

**NEW DIRECTIONS
IN KARST**

Edited by

K. Paterson and M.M. Sweeting

L'Evolution saisonnière de la teneur en CO₂ de l'air de deux grottes Belges: Ste-Anne et Brialmont, Tilff

M. Gewelt and C. Ek

RÉSUMÉ

Les variations de la pCO₂ ont été mesurées dans deux grottes belges durant 13 mois consécutifs. Le maximum très net en été-automne et le minimum hivernal sont attribués au rythme du métabolisme de la biomasse. Des décalages progressifs entre les pics observés à diverses profondeurs sous terre et le pic du maximum de l'activité biologique suggèrent l'existence d'un flux de CO₂ venant du sol. Dans la grotte de Brialmont, qui a deux entrées opposées, les teneurs sont plus basses que dans la grotte Ste-Anne. Les teneurs des fissures sont dans l'ensemble plus fortes que celles des galeries : les fissures représentent la voie d'accès du CO₂ du sol dans les grottes. Le ruisseau souterrain (à la grotte Ste-Anne) est une autre source d'apport de CO₂ à l'air de la cavité. Des contaminations anthropiques ont été décelées et mesurées; les précautions prises pour éviter des erreurs dues à cette cause lors de nos analyses sont décrites. Les nouveaux résultats présentés ici sont comparés aux teneurs en CO₂ observées par divers auteurs dans neuf autres grottes de Belgique et dans des cavités de huit autres pays.

SUMMARY

pCO₂ variations have been measured in two Belgian caves during 13 consecutive months. The clear maximum in summer-autumn and the minimum during winter are correlated with biological activity. The delays between CO₂ peaks at different depths and the peak of maximum plant growth suggest CO₂ fluxes coming from the soil air. In the Brialmont cave which has two entrances at opposite ends CO₂ contents are lower than in the Ste-Anne cave. CO₂ contents in the joints and fissures are commonly higher than those in the galleries. These fissures are thus the pathways by which soil CO₂ passes into the cave. The underground river (in the Ste-Anne cave) is another source of CO₂ for the cave atmosphere. Human contamination has been identified and measured. The precautions taken during our measurements to avoid contamination are discussed. The results are compared with the CO₂ contents observed by researchers in nine other Belgian caves and also in caves of eight other countries.

INTRODUCTION

Le 'moteur' de la dissolution du calcaire est, le plus souvent, le dioxyde de carbone (H. Roques, 1959). C'est dire son importance dans les phénomènes karstiques. Son étude présente d'autre part un grand intérêt biologique : le CO₂ provient en très grande partie du métabolisme de la biomasse et, en retour, la teneur en dioxyde de carbone de l'air a des répercussions biologiques. Du fait de l'importance et de la complexité des échanges entre phase gazeuse et phase liquide, l'étude de la répartition du CO₂ de l'air dans les karsts et de ses modifications présente donc un intérêt évident.

Les premières mesures de CO₂ en grotte datent d'il y a bien longtemps (voir par ex. M. Forel, 1865). Mais c'est à une quinzaine d'années seulement que remonte la systématisation des analyses dans ce milieu (C. Ek *et al.*, 1968; F.-D. Miotke, 1974; T.C. Atkinson, 1975; J.M. James, 1977; P. Renault, 1979), et c'est tout récemment que les mesures ont pris une grande extension (C. Ek, 1981; C. Ek *et al.*, 1981; A. Klimchuck *et al.*, 1981; W.C. Lewis, 1981; P. Renault, 1982).

Le présent travail est basé sur 237 mesures faites en 1982 et 1983 dans la grotte Ste-Anne et la Grotte de Brialmont à Tilff (Belgique).

Les deux grottes se présentent comme des superpositions de galeries subhorizontales plus ou moins longues (la plus longue a environ 620 m), étagées au flanc d'un versant de vallée.

Les mesures ont été faites mensuellement en une série de lieux précis; en outre, les recherches ont fourni une connaissance générale de l'évolution des teneurs en CO₂ avec la distance à l'entrée et une idée précise des effets contaminants de la présence humaine. Enfin, on a comparé les nouvelles mesures aux quelque 350 analyses déjà publiées sur des grottes belges et à une centaine de mesures inédites.

LES GROTTES ETUDIÉES

Situation et site

La grotte Ste-Anne et la grotte de Brialmont sont toutes deux situées à Tilff (Belgique), à une dizaine de kilomètres au sud de Liège. Elles s'ouvrent dans la vallée de l'Ourthe, affluent de la Meuse, sur le versant de rive droite de la vallée (Figure 1). L'Ourthe coule à cet endroit à l'altitude de septante-cinq mètres environ, mais les terrasses fluviales quaternaires de sa vallée s'observent jusqu'à plus de deux cents mètres d'altitude sur les versants. Les grottes étudiées sont des étagements de longs couloirs subhorizontaux situés entre ces deux limites altitudinales.

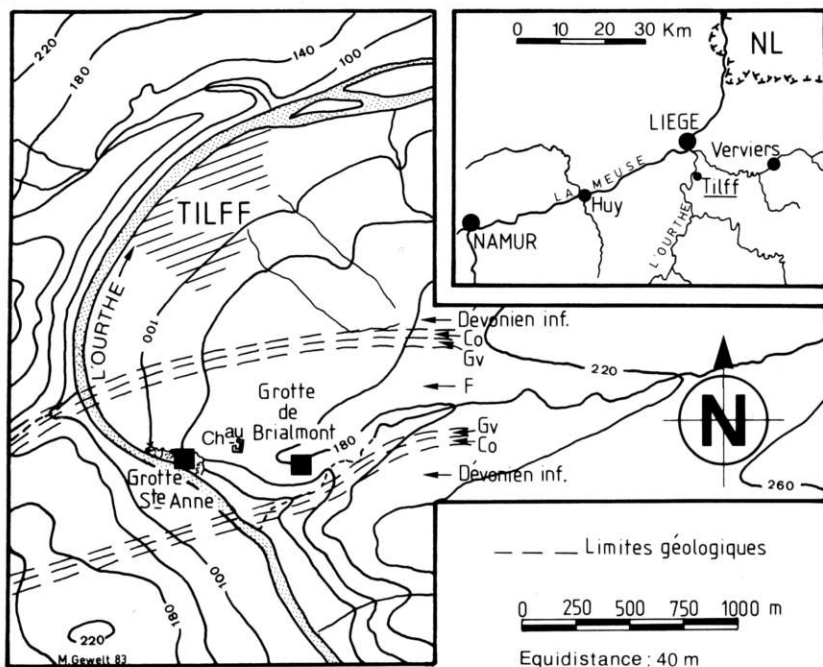


Figure 3.1 Localisation des grottes Ste-Anne et Brialmont, Tilff, (d'après C. Ek, 1962, légèrement modifié)

Développement et morphologie

i) *La grotte Ste-Anne* La grotte Ste-Anne est constituée de quatre étages superposés dont l'inférieur débouche dans l'Ourthe même, et dont celui qui le surmonte immédiatement s'ouvre dans une carrière de calcaire frasnien abandonnée. Le développement total de la grotte est de l'ordre de 1200 m, sa dénivelée d'environ 35 m (Figure 2). On trouvera dans *l'Inventaire spéléologique de la Belgique*, édité par la Société spéléologique de Wallonie (1982), une bibliographie très fournie sur la grotte et divers renseignements. La grotte a été, au point de vue de la morphologie, étudiée en particulier par E. van den Broeck, E. Martel et E. Rahir (1910) puis par C. Ek (1961 et 1962).

Les étages de la grotte représentent les cours successifs d'un ruisseau souterrain affluent de l'Ourthe qui a suivi l'encaissement de la rivière épigée au cours du Quaternaire. L'étage conservé sur sa plus grande longueur (parfois dit l'étage moyen ou la galerie principale), vers l'altitude de 90 m, est long de quelque 620 m. Les étages sont reliés par des fissures subverticales, parfois étroites, parfois notablement élargies, et, par endroits, par des passages obliques (Figure 2).

La grotte présente peu de salles notables : la morphologie dominante est celle de longs couloirs creusés par l'eau courante, avec la présence de formes dues à des circulations en conduite forcée et d'autres formes liées à l'action d'une rivière souterraine.

ii) *La grotte de Brialmont* Constituant la partie supérieure du réseau de Ste-Anne, la grotte de Brialmont a un développement de quelque 150 m. Elle comporte essentiellement deux galeries horizontales superposées. L'entrée naturelle est vers 176 m, au-dessus de ces étages; une autre entrée, artificielle, s'ouvre dans le versant vers 168 m, au niveau de l'étage supérieur.

Le plancher de la galerie supérieure s'étant effondré sur une vingtaine de mètres de longueur dans la galerie inférieure, les deux conduits se réunissent là en une salle de quelque 10 m de haut (Figure 3).

Un puits s'ouvre à l'étage inférieur, menant vers des galeries étroites situées plus bas. Cependant, la jonction de la grotte de Brialmont avec celle de Ste-Anne, sous-jacente, n'a pas encore été réalisée.

La grotte de Brialmont, qui est située vers le haut du versant de la vallée de l'Ourthe, représente donc apparemment les vestiges de deux galeries qui se sont formées bien antérieurement à celles de la grotte Ste-Anne en tant que conduits d'un affluent souterrain de l'Ourthe. La seule entrée naturelle de la grotte de Brialmont représente un ancien ponor (Figure 3). Les galeries ont été obstruées à leurs extrémités par d'abondants concrétionnements et on ne peut retrouver le prolongement des conduits: en particulier, les anciennes exurgences ne sont pas connues.

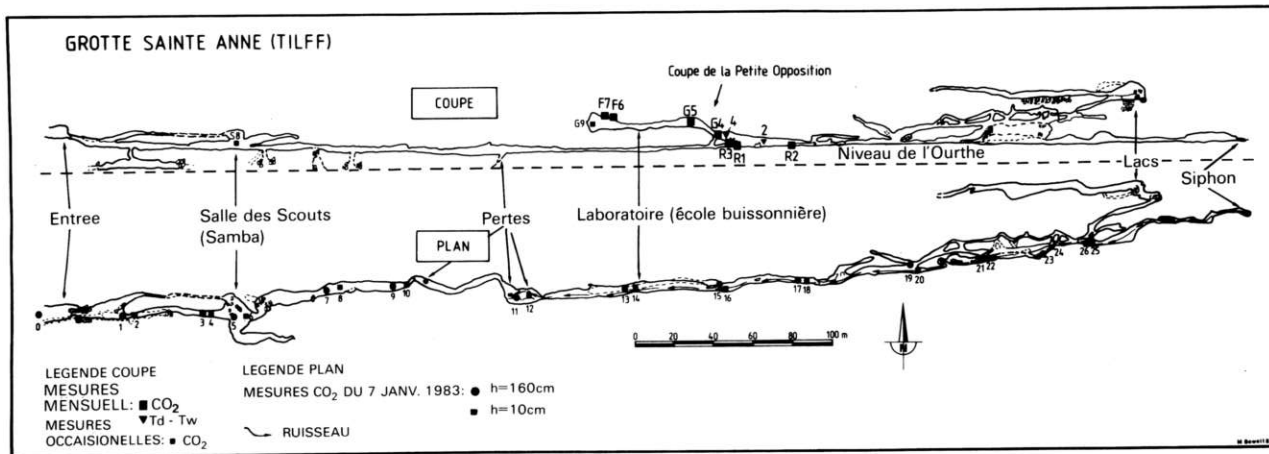


Figure 3.2 Coupe longitudinale et plan de la grotte Ste-Anne. Localisation des mesures CO₂ et Td - Tw. D'après un levé de l'Equipe Spéléo. Tilffoise (J. Silberstein et R. Warginaire, 1972); modifications partielles d'après C. Ek (1961)

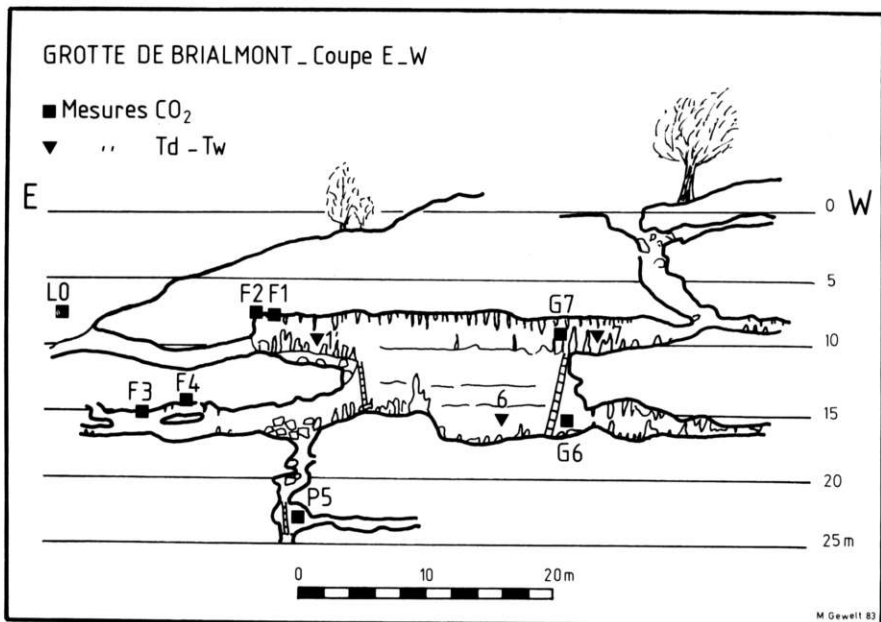


Figure 3.3 Coupe longitudinale de la grotte de Brialmont. Localisation des mesures CO₂ et Td - Tw. D'après un levé de E. Naveau, S.S.D., 1971 (dans R. Delbrouck, s.d.)

METHODES DE MESURES

Les mesures de la teneur en CO₂ de l'air ont toutes été effectuées au moyen d'un détecteur de gaz GASTEC constitué d'une pompe manuelle à piston qui aspire 100 ± 5 ml d'air à travers un tube de verre contenant un indicateur coloré. La teneur en CO₂ est lue directement en ppm (par volume) sur le tube réactif : elle correspond à la longueur de la zone ayant viré de couleur. Les tubes réactifs 2 LL (*extra low range*) permettent de mesurer des teneurs de 300 à 5000 ppm. Pour les teneurs plus élevées, de 2500 à 30 000 ppm, on utilise les tubes 2 L (*low range*). Dans le modèle 2 LL, le CO₂ réagit avec l'hydrazine: $\text{CO}_2 + \text{N}_2\text{H}_4 \rightarrow \text{N}_2 \cdot \text{NH} \cdot \text{COOH}$, ce qui décolore l'indicateur rédox en violet. Dans le modèle 2 L, le CO₂ neutralise de l'hydroxide de potassium: $\text{CO}_2 + \text{KOH} \rightarrow \text{K}_2\text{CO}_3 + \text{H}_2\text{O}$, réaction décolorant un indicateur pH de l'orange au jaune.

La précision minimale garantie par le constructeur est de $\pm 25\%$ mais l'étalonnage de l'appareil montre une meilleure précision effective et une reproductibilité des mesures à 10% près (C. Ek *et al.*, 1981).

Par rapport au dosage du CO_2 effectué par électrolyse d'une solution de NaCl ayant absorbé le CO_2 d'un échantillon d'air (H. Koepf, 1952; F. Hilger, 1963; F. Delecour, 1965; C. Ek *et al.*, 1968 et F. Delecour *et al.*, 1968), la pompe Gastec offre un avantage tant au niveau du poids de l'appareillage (moins de 0.5 kg contre plus de 10 kg) qu'au niveau de la rapidité de la mesure (2 ou 3 minutes suivant le modèle de tube réactif utilisé, contre plus de 20 minutes pour le dispositif par électrolyse). Si la précision de l'ancien appareil de dosage du CO_2 est meilleure - ± 0.1 mg CO_2 /l soit environ ± 60 ppm (C. Ek, 1981) - le détecteur à pompe nous paraît nettement mieux adapté à une utilisation souterraine. Signalons d'ailleurs qu'en France (P. Renault, 1982) et en Allemagne (F.D. Miotke, 1974), les mesures de la teneur en CO_2 de l'air des grottes sont principalement effectuées avec des pompes à soufflet Dräger qui sont basées sur le même principe de coloration de tubes indicateurs.

Des précautions particulières ont été prises pour mesurer la teneur en CO_2 de l'air dans les fissures. Un système absorbant le CO_2 exhalé par l'opérateur a systématiquement été utilisé (Figure 4). Le système se compose d'une enceinte en plexiglas munie de deux soupapes de grand diamètre dont l'une est reliée avec l'extérieur (pour l'inspiration), l'autre conduisant l'air expiré dans un réservoir en acier inoxydable rempli de chaux sodée. Un embout buccal (type plongée) est relié à l'enceinte en plexiglas tandis qu'un pince-nez oblige l'opérateur à respirer par la bouche, à travers le système absorbant. L'embout buccal est nettement plus confortable que le masque couvrant nez et bouche que nous utilisions auparavant. L'utilité de l'absorbant de CO_2 lors de mesures dans des endroits confinés est certaine et sera mise en évidence plus loin. Dans une même optique, les moyens d'éclairage par combustion sont systématiquement écartés au profit de l'éclairage électrique.

Les mesures de température et d'humidité relative ont été effectuées avec un psychromètre. Un abaque permet de déterminer l'humidité relative (en %) en fonction des températures lues sur le thermomètre sec (Td) et sur le thermomètre mouillé (Tw). La précision de lecture sur les températures est de $\pm 0.1^\circ\text{C}$ et l'erreur sur l'humidité relative est de ± 2 à 3%.

Les treize séries de mesures mensuelles ont été effectuées de janvier 1982 à janvier 1983. Les mesures ont toujours été faites le matin dans la grotte de Brialmont et l'après-midi dans la grotte Ste-Anne.



Figure 3.4 Mesure de la teneur de l'air en CO_2 en milieu confiné: le CO_2 respiratoire est absorbé sur de la chaux sodée contenue dans le réservoir visible à l'avant-plan. L'opérateur manipule la pompe à piston munie à son extrémité du tube indicateur (détecteur) (Photo C. Ek).

RESULTATS

Les variations mensuelles de la teneur en CO_2 de l'air des deux grottes

i) *La grotte Ste-Anne* Les résultats des mesures mensuelles sont consignés dans le tableau 1. La localisation des points (Figures 2 et 7) montre que les mesures ont été effectuées à plus de 300 m de l'entrée de la grotte.

Tableau 3.1 Mesures mensuelles de la teneur en CO₂, de la température et de l'humidité relative de l'air de la grotte Ste-Anne (1982-1983)

n° pts \ Date	29/01 1982	04/03 1982	26/03 1982	30/04 1982	28/05 1982	02/07 1982	22/07 1982	02/09 1982	30/09 1982	29/10 1982	26/11 1982	30/12 1982	28/01 1983
0 (1)	-	-	-	400	-	-	-	-	-	-	-	-	-
0 (2)	6,1	9,0	17,4	8,8	-	-	19,0	18,0	-	10,6	8,0	4,2	-
0 (3)	90	59	45,5	93,5	-	-	58	71	-	79	73	69	-
R1 (1)	2800	3400	3600	3500	4400 ⁺	8000	5200 ⁺	6000	7000	4500	3500	3000	3200
R2 (1)	2900	3500	3800	3900	4900 ⁺	5000	5000 ⁺	6000	8000	4800	3700	3000	3600
R2 (2)	8,2	8,7	-	9,0	9,3	10,0	9,8	9,9	10,1	10,0	9,4	9,1	9,2
R2 (3)	100	100	-	-	100	99,5	98,5	100	99,5	100	100	100	100
R3 (1)	2900	3100	3500	3300	4200 ⁺	5500	5200 ⁺	6500	7000	4500	3400	3000	-
G4 (1)	2800	3400	3400	3800	4800 ⁺⁺	5200	5500 ⁺	6500	8000	4600	3500	2900	3200
G4 (2)	9,4	9,4	9,2	9,4	9,4	9,7	10,0	9,8	10,1	10,0	9,6	9,6	9,4
G4 (3)	100	99	99	-	99	99	100	99	98	100	100	99	100
G5 (1)	2900	3500	3200	3500	4200 ⁺	5000	5500 ⁺	6500	7500	4500	3800	2900	3000
F6 (1)	3200 ⁺	3900	3800	4000	5100 ⁺	5300	6000 ⁺	7000	9000	5200	4100	3000	3500
F6			5000 ⁺⁺										
F7 (1)	3500 ⁺	1900	3800	4000	5000 ⁺	5500	6000 ⁺	6500	9000	4800	4100	3000	3300
S8 (1)								2400					
G9 (1)									9000				

Localisation des points : voir figures 2 et 7.

(1) = teneur de l'air en dioxyde de carbone (ppm CO₂ vol).

(2) = température de l'air (°C).

(3) = humidité relative (%)

+ Contamination anthropique pouvant affecter les mesures: visiteurs vus dans la grotte.

++ " " " " " " : masque absorbant CO₂ défectueux.

Contamination anthropique mesurée avant et après le passage de visiteurs

+++ (ou après quelques expirations dans les fissures).

\ R = Rivière; G = Galerie; F = Fissure; S = Salle

Tableau 3.2 Mesures mensuelles de la teneur en CO₂, de la température et de l'humidité relative de l'air de la grotte de Brialmont (1982-83)

Date n° pts	21/01 1982	29/01 1982	04/03 1982	26/03 1982	30/04 1982	28/05 1982	25/06 1982	02/07 1982	22/07 1982	29/08 1982	30/09 1982	29/10 1982	26/11 1982	30/12 1982	28/01 1983
0 (1)	-	-	350	-	350	350	300	300	350	350	350	350	300	300	300
0 (2)	-	5,0	7,2	9,2	6,0	13,4	18,2	21,3	13,6	15,0	13,4	8,4	5,8	-1,6	8,5
0 (3)	-	97,5	76	68,5	95	78	72,5	65	91,5	78	100	98	88	-	83
1' (2)	-	4,2	5,7	5,1	5,6	8,2	9,6	9,7	10,6	10,6	10,6	8,4	6,2	3,7	7,1
1' (3)	-	97	97	100	94,5	97,5	97	99	97	99	100	95	95	91	96
F1 (1)	1450 ⁺	1500 ⁺⁺	500	600	700	600	400	400	1000	400	500	400	350	300	400
F2 (1)	-	1100 ⁺⁺	400	700	1100	800	1200 ⁺⁺	1700	1000	450	500	400	400	400	300
F3 (1)	-	-	1000	500	800	800	-	2700	3000	2800	2000	400	350	400	400
F4 (1)	1000	1200 ⁺⁺	1200	600	900	1100	-	2900	3200	2600	2100	500	1500	600	500
P5 (1)	1900 ⁺⁺⁺	1000	500	400	500	500	2000 ⁺	2000	2800	2400	7000	9000	600	400	550
G6 (1)	450	500	400	500	450	600	1900 ⁺	2000	2900	1900	2000	350	500	300	300
G6 (2)	-	4,4	4,9	4,8	5,8	6,7	7,2	7,5	7,6	7,9	8,2	8,0	7,4	3,6	6,0
G6 (3)	-	96,5	100	98,5	97,5	100	97,5	99	98	100	100	100	93	94	100
G7 (1)	500	550	600	600	500	600	500	500	1000	400	500	350	300	300	300
G7 (2)	-	5,4	6,3	6,1	6,2	8,3	9,7	10,4	10,1	10,4	10,6	9,1	7,4	5,0	6,8
G7 (3)	-	97	94	92,5	100	99	99	96,5	99,5	100	100	96	95	91	99
G8 (1)											2000				

Localisation des points : voir figure 3.

(1) = teneur de l'air en dibxyde de carbone (ppm CO₂ vol).

(2) = température de l'air (°C).

(3) = humidité relative (%).

+ Contamination anthropique pouvant affecter les mesures : visiteurs vus dans la grotte.

++ " " " " " " : masque absorbeur CO₂ défectueux.

+++ Contamination anthropique mesurée avant et après le passage de visiteurs (ou après quelques expirations dans les fissures).

F = Fissure; P = Puit; G = Galerie

Trois secteurs ont été distingués dans l'identification des points de mesures :

La rivière souterraine: R1 = mesure à 15 cm au-dessus du niveau de l'eau; R2 = même type de localisation mais 30 m en amont; R3 = mesure à 10 cm de la voûte surplombant la rivière, 3 m en aval de R1.

la galerie : G4 et G5.

les fissures : F6 et F7.

En outre, deux mesures ponctuelles ont été effectuées à la salle Samba (S 8) et à l'extrémité du Laboratoire (G9).

Au niveau de la rivière, les teneurs extrêmes varient de 2800 ppm en janvier 82 à 8000 ppm en septembre. Dans la galerie, les valeurs minimales et maximales sont identiques, alors que dans les fissures nous avons mesuré de 1900 ppm début mars à 9000 ppm fin septembre.

ii) *La grotte de Brialmont* Le tableau 2 reprend les mesures mensuelles effectuées dans cette petite grotte munie de deux entrées.

Les teneurs en CO₂ de l'air du bois de feuillus dans lequel se trouvent les entrées de la grotte sont toujours comprises entre 300 et 350 ppm (point L0). On retrouve donc bien ici la teneur en CO₂ habituelle de l'atmosphère. Au sein de la grotte, trois secteurs de mesures ont également été distingués :

les fissures : F1, F2, F3, F4.

le puits : P5.

la galerie inférieure (G6) et la galerie supérieure (G7).

Les teneurs extrêmes mesurées dans les fissures sont 300 et 3200 ppm; dans le puits, elles sont 400 et 9000 ppm. Dans les galeries, les valeurs varient entre 300 et 2900 ppm.

iii) *Les variations mensuelles dans les galeries* Comme le montre très bien la Figure 5, les deux grottes sont nettement différenciées sur le plan des teneurs en CO₂. Les teneurs en CO₂ mesurées à Brialmont sont toujours inférieures à celles trouvées à Ste-Anne. Dans cette dernière, l'évolution mensuelle montre un minimum en hiver, plus particulièrement en décembre et janvier. Les teneurs de l'air en CO₂ dans les galeries et au-dessus de la rivière évoluent parallèlement et elles restent toujours proches les unes des autres. La seule exception est la mesure R1 du 2 juillet (8000 ppm) qui ne cadre pas avec les mesures faites en amont (R2 : 5000 ppm) et au même endroit à 140 cm au-dessus de l'eau (R3 : 5500 ppm) et qui doit donc être considérée avec circonspection, d'autant plus qu'une contamination anthropique semble peu plausible, la mesure R1 ayant été effectuée en premier lieu.

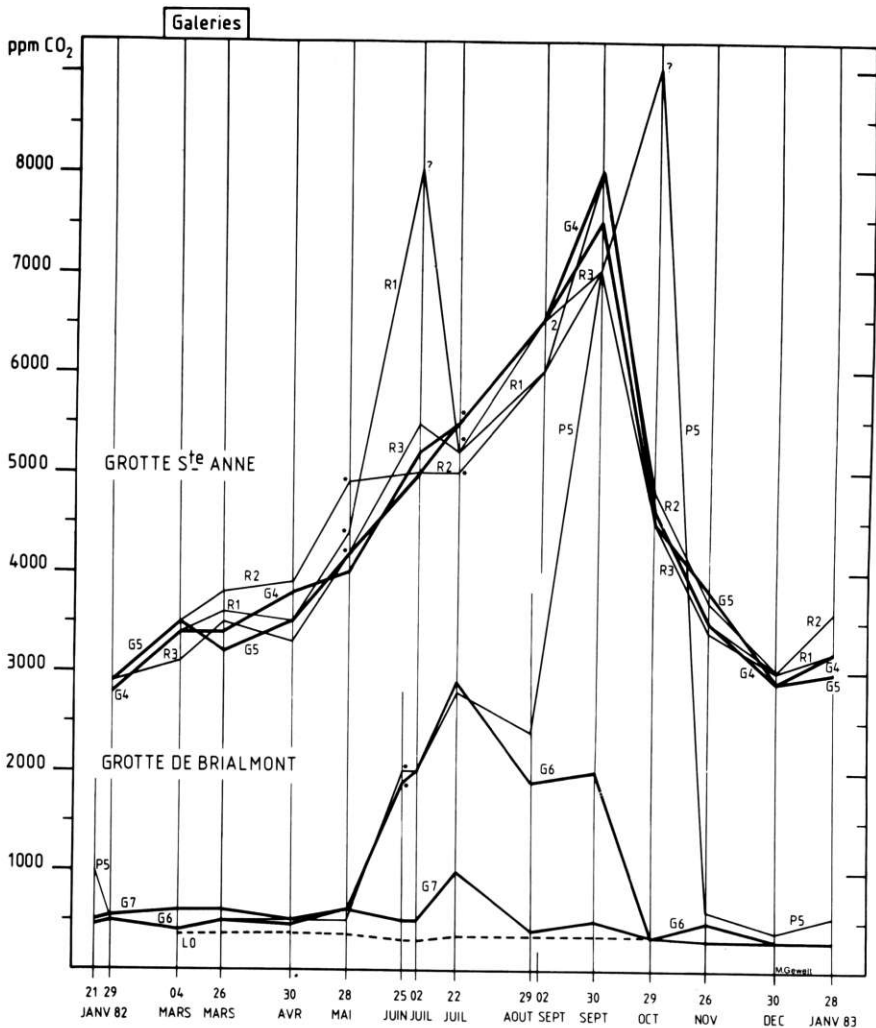


Figure 3.5 Evolution mensuelle de la teneur en CO₂ des galeries dans les grottes Ste-Anne et Brialmont

Le maximum dans les galeries et au-dessus de la rivière à la grotte Ste-Anne s'observe fin septembre, alors qu'à Brialmont il apparaît dans les galeries le 22 juillet, soit deux mois auparavant. Dans cette grotte, contrairement à Ste-Anne, il n'existe pas de minimum défini en hiver, la teneur étant toujours faible, sauf durant la période comprise entre juin et fin septembre.

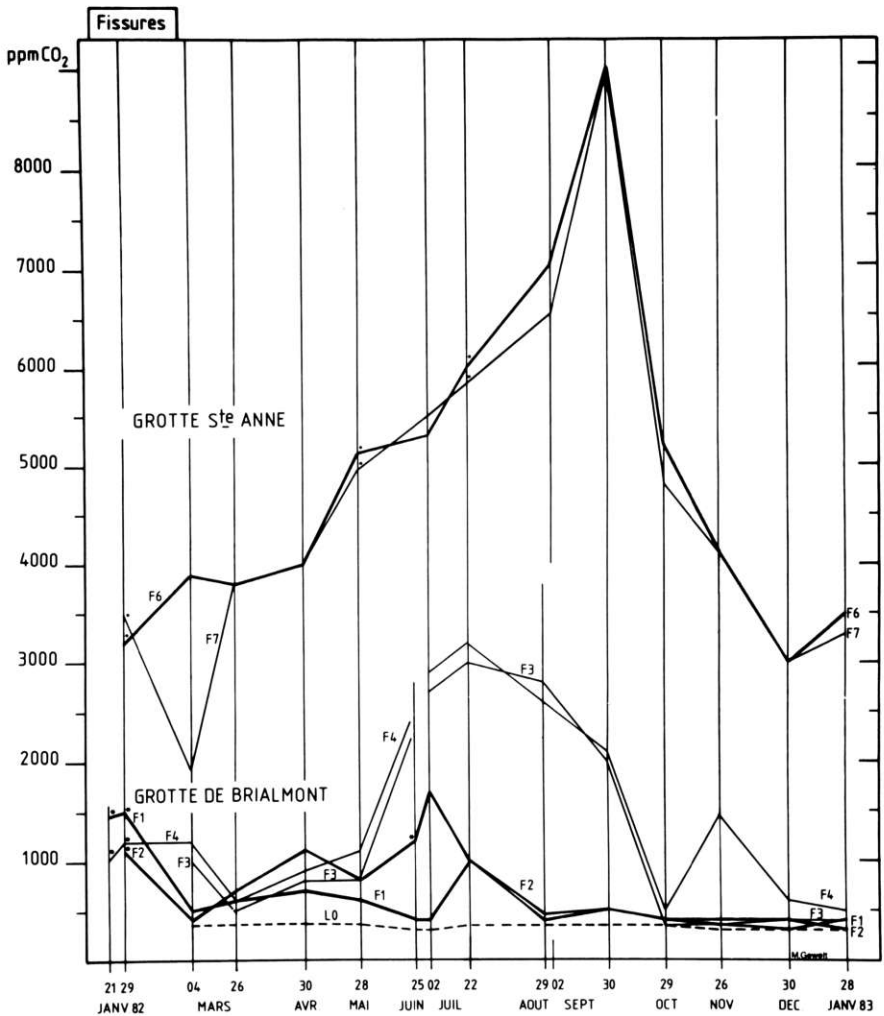


Figure 3.6 Evolution mensuelle de la teneur en CO₂ des fissures dans les grottes Ste-Anne et Brialmont

iv) *Les variations mensuelles dans les fissures* Ici aussi, les deux grottes restent très bien différenciées (Figure 6). Les fissures de la grotte Ste-Anne contiennent toujours plus de CO₂ que celles de la grotte de Brialmont. Mais, dans les deux grottes, les fissures présentent les mêmes variations annuelles que les galeries.

A Ste-Anne, le maximum (≈ 9000 ppm) est enregistré le 30 septembre et le minimum s'observe en décembre-janvier. Les deux fissures sont voisines et leurs teneurs sont presque toujours identiques (Figure 7).

Dans les fissures de la grotte de Brialmont, les teneurs sont plus irrégulières et un premier maximum apparaît d'abord dans les fissures (F1 - F2) proches du sol, fin juin - début juillet. Le second maximum est décalé vers juillet-août. Ici aussi, on s'aperçoit que la grotte de Brialmont enregistre un maximum de teneur en CO_2 avant la grotte Ste-Anne située environ 70 m plus bas. Il semble donc qu'un flux de CO_2 provenant du sol superficiel se propage vers la profondeur.

Evolution longitudinale de la teneur de l'air en CO_2 dans la grotte Ste-Anne

Une série de 27 mesures échelonnées par paires tout au long de la grotte Ste-Anne a été effectuée le 7 janvier 1983. Au sein de chaque paire de mesure, la première est toujours effectuée au niveau du sol ($h = 10$ cm) et la deuxième mesure, distante de 5 à 6 m de la première, est faite à hauteur d'homme ($h = 160$ cm), sauf lorsque la hauteur de la galerie ne le permet pas. La hauteur totale des salles ou des galeries à l'endroit de la mesure a également été évaluée. Les résultats, consignés dans le tableau 3, montrent une évolution vers des teneurs en CO_2 croissantes en s'enfonçant plus profondément dans la grotte. Les teneurs en CO_2 passent de 300 à 3200 ppm entre l'entrée et le point de mesure le plus éloigné de celle-ci, à 520 mètres à l'intérieur de la cavité. La localisation des mesures (Plan de la Figure 1) montre que les 10 premières mesures sont effectuées dans la partie sèche de la grotte, tandis que les points 11 à 26 sont situés dans la partie de la grotte où coule le ruisseau souterrain.

DISCUSSION

L'évolution saisonnière

L'examen des résultats mensuels fait clairement apparaître un décalage dans le temps des maxima de la teneur en CO_2 . Ces décalages sont en relation directe avec la distance entre le sol et le point de mesure dans la grotte. Si on se rappelle que les deux grottes sont étagées (Figure 5 et 6), on a la situation suivante:

Maximum en juin-juillet pour les fissures proches de la surface à Brialmont (F1 et F2).

Maximum en juillet-août dans les fissures de l'étagage inférieur de la grotte de Brialmont (F3 et F4).

Maximum fin septembre dans les fissures de la grotte Ste-Anne, près de 70 m plus bas dans le massif calcaire.

Tableau 3.3 Variation de la teneur en CO₂ de l'air de la grotte Ste-Anne en fonction de la distance par rapport à l'entrée, le 07/01/1983

N° des points	X (m)	Y (ppm CO ₂)	h (cm)	H (cm)
0	0	300	160	∞
1	29	1000	160	170
2	34	700	10	170
3	63	800	160	260
4	69	800	10	250
5	84	800	160	400
6	90	800	10	400
7	120	900	160	300
8	125	900	10	30
9	165	1300	160	180
10	173	1500	10	180
11	227	2300	160	180
12	235	2300	10	180
13	289	2300	100	110
14	295	2500	10	80
15	334	2400	100	110
16	340	2700	10	800
17	373	2800	160	400
18	379	2900	10	70
19	432	3100	160	400
20	437	2800	10	400
21	475	2900	70	80
22	482	2900	10	200
23	504	2800	160	1200
24	510	3000	10	1200
25	522	3000	80	1200
26	520	3200	10	1200

X = distance par rapport à l'entrée de la grotte (en mètres).

Y = teneur de l'air en CO₂ (ppm CO₂ vol).

h = hauteur au-dessus du plancher à laquelle est effectuée la mesure.

H = hauteur totale de la salle ou de la galerie à l'endroit de la mesure.

Le même décalage des pics de la teneur en CO_2 se manifeste aussi dans les mesures effectuées dans les galeries:

Maximum en juillet à Brialmont (G6 - G7).

Maximum en septembre dans les galeries et au-dessus du ruisseau souterrain de la grotte Ste-Anne.

Ces décalages successifs dans l'apparition des teneurs maximales en CO_2 semblent suggérer l'existence d'un flux de CO_2 se déplaçant par diffusion et par gravité depuis le haut (c'est-à-dire la zone de production du CO_2 constituée par le sol) vers le bas. L'examen de la Figure 3 montre en coupe la localisation des points de mesure à Brialmont et permet de suivre verticalement le flux du haut (F1 - F2) vers le bas (F3 - F4); le raccord peut être effectué avec les fissures F6 et F7 de Ste-Anne situées beaucoup plus bas (Figure 7).

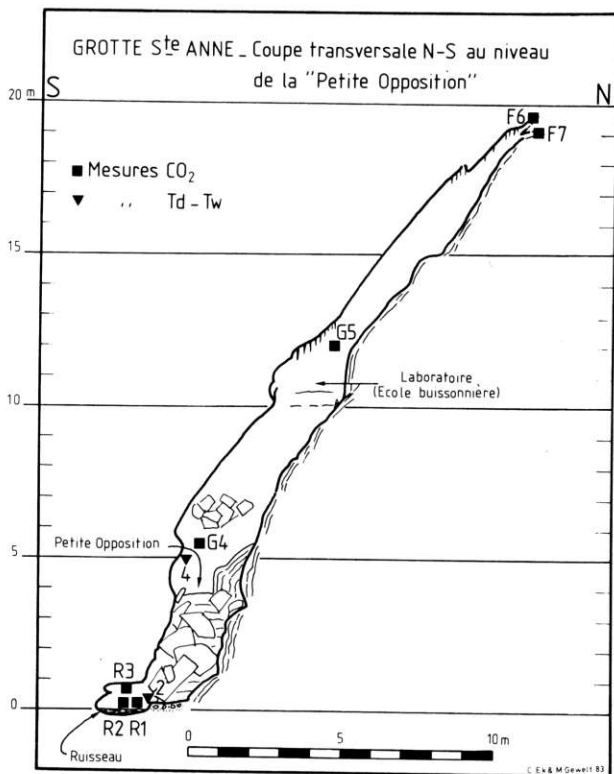


Figure 3.7 Coupe transversale dans la grotte Ste-Anne, au niveau de la 'Petite Opposition'. Localisation des mesures mensuelles (CO_2 et Td - Tw). Levé par C. Ek

La relation entre l'évolution des teneurs en CO₂ et la source de CO₂ (le sol) est nette au niveau des variations annuelles qui paraissent bien refléter le rythme saisonnier de la biomasse, avec son minimum d'activité en hiver. Le pic du maximum de l'activité des végétaux doit très probablement être situé vers la fin mai-début juin, alors que le premier maximum de la teneur en CO₂ est enregistré début juillet dans les fissures proches de la surface (F1 - F2). Le flux de CO₂ descend ensuite progressivement au sein du massif calcaire, ce qui explique les décalages des maxima mis en évidence plus haut. Des décalages semblables viennent d'être également trouvés par H. Haas *et al.*, (1983) dans des sols épais surmontant du lignite dans le Dakota du Nord. Des mesures effectuées à près de 3 mètres de profondeur ont montré des variations en corrélation avec les fluctuations annuelles de la croissance des plantes et un décalage de deux mois entre le pic de la croissance des végétaux en juin et le pic du CO₂ dans le sol à 2.7 m de profondeur en août.

Si les décalages que nous avons observés sont du même ordre de grandeur, mais à plus forte profondeur, il faut probablement en chercher la cause dans une épaisseur de sol moindre et une fissuration du massif importante qui favorise la diffusion et la propagation du CO₂ par gravité.

Relation entre la teneur en CO₂, la température et l'humidité

La Figure 8 montre l'évolution saisonnière de deux paramètres climatiques importants : la température et l'humidité relative.

Dans la grotte Ste-Anne, l'humidité relative varie très peu et elle est toujours comprise entre 98 et 100%, cette dernière valeur étant la plus fréquente. Cette situation assez banale en grotte s'explique par le confinement de la zone de la grotte étudiée et par la présence du ruisseau souterrain (Figure 7). Les eaux de percolation contribuent aussi à la saturation de l'atmosphère.

Dans la grotte de Brialmont, l'humidité relative est toujours assez élevée, mais elle varie plus (91 à 100%) en raison de la ventilation de la grotte provoquée par les deux entrées. En général, en hiver l'air de la partie inférieure (6) de la grotte est plus humide que celui de la partie supérieure (7). Au printemps et en été la situation inverse est observée sans que les différences soient très fortes (quelques % d'humidité relative).

La température dans la grotte Ste-Anne (points 2 et 4, Figure 8) est presque constante durant toute l'année. Elle est en moyenne de $9.6 \pm 0.3^{\circ}\text{C}$ au point 4 ('petite opposition'), alors qu'au niveau de la rivière elle est en moyenne légèrement inférieure et varie un peu plus : $9.4 \pm 0.6^{\circ}\text{C}$.

Dans la grotte de Brialmont, les températures de l'étage supérieur (1 et 7, Figure 8) sont plus élevées que celles de

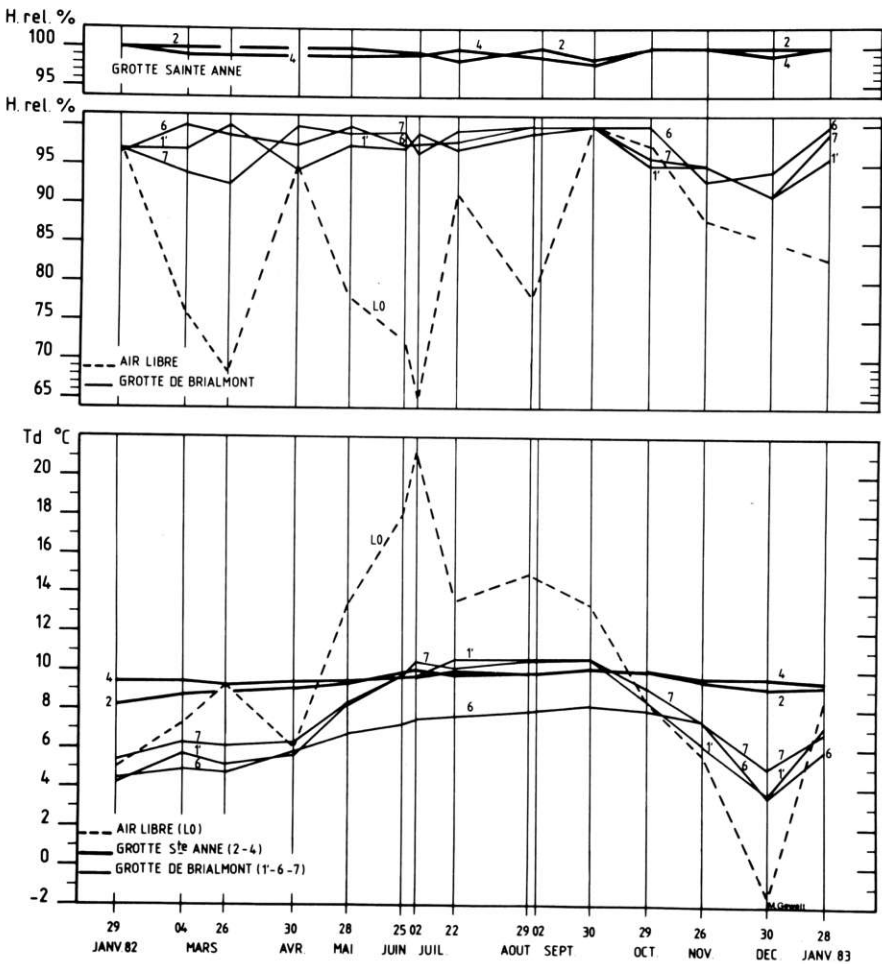


Figure 3.8 Evolution mensuelle de la température (Td) et de l'humidité relative (H. rel.) de l'air dans les grottes Ste-Anne et Brialmont

l'étage inférieur. En particulier, le point 7, situé presque sur une même verticale quelques mètres au-dessus du point 6 (Figure 3), a durant toute l'année une température plus élevée. Il existe donc une inversion de température permanente, le point 6 (galerie inférieure) ayant toujours une température plus basse par accumulation de l'air froid plus dense. Cette situation d'inversion thermique est plus marquée en été (plus de 2.5°C de différence) qu'en hiver. Cette situation micro-climatique influence bien évidemment les teneurs en CO₂. Ainsi,

le point G6 dans la galerie inférieure a toujours montré une teneur en CO_2 supérieure à son homologue G7 dans la galerie supérieure. Cette situation est particulièrement nette durant la période des maxima estivaux de teneur en CO_2 où la stratification du CO_2 par gravité est encore accentuée par la stratification thermique. L'inversion de température bloque en quelque sorte le CO_2 et l'air plus froid dans l'étage inférieur. Le comportement thermique de la grotte influence donc la répartition du CO_2 de l'air. La mesure au milieu de la grande échelle, effectuée le 30 septembre (G8, tableau 2) permet de préciser l'importance de la stratification. Cette mesure a donné 2000 ppm CO_2 , comme celle effectuée plus bas en G6. Au point situé dans la galerie supérieure (G7), nous avons mesuré 500 ppm. Ceci tend à démontrer que la couche d'air riche en CO_2 n'est pas uniquement localisée au ras du sol, mais qu'elle est présente sur près de la moitié de la hauteur de la grotte; les deux galeries sont en effet en communication, le plancher qui les séparerait à l'origine étant partiellement effondré (voir figure 3).

L'évolution longitudinale

Les données du tableau 3 concernant l'évolution longitudinale de la teneur en CO_2 dans la grotte Ste-Anne (mesures du 07/01/83) ont été reportées sur la Figure 9. L'augmentation des teneurs en CO_2 en fonction de la distance par rapport à l'entrée de la grotte est clairement mise en évidence sur cette figure. La droite de régression n°3 calculée sur l'ensemble des mesures ($y = 5.27 x + 563.27$) et le très bon coefficient de corrélation ($R = 0.96$) montrent bien l'existence d'une corrélation linéaire positive entre la teneur en CO_2 et la distance depuis l'entrée de la grotte. Dans un premier temps, on peut attribuer cette corrélation à l'augmentation du confinement et donc à la diminution de la ventilation vers la partie distale de la grotte. Cependant, l'examen de la Figure 9 permet de distinguer deux groupes de mesures séparés par un seuil d'environ 800 ppm. La première série de mesures (0 - 10) est proche de l'entrée et correspond à la partie sèche de la grotte; cette zone d'entrée s'étend sur environ les 160 premiers mètres de la grotte. Le gradient est d'abord assez faible (de 300 à 900 ppm) puis il augmente (les teneurs atteignent 1300 à 1500 ppm aux points 9 et 10 à 160 m de l'entrée). La droite de régression n°1 calculée avec les valeurs de ce premier groupe de mesures est $y = 4.69 x + 484.70$ ($r = 0.83$). Le second groupe de mesures (11 à 26) est séparé du premier par un seuil d'environ 800 ppm. La régression linéaire effectuée sur les mesures du second groupe fournit une droite d'équation $y = 2.58 x + 1717.65$ et un coefficient de corrélation $r = 0.89$. Le seuil observé coïncide avec la disparition du ruisseau souterrain dans l'étage inférieur (voir plan de la grotte Ste-Anne, Figure 2). Dès le point de mesure 11, on remonte le cours du ruisseau, la mesure étant toujours effectuée dans le réseau actif (point 11 à 26). Nous pensons pouvoir expliquer les teneurs en CO_2 plus fortes et surtout le décalage entre réseau sec et réseau actif par le dégagement de CO_2 dans l'eau. Celui-ci est maximum à l'amont (point 26 : 3200 ppm)

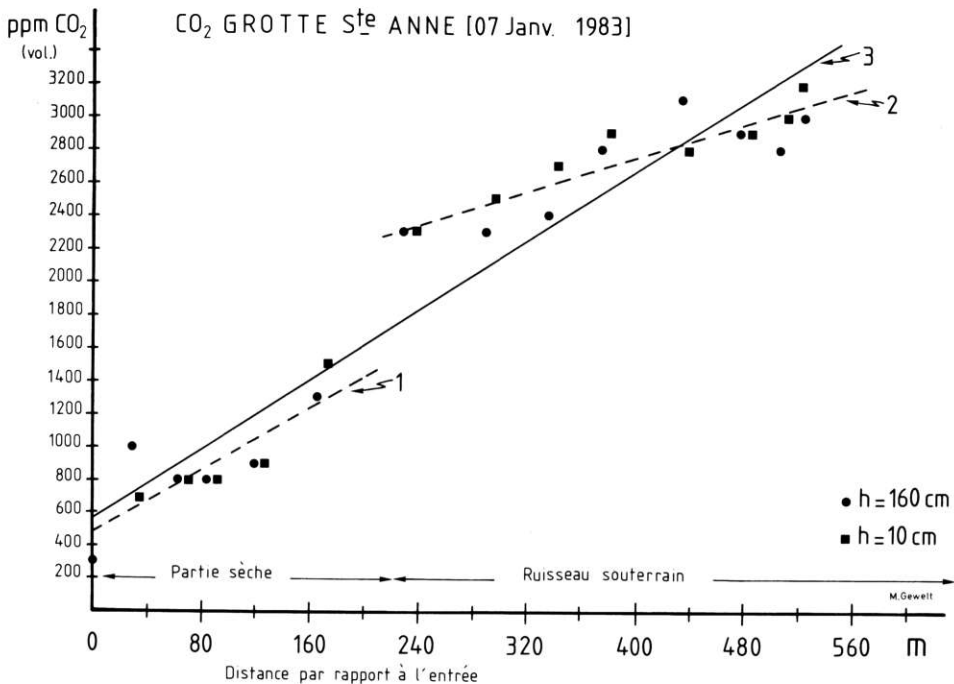


Figure 3.9 Corrélation entre la teneur en CO₂ et la distance par rapport à l'entrée de la grotte Ste-Anne. Droite de régression et coefficients de corrélation. 1 : $y = 4.7 x + 484.70$; $r = 0.83$. 2 : $y = 2.6 x + 1719.65$; $r = 0.89$. 3 : $y = 5.3 x + 563.27$; $r = 0.96$. h = hauteur des prélèvements d'air par rapport au sol

puis il se ralentit progressivement le long du parcours du ruisseau, en fonction de la loi de Nernst sur les vitesses de réactions. Ceci avait déjà été observé par C. Ek *et al.*, (1968) sur 5 mesures effectuées au-dessus de la rivière souterraine de la grotte de Remouchamps. Le ruisseau souterrain joue donc un rôle de fournisseur de CO₂ à l'atmosphère de la grotte, complémentaiement au CO₂ fournit par les fissures. Ce dernier provient d'une part de l'activité biologique dans le sol (avec le rythme saisonnier mis en évidence plus haut) et également de la transformation bactérienne et microbienne (oxydation) de la matière organique présente dans les fissures et les joints du sous-sol. Cette distinction entre air du sol (soil air) et air du sous-sol (ground air) en tant que sources distinctes de CO₂ a été discutée par T.C. Atkinson (1977) et étudiée dans le karst des Mendip Hills.

La série de mesures du 7 janvier 83 a été effectuée près du sol et à hauteur d'homme afin de rechercher la présence éventuelle d'une stratification de l'air. Dans environ la moitié des cas, les teneurs en CO₂ étaient égales à 10 cm du sol et à 160 cm. L'autre moitié des mesures montre des teneurs en CO₂ légèrement plus fortes près du sol et surtout près de la rivière (voir Figure 9). Dans ce dernier cas, la cause est probablement la proximité de la source de CO₂ (l'eau) plutôt qu'une stratification de l'air comme celle précédemment décrite à Brialmont. L'air est en effet brassé par le courant d'eau qui circule en général à une vitesse de plusieurs dm par seconde et comporte en certains endroits des petits rapides.

Les contaminations anthropiques

Les tableaux 1 et 2 indiquent par un ou plusieurs astérisques les mesures pouvant être trop élevées par suite d'une contamination par du CO₂ d'origine anthropique:

- + des visiteurs ont été rencontrés dans la grotte le jour de la mesure;
- ++ le masque absorbant est tombé en panne. Cet incident ne s'est produit que lorsqu'on utilisait des soupapes de petit diamètre;
- +++ des contaminations anthropiques ont été mesurées : deux mesures ont pu être effectuées soit avant et après le passage de visiteurs, soit à titre expérimental, en respirant à proximité des fissures, après avoir fait une première mesure avec le masque absorbant (voir Figure 4).

Il faut également souligner que dans les Figures 5 et 6, ces différentes sources d'erreur n'ont été reprises qu'avec un seul astérisque.

Pour tenter d'apprécier l'influence des visiteurs sur les teneurs en CO₂ mesurées et également pour vérifier l'utilité du dispositif absorbant de CO₂, un certain nombre de vérifications ont été effectuées. Ceci paraissait indispensable, notamment lorsque l'on sait que la concentration en CO₂ de l'air expiré par les êtres humains est d'environ 40 000 ppm (F.D. Miotke, 1974).

Dans la grotte Ste-Anne (le 26/03/82), la fissure F6 mesurée avec le masque absorbant avait une teneur de 3800 ppm. La même fissure après 5 minutes de respiration à environ 1 mètre du site de mesure avait une teneur de 5000 ppm, soit 1.3 fois plus.

Dans la grotte de Brialmont (le 21/01/82), mesure rapide de la fissure, sans masque, en évitant de respirer : 1000 ppm. La même mesure répétée après 6 expirations : 1900 ppm, soit une augmentation de 1.9 fois.

Au Trou Joney, à Comblain-au-Pont, cinq mesures ont été effectuées avec, puis sans masque absorbant de CO₂. Les trois premiers couples de mesures, faits dans un couloir d'environ 1 m² de section, ont montré que sans absorbant la teneur de l'air en CO₂ était presque doublée, passant de 1.18, 1.66 et 1.72 mg CO₂/l respectivement à 2.34, 3.12 et 2.88 mg/l; l'augmentation moyenne de la teneur est donc de 1.8 fois. A l'extrémité distale de la grotte, dans la salle terminale, les teneurs ont été passées de 2.03 et 2.32 mg/l à 5.96 et 6.46 mg/l lorsque l'opérateur a travaillé sans masque. Ceci représente une augmentation moyenne de la teneur de 2.9 fois: près du triple (mesures du 12/07/1969, C. Ek, inédit).

A la Grotte de Rochefort, au milieu de la vaste salle du Val d'Enfer, la teneur de l'air en CO₂, initialement de 2.30 mg/l (≈ 1260 ppm) est passée, après cinq heures de présence de trois opérateurs à 3.31 mg/l (≈ 1800 ppm), ce qui représente 1.4 fois la teneur initiale (mesures du 13/09/1969, C. Ek, inédit).

A la grotte Ste-Anne, le 28/05/82, on mesure dans la galerie (G4) 4000 ppm. Après le passage de 18 personnes (avec deux lampes à carbure), 20 minutes après, la teneur de l'air en CO₂ est passée à 4800 ppm, soit une augmentation de 1.2 fois.

A la grotte (touristique) de Remouchamps, B. Mérenne-Schoumaker (1975) a observé, en compagnie de C. Ek, que le passage d'un groupe d'une vingtaine de touristes provoque en moyenne, dans les couloirs étroits, une augmentation instantanée de l'ordre de 0.25 mg CO₂/l (≈ 140 ppm), ce qui représente une hausse directe de 6% de la teneur en CO₂ initiale. La variation quotidienne due au passage des touristes en saison est beaucoup plus importante, de l'ordre de 1.5 mg/l (≈ 820 ppm), soit une augmentation de près de 30%.

On a donc montré ici que l'influence du CO₂ d'origine anthropique est non négligeable dans les mesures de la teneur de l'air en CO₂. L'augmentation de la teneur initiale varie en général de 20 à 90% mais peut parfois atteindre près du triple de la teneur en CO₂ initiale dans les endroits très confinés. Les facteurs qui entrent en ligne de compte sont nombreux et on peut par exemple citer : la configuration de la grotte (confinement et ventilation); le nombre de personnes présentes; la fréquence des visites et leur durée.

Les exemples de contamination anthropique mesurée présentés ci-dessus nous conduisent à affirmer la nécessité d'effectuer les

mesures de teneur en CO₂ de l'air avec un dispositif absorbeur de CO₂, en tous les cas dans les endroits très confinés et dans les fissures. Si cette précaution n'est pas prise, les résultats obtenus fournissent des valeurs beaucoup trop élevées (20 à 90% d'augmentation et davantage).

D'autre part, la présence d'un groupe de visiteurs influence également les teneurs, principalement dans les galeries peu spacieuses. Ce type de contamination pouvant difficilement être évité, il conviendrait probablement de retrancher aux mesures effectuées en période de forte fréquentation spéléologique une sorte de bruit de fond. Celui-ci est assez difficile à évaluer, d'autant plus que la teneur en CO₂ de l'air, augmentée par le CO₂ anthropique, ne redescend pas rapidement à sa valeur antérieure (C. Ek *et al.*, 1981).

Les pics significatifs devraient sans doute être moins élevés si aucune contamination ne se produisait. C'est principalement durant la période estivale que nous avons rencontré le plus de visiteurs. Le pic du CO₂ anthropique s'ajoute donc au pic du CO₂ lié au rythme de la végétation (avec les retards que nous avons décrits). Pour nous affranchir de cette composante humaine dans nos mesures, nous prévoyons d'installer un compteur de personnes électronique à l'entrée des grottes étudiées.

Remarquons enfin que les fortes teneurs observées en été dans les galeries de la grotte Ste-Anne dépassent les normes admises par l'American Conference of Governmental Industrial Hygienists (A.C.G.I.H., 1981, cité par la firme Gastec). Ces normes, utiles pour le spéléologue, sont les suivantes:

Valeur limite moyenne en fonction de la durée;
5000 ppm CO₂ pendant 7-8 heures.

Valeur limite en cas de courte exposition;
15 000 ppm pendant 15 minutes.

Il importe de rappeler que le CO₂ n'est pas un gaz toxique, c'est plutôt la déficience en oxygène qui peut être nocive. Les fortes teneurs mesurées à Ste-Anne ne sont pas dangereuses pour autant que la durée d'exposition n'excède pas quelques heures.

Comparaison avec d'autres grottes belges

Diverses grottes belges ont déjà été l'objet d'analyses du CO₂ atmosphérique; la Grotte de Comblain-au-Pont, celle de Rochefort, celle de Floreffe (C. Ek *et al.*, 1968), celle de Remouchamps (F. Delecour *et al.*, 1968; B. Mérenne-Schoumaker, 1975), la Grotte Lyell (à Engis), la Grotte du Père Noël (à Wavreille), la Grotte de Hohière, la Grotte Ste-Anne (à Tilff) et celle de Han (F. Delhez, 1972), et le Trou Joney à Comblain-au-Pont (C. Ek, 1979). Environ 350 mesures sont citées dans les cinq publications reprises ci-dessus, sans compter des mesures encore inédites faites par l'un de nous (C. Ek) au Trou Joney, à la Grotte de Rochefort et à la Grotte Lyell.

Les valeurs absolues sont, dans toutes les grottes belges déjà étudiées, systématiquement supérieures à celle de l'atmosphère libre, mais jamais supérieures aux valeurs maximales de 9000 ppm observées à Ste-Anne.

Les variations saisonnières avaient déjà été mises en évidence au Trou Joney (C. Ek, 1979), mais avec beaucoup moins de finesse quant à l'évolution des teneurs. A la Grotte de Remouchamps, une différence avait aussi été notée entre l'été et l'hiver (B. Mérenne-Schoumaker, 1975, Figure 5), mais sans qu'il fût possible, dans cette cavité touristique, de distinguer l'influence des visiteurs du rythme saisonnier naturel.

Les variations spatiales peuvent être envisagées à deux points de vue principaux, suivant que l'on considère les variations dans une direction verticale ou le long d'un parcours horizontal.

Les variations verticales, liées à la profondeur ou à la distance au sol végétal, avaient été mises en évidence à la Grotte de Rochefort et à l'Abîme de Comblain-au-Pont (C. Ek *et al.*, 1968; F. Delecour *et al.*, 1968). L'existence d'un gradient conforme à la densité, mais aussi au confinement, avait été mise en évidence à Comblain. La fourniture de CO₂ par les fissures et sa descente progressive dans la grotte par diffusion avait été établie à Rochefort et à Florefe (C. Ek *et al.*, 1968). Ceci a été confirmé en 1969 par des mesures (inédites) de C. Ek à Rochefort, puis par F. Delhez (1972), dans diverses cavités belges; celui-ci a montré aussi la teneur parfois forte au ras du sol dans des fissures de dessiccation de l'argile où certaines araignées tissent leur toile.

Enfin, les variations le long d'un parcours subhorizontal ont été mises en évidence dans plusieurs grottes également. A Remouchamps (C. Ek *et al.*, 1968), elles ont été attribuées au fait qu'un cours d'eau souterrain riche en CO₂ dissous diffusait ce CO₂ dans l'air de la grotte (cinq mesures prises à 20 cm au-dessus de l'eau et réparties sur un parcours souterrain de plus de 600 m). B. Mérenne-Schoumaker (1975) a observé un semblable gradient, dans la même grotte, le long des galeries (sèches) de l'étage supérieur. Elle n'en donne pas d'interprétation mais dans l'ensemble le phénomène semble lié au plus grand confinement des parties distales de la grotte, où le CO₂ fourni par les fissures d'une part et par le cours d'eau souterrain d'autre part s'évacue moins facilement.

Comparaison avec des grottes d'autres pays

Aux 42 mesures inédites et aux quelque 350 mesures déjà publiées pour la Belgique, le présent travail en ajoute 237. Les 629 mesures ainsi effectuées vont de 300 à 7000 ppm de CO₂ dans les salles et galeries et atteignent 9000 dans certaines fissures. En Angleterre, T.C. Atkinson (1977) note des valeurs comparables; sur 33 mesures à G.B. Cave, la moyenne s'établit à 4100 ppm dans les galeries, et dans les fissures à 8200 ppm, avec des maxima de 16 000 dans les fissures.

Des chiffres beaucoup plus faibles ont été trouvés dans des régions froides (en Pologne, au Canada et en Suède) mais aussi dans certaines grottes de pays tempérés (France, Kentucky, Italie).

Dans les Carpathes polonaises, on a trouvé à la fonte des neiges dans quatre grottes des valeurs allant de 200 à 1100 ppm, et un maximum de 2000 ppm dans une fissure (40 mesures, C. Ek *et al.*, 1969).

Au Québec, les salles et galeries donnent des valeurs allant de 400 à 1100 ppm. Les fissures atteignent une teneur de 2800 ppm en été (200 mesures); C. Ek, 1981; C. Ek *et al.*, 1981).

En Laponie suédoise, les valeurs mesurées en juillet 1982 vont de 200 à 850 ppm, cette dernière dans une fissure (36 mesures, C. Ek, inédit).

Dans les Pyrénées françaises, la grotte de Moulis présente des valeurs allant de 200 à 4400 ppm (P. Renault, 1982).

Au Kentucky, les teneurs observées dans les salles et galeries vont de 400 à 800 ppm en été, de 400 à 600 en hiver. Les fissures peuvent atteindre 1300 ppm (F.-D. Miotke, 1974).

En Italie du Nord, une grotte des Alpes ligures montre en septembre des teneurs de 400 à 800 ppm. Un maximum de 1500 est observé dans une fissure (24 mesures, M. Gewelt et C. Ek, 1983).

Quelques auteurs, par contre, rapportent des teneurs beaucoup plus élevées qu'en Belgique. Des pressions partielles de CO₂ importantes ont été relevées dans certaines grottes de France, d'Iowa et d'Ukraine.

En France, des mesures allant de 200 à 66 000 ppm, et fréquemment supérieures à 5000 ppm, sont citées par P. Renault (1982).

En Iowa, le dioxyde de carbone d'une grotte située sous des cultures a une concentration de 5000 à 25 000 ppm. Ces fortes teneurs sont attribuées à l'abondance de matières organiques dans la grotte même (W.C. Lewis, 1981).

En Ukraine, des valeurs de 500 à 40 000 ppm sont notées dans une grotte, et sont également mises en relation avec de la matière organique et la production et l'oxydation de méthane (A.B. Klimchuck *et al.*, 1981).

CONCLUSIONS

Les mesures de la teneur en CO_2 de l'air dans les grottes Ste-Anne et Brialmont ont révélé des teneurs comprises entre 300 et 7000 ppm dans les galeries, mais pouvant atteindre 9000 ppm dans les fissures. L'évolution saisonnière de ces teneurs montre que le CO_2 diffuse progressivement du sol vers la profondeur du massif. La teneur observée à quelques mètres sous le sol passe par un maximum en mai-juin, maximum qui se propage en plusieurs mois vers le bas des cavités karstiques.

Des mesures faites tout au long de la grotte Ste-Anne ont montré une très bonne corrélation linéaire positive entre la teneur de l'air en CO_2 et la distance à l'entrée. De plus, ces données ont confirmé le rôle joué par l'eau du ruisseau souterrain comme fournisseur de dioxyde de carbone à l'atmosphère de la grotte, complémentairement au CO_2 du sol.

Des contaminations par du gaz carbonique anthropique ont été mises en évidence, et nous avons montré la nécessité, en particulier dans les endroits confinés, de prendre des précautions spéciales pour éviter que la seule présence de l'observateur fausse la mesure. L'usage d'un absorbeur de CO_2 pour éliminer le dioxyde de carbone expiré s'est révélé indispensable, par exemple, dans les mesures faites dans les fissures.

Les autres grottes de Belgique auxquelles nous avons pu comparer les grottes étudiées montrent les mêmes phénomènes, mais qui n'avaient jamais encore été mis en évidence avec autant de certitude. Dans d'autres pays, les teneurs observées sont fréquemment plus basses, en particulier dans les régions froides. Dans diverses grottes françaises et dans certaines cavités de l'Iowa et d'Ukraine, les teneurs sont au contraire parfois nettement plus élevées. Dans les deux dernières régions citées, les teneurs très fortes sont attribuées à des activités organiques particulièrement intenses.

Remerciements

Nous remercions le F.N.R.S. dont des crédits de recherche accordés au Professeur A. Pissart et à C. Ek ont contribué à financer nos campagnes d'analyses.

Nous exprimons aussi notre gratitude au Professeur A. Pissart dont les avis ont toujours constitué un encouragement dans notre travail.

Les prélèvements ont été effectués avec le concours de Mme N. Lousberg, technicienne-chimiste à notre Laboratoire. Les mesures ici présentées doivent beaucoup à son zèle et à son endurance.

REFERENCES

- Atkinson, T.C. 1975. Carbon dioxide in the atmosphere of the unsaturated zone : an important control of groundwater hardness in limestones. *12th I.A.H. Congress, Alabama, Abstract*, 498.
- Atkinson, T.C. 1977. Carbon dioxide in the atmosphere of the unsaturated zone: an important control of groundwater hardness in limestones. *J. of Hydrology*, **35**, 111-123.
- Delbrouck, R. *Atlas des grottes de Belgique*. tome 4, (Setek, Namur.)
- Delecour, F. 1965. Détermination des activités biologiques par la méthode de Koepf. Standardisation et essai de la technique du dosage du CO₂. *Note de recherche n°2, Centre d'Ecopédologie forestière, Gembloux*.
- Delecour, F., Ek, C. et Weissen, F. 1968. An electrolytic field device for the titration of CO₂ in air. *Nat. Speleol. Soc. Bull.*, **30**, 131-136.
- Delhez, F. 1972. La teneur en CO₂ dans les biotopes des divers arthropodes troglobies terrestres de la faune belge. *L'Electron*, **1**, 39-49.
- Ek, C. 1961. Conduits souterrains en relation avec les terrasses fluviales. *Ann. Soc. Géol. Belg.*, **84**, 313-340.
- Ek, C. 1962. La genèse d'une cavité polycyclique. La grotte Ste-Anne à Tilff. *Rassegna Speleologica Italiana*, **14**, 1-11.
- Ek, C., Delecour, F. et Weissen, F. 1968. Teneur en CO₂ de l'air de quelques grottes belges. *Ann. Spéléol.*, **23**, 243-257.
- Ek, C., Gilewska, S., Kaszowski, L., Kobylecki, A., Oleksynowa, K. et Oleksynówna, B. 1969. Some analyses of the CO₂ content of the air in five Polish caves. *Zeit. für Geomorph.*, **13**, 267-286.
- Ek, C. 1979. Variations saisonnières des teneurs en CO₂ d'une grotte belge: le Trou Joney à Comblain-au-Pont. *Ann. Soc. Géol. Belg.*, **102**, 71-75.
- Ek, C. 1981. Mesures de CO₂ dans l'air des grottes: comparaison Québec-Belgique. *Eighth Internat. Congress of Speleology, U.S.A.*, **2**, 672-673.
- Ek, C., Caron, D. et Roberge, J. 1981. La forte teneur en gaz carbonique de l'air d'une cavité du Québec: la grotte de Saint-Léonard, île de Montréal. *Naturaliste can.*, **108**, 57-63.
- Forel, M. 1865. Visite à la Grotte des Fées. *Bull. Soc. vauvoise Sc. nat. Lausanne*, **8**, 247.

