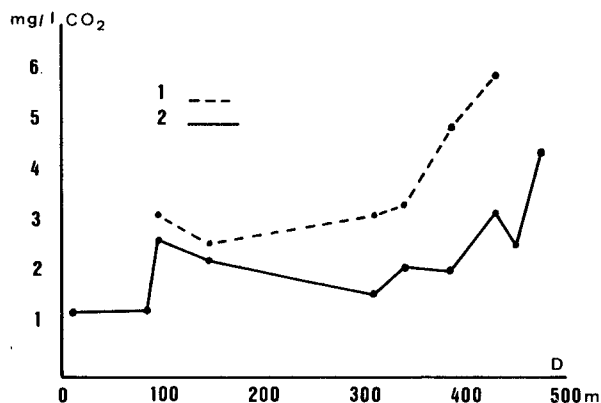


Fig. 4. — Variations de la teneur en CO<sub>2</sub> de l'air de la grotte. En abscisse, les distances à l'entrée de la grotte ; en ordonnée, la teneur en CO<sub>2</sub>. 1 = Mesures du 19-8-1972 ; 2 = Mesures du 14-1-1973.

— un troisième se localisant au-delà du Boudoir des Fées (soit au-delà de 400 m) où les teneurs sont presque toujours supérieures à 3 mg/l, la teneur plus faible dans la salle de la Vierge et de l'Enfant pouvant se justifier par la configuration plus spacieuse de l'endroit.

## 2.2. — INFLUENCE TOURISTIQUE.

### a) Coupe dans la grotte le 19 août 1972.

Nous avons effectué six mesures en six endroits différents, chaque fois à 1,60 m du niveau du sol et entre deux groupes de touristes.

Comme on peut le voir sur la figure 4, les teneurs mesurées sont toujours supérieures à celles enregistrées en hiver. Bien que les observations soient relatives à une zone plus réduite que celle retenue le 14 janvier 1973 (elles ne concernent qu'un secteur s'étendant du Débarcadère à la Galerie Ogivale), elles permettent cependant de retrouver deux parties décelées précédemment, à savoir celle s'étendant du Débarcadère au Boudoir des Fées et celle située au-delà de ce dernier endroit, c'est-à-dire les secteurs 2 et 3 des mesures de janvier. Dans le secteur 2, la teneur moyenne semble comprise entre 3,2 et 3,4 mg/l ; mais, dans le secteur 3, elle atteint et dépasse 5,0 mg/l. Une nouvelle fois, la teneur est plus

réduite sous le Bloc Suspendu qu'au Débarcadère, mais la diminution à la sortie du Grand Labyrinthe n'est plus sensible.

*En haute saison touristique, les teneurs en CO<sub>2</sub> sont donc plus fortes qu'en hiver et l'écart entre les teneurs d'août et de janvier semble aller croissant au fur et à mesure que l'on pénètre plus profondément dans la grotte. Toutefois, l'influence touristique ne bouleverse pas la répartition générale du CO<sub>2</sub>, mais semble au contraire se surimposer à cette dernière.* Par ailleurs, il n'est pas erroné de penser que la différence enregistrée en août et juillet est non seulement liée à l'activité touristique, mais encore à l'activité de la végétation, activité nettement plus importante en été qu'en hiver.

### b) Mesures à la Galerie Ogivale.

Comme pour la température, nous avons décidé de réaliser plusieurs séries de mesures en un même endroit afin de pouvoir détecter de manière plus précise l'influence touristique. Dans le cas du CO<sub>2</sub>, notre choix s'est porté sur la Galerie Ogivale, lieu situé comme le Boudoir des Fées dans la partie thermiquement stable de l'étage supérieur de la grotte, à une dizaine de m au-dessus du niveau de la rivière souterraine. La Galerie Ogivale se trouve à une trentaine de m seulement en amont du Boudoir des Fées. C'est un couloir de quelque 20 m de long affecté par une légère pente en direction de la Salle de la Vierge et de l'Enfant, elle-même reliée par une pente semblable à la rivière souterraine. Les mesures de gaz carbonique ont été faites au milieu de la galerie à un endroit où celle-ci est relativement étroite (de l'ordre de 2 m) et peu élevée (environ 2,20 m). Ce site d'observation a été choisi délibérément pour que les variations se marquent de façon sensible.

Au total, nous y avons réalisé quelque 25 mesures réparties sur les 5 jours d'observation retenus pour le gaz carbonique (voir introduction), à des heures variables de la journée, à deux hauteurs différentes (1,60 m et 20 cm) et à des moments différents de fréquentation touristique (avant, pendant et après le passage des groupes).

L'ensemble des observations consignées dans le tableau I va nous permettre de conclure à trois types d'influences, à savoir : l'influence instantanée, l'influence quotidienne et les variations en fonction de la hauteur du prélèvement au-dessus du sol.

Si l'on compare à cinq reprises la teneur en CO<sub>2</sub> avant et pendant le passage des visiteurs ou pendant et après le passage d'un groupe, il apparaît que les touristes ont une influence instantanée certaine sur la teneur en CO<sub>2</sub> de l'air. En effet, cette teneur (me-

TABLEAU I.  
Teneur en CO<sub>2</sub> de l'air à la Galerie Ogivale.

Date	Heure	Hauteur du prélèvement au-dessus du sol (m)	Teneur en CO <sub>2</sub> (mg/l)	Position des touristes
1. Mesures traduisant une influence instantanée				
21.7.72	15.50	1,60	4,2	Avant le passage du groupe
	15.53	1,60	4,5	Pendant le passage de ce groupe
23.7.72	10.55	1,60	1,5	Pendant le passage du groupe
	11.02	1,60	1,3	5' après le passage de ce groupe
23.7.72	15.50	1,60	2,4	Avant le passage du groupe
	15.55	1,60	2,7	Pendant le passage de ce groupe
19.8.72	11.45	1,60	5,1	Pendant le passage du groupe 8
	11.51	1,60	5,3	5' après le passage des groupes 8 et 9
6.1.73	15.35	1,60	2,4	Avant le passage de 87 personnes
	16.15	1,60	4,2	Pendant le passage de 87 personnes
2. Mesures traduisant une influence quotidienne				
21.7.72	10.40	1,60	2,1	Entre deux passages
	15.50	1,60	4,2	Idem
23.7.72	11.02	1,60	1,3	Entre deux passages
	15.50	1,60	2,4	Idem
23.7.72	10.55	1,60	1,5	Pendant le passage d'un groupe
	15.55	1,60	2,7	Idem
19.8.72	10.02	1,60	4,0	Avant tout passage
	11.51	1,60	5,3	Entre deux passages
	15.12	1,60	6,0	Idem
	16.35	1,60	5,6	Idem
3. Mesures montrant les variations en fonction de la hauteur du prélèvement au-dessus du sol				
21.7.72	10.40	1,60	2,1	Entre deux passages
	11.30	0,20	1,7	Idem
19.8.72	16.35	1,60	5,6	Entre deux passages
	16.35	0,20	5,1	Idem
6.1.73	11.00	1,60	2,0	Avant tout passage
	11.02	0,20	1,8	Idem
6.1.73	15.35	1,60	2,4	Avant le passage de 87 personnes
	15.40	0,20	2,1	Idem

surée à 1,60 m du sol) est toujours supérieure pendant le passage qu'avant ou après, sauf le 19 août 1973. Toutefois, les deux prélèvements effectués le 19 août ne contredisent pas les autres informations, car la première mesure a été réalisée pendant le passage d'un groupe et la seconde après le passage de deux groupes, ces deux groupes se succédant trop rapidement pour permettre d'effectuer une observation 5 min après le passage du premier ; il y a donc eu dans ce cas accumulation de CO<sub>2</sub>. Si le groupe compte une vingtaine de personnes, l'augmentation de la teneur semble être inférieure à 0,5 mg/l ; par contre, lors du passage exceptionnel des 87 visiteurs du 6 janvier 1973, on a pu mesurer + 1,8 mg/l. En général, l'importance de l'influence instantanée apparaît liée au nombre de personnes composant le groupe, mais assez indépendante de la teneur du départ. En moyenne, elle est de l'ordre de 0,2 à 0,3 mg/l pour une vingtaine de personnes, si les mesures sont effectuées avant et pendant le passage ou pendant et 5 min après le passage.

La comparaison des teneurs entre le début et la fin de la journée a pu être réalisée uniquement en juillet et août puisque, en janvier, seul un groupe important est passé en fin de journée. Les mesures des 21 et 23 juillet et du 19 août effectuées chaque fois à 1,60 m du sol et dans des conditions de fréquentation touristique similaires traduisent une *influence quotidienne* beaucoup plus nette encore que l'influence instantanée. On doit donc admettre un phénomène d'accumulation au cours de la journée, phénomène que nous avons déjà pressenti lors des mesures du 19 août citées ci-dessus. Cette accumulation se traduit pratiquement par un doublement de la teneur en CO<sub>2</sub> lorsque cette dernière varie le matin entre 1,3 et 2,1 mg/l et par une augmentation de l'ordre de 2,0 mg/l si la teneur de départ est plus forte (cas du 19 août). Les touristes semblent responsables du moins partiellement de cette augmentation très nette puisque, en leur absence (cas du 14 janvier), la teneur ne varie plus guère au cours de la journée.

En outre, les résultats varient en fonction de la hauteur du prélèvement au-dessus du sol. Au niveau de la Galerie Ogivale, la teneur est toujours plus forte, dans des conditions analogues, à 1,60 m qu'à 20 cm et les différences enregistrées sont comprises entre 0,5 et 0,2 mg/l. Toutefois, ces résultats se manifestent aussi bien en saison touristique qu'en hiver, car, pendant toute l'année, l'arrivée du CO<sub>2</sub> se fait par les fissures qui mettent la grotte en communication avec le sol et la végétation et, en été, l'air expiré par les touristes, beaucoup plus chaud que celui de la cavité, monte par convection. La teneur en CO<sub>2</sub> est donc plus forte au sommet des salles et des couloirs qu'au niveau du sol. Il était ainsi impérieux d'effectuer toutes les mesures à la même hauteur. En fait, ce schéma normal (25) ne se retrouve pas au niveau de l'eau en raison du dégagement de CO<sub>2</sub> par cette dernière (26).

### 3. — OBSERVATIONS EN MATIÈRE D'HUMIDITÉ RELATIVE.

Comme cela a été dit en introduction, les seules mesures faites en ce domaine l'ont été à l'aide de quatre thermo-hygrographes placés pendant huit semaines dans la grotte. Ces appareils ont été disposés à quatre endroits différents du secteur thermiquement stable, c'est-à-dire à l'entrée du Petit Labyrinthe, à la Cascade Cristalline, au Boudoir des Fées et dans la Salle de la Vierge et de l'Enfant (figure 1).

Des observations rassemblées, il s'avère que :

- à l'échelle de la semaine, il est pratiquement impossible de déceler des variations ;
- l'aire de cette partie de la grotte est presque toujours proche de la saturation puisque la teneur minimum enregistrée est de 95 % ;

### 4. — CONCLUSIONS.

Toute recherche en climatologie souterraine est conditionnée par les appareils que l'on peut utiliser.

(25) Ainsi que le confirment d'autres mesures par exemple celles effectuées à la Grande Galerie (à 1 m du sol) et dans la Salle du Tourbillon (à 8 m du sol). Dans ce cas, les différences sont plus fortes : elles varient de 0,5 mg/l le 14 janvier (4,4 contre 4,9) à 1 mg/l le 23 juillet (4,5 contre 5,5) et à 1,2 mg/l le 21 juillet (5,7 contre 6,9) mais la distance séparant les prélèvements est plus grande (7 m).

(26) En effet, deux groupes de mesures réalisées le 23 juillet au Débarcadère et en dessous de l'Escalier Tournant indiquent une plus forte teneur à 20 cm qu'à 1,60 m (2,4 contre 1,4 au Débarcadère et 6,5 contre 6,3 en dessous de l'Escalier Tournant).

En conclusion, si la teneur en CO<sub>2</sub> est avant tout liée à la configuration des endroits de mesure et à la proximité de l'eau, l'influence des touristes est loin d'être négligeable. En général, le CO<sub>2</sub> apporté par les visiteurs semble s'ajouter à la quantité habituelle de CO<sub>2</sub> de l'endroit. Des mesures ponctuelles effectuées à la Galerie Ogivale ont permis de mesurer l'influence instantanée (de l'ordre de 0,2 à 0,3 mg/l pour une vingtaine de personnes) et l'influence quotidienne. Cette dernière, beaucoup plus importante, s'explique par un processus d'accumulation et est d'autant plus sensible que la teneur de départ est faible. Tous les résultats varient avec la hauteur du prélèvement. Bien que le nombre limité de mesures empêche de se prononcer réellement sur les variations saisonnières de la teneur en CO<sub>2</sub>, il est enfin permis à ce stade des recherches de dire que ces variations semblent peu marquées en raison notamment du « peu d'importance des saisons en tant que telles sous nos climats » (27).

— les variations entre les lieux des mesures sont peu sensibles, si ce n'est une teneur relativement plus faible dans la Salle de la Vierge et de l'Enfant.

Dès lors, il apparaît impossible de pouvoir mesurer une influence touristique d'autant plus que l'action éventuelle des visiteurs serait d'augmenter une quantité proche de son maximum. Par ailleurs, on doit admettre avec C. ANDRIEUX (28) que les hygromètres à cheveux, qui ont une précision seulement de  $\pm 4$  à 7 %, ne conviennent pas en climatologie souterraine, car ils sont insuffisamment précis et ne permettent pas de mesurer des différences d'amplitude assez faibles (au maximum 10 %), amplitudes typiques des grottes.

Il est en effet impérieux en ce domaine de pouvoir disposer d'instruments sensibles, car les amplitudes des variations sont souvent réduites. Aussi n'est-il guère étonnant que les observations les plus intéressantes réalisées dans le cadre de ce travail soient dues à un thermomètre électronique à thermistance et à un CO<sub>2</sub> mètre.

L'étude de l'influence touristique sur les microclimats des grottes postule, pour sa part, de pouvoir

(27) Voir à ce propos les conclusions de C. Ek, (1968), p. 157, reprises dans C. Ek, (1973), p. 30.

(28) C. ANDRIEUX, (1970), ouvr. cit., p. 465-466.

isoler cette influence. Nous avons donc tenté de réaliser le maximum de mesures dans des secteurs stables ce qui imposait, dans chaque cas, une connaissance du milieu en l'absence des touristes.

Si l'on ne peut se prononcer sur une influence en matière d'humidité relative en raison d'un manque d'instruments, les résultats obtenus dans les domaines des températures et des teneurs en  $\text{CO}_2$  sont, par contre, très suggestifs : les touristes ont une réelle action sur la température de l'air des salles qu'ils traversent ainsi que sur la teneur en  $\text{CO}_2$ . Dans les deux cas, le phénomène peut être décomposé en deux influences : une instantanée et une plus longue ne s'effaçant que si plus aucun être humain ne vient perturber le milieu. Au contraire, à la grotte de Remonchamps, dans les endroits étudiés lorsque la fréquentation est continue pendant la journée, on assiste à une sorte d'accumulation soit des calories, soit du  $\text{CO}_2$ . En matière de température, l'augmentation instantanée provoquée par le passage d'un groupe d'une vingtaine de personnes semble être de l'ordre de  $1/2^\circ$  alors que l'influence d'ensemble pourrait être estimée à  $1/4^\circ$ . Pour le  $\text{CO}_2$ , la première augmentation est de l'ordre de 0,2 à 0,3 mg/l, mais la variation quotidienne est nettement plus forte (1 à 2 mg/l).

#### Remerciements.

Nous remercions vivement tous ceux qui nous ont aidé et sans le concours desquels cette petite étude aurait été irréalisable.

Notre gratitude va tout particulièrement à Monsieur le Professeur P. MACAR qui a accepté ce travail et nous a encouragées à le réaliser, à son collaborateur C. EK, Chef de Travaux et Maître de Conférences qui a guidé pas à pas

notre recherche et a consacré de nombreuses heures à nous aider dans un domaine pour nous tout nouveau, ainsi qu'à J. GODISSART, Spéléologue, à qui nous devons l'utilisation du thermomètre électronique à thermistance, appareil qu'il a lui-même réalisé et fait fonctionner à notre demande.

Nous voudrions aussi remercier Monsieur J. ALEXANDRE, Chargé de cours associé, Monsieur A. LAURANT, Assistant, Monsieur DEGENEFTE, Directeur de la Grotte ainsi que tout le personnel de cette dernière sans oublier Monsieur R. DENOEL, le Chef-Guide.

#### BIBLIOGRAPHIE.

- ANDRIEUX (C.) — 1970 — Contribution à l'étude du climat des cavités naturelles des massifs karstiques. *Ann. Spéol.*, 25, 2 et 3, p. 441-559.
- DELECOUR (F.), F. WEISSEN et C. EK — 1968 — An electrolytic field device for the titration of  $\text{CO}_2$  in air. *National speleological Society Bulletin*, 30, 4, p. 131-136.
- DE SAINT-BLANQUAT (H.) — 1967 — La convalescence de Lascaux. *Science et Avenir*, 242, p. 238-243.
- EK (C.) — 1968 — Facteurs, processus et morphologie karstique dans les calcaires paléozoïques de la Belgique, Thèse Doct. Sci. géol. et min., Liège, 476 p.
- EK (C.) — 1973 — Analyse d'eaux des calcaires paléozoïques de la Belgique. Méthodes, techniques et résultats. *Service géologique de Belgique, Professional Paper*, 18, 33 p. + tableaux.
- EK (C.), F. DELECOUR et F. WEISSEN — 1968 — Teneur en  $\text{CO}_2$  de l'air de quelques grottes belges. Technique employée et premiers résultats. *Ann. Spéol.*, 23, 1, p. 243-257.
- EK (C.), S. GILEWSKA, L. KASZOWSKI, A. KOBYLECKI, K. OLEKSYNOWA et B. OLEKSYNOWA — 1969 — Some analysis of the  $\text{CO}_2$  content of the air in five Polish caves. *Zeitschrift für Geomorphologie*, 13, 3, p. 267-286.
- GÈZE (B.) — 1965 — La spéléologie scientifique. Le Seuil, Paris.
- HAUTOT (A.) — s. d. — Physique générale. Deuxième partie. Chaleur et thermodynamique. Desoer, Liège.
- INSTITUT ROYAL MÉTÉOROLOGIQUE DE BELGIQUE — 1972 — Observations climatologiques. *Bulletins mensuels de mars et avril 1972*, Bruxelles.
- TROMBE (F.) 1952 — Traité de spéléologie. Payot, Paris, 376 p.