

VARIATIONS SAISONNIERES DU CO₂ DE L'AIR DE DEUX GROTTES DU JURA MERIDIONAL: LA BALME ET CERDON. COMPARAISON AVEC D'AUTRES GROTTES FRANCAISES

Abdelkader SBAI¹, Camille EK² & Philippe RENAULT³

(6 figures & 3 tableaux)

1. *Laboratoire de Géomorphologie et d'étude du Quaternaire, Université des Sciences et Technologies de Lille I (France) et Département de Géographie physique et de Géologie du Quaternaire (Belgique);*
2. *Département de Géographie physique et de Géologie du Quaternaire, Univ. de Liège, place du XX Août, 7, B-4000 Liège (Belgique);*
3. *Rue Jamen-Grand, 7, 69300 Caluire.*

RESUME. Des mesures saisonnières de la teneur de l'air en CO₂ ont été effectuées pendant une année dans deux grottes du Jura méridional: les grottes de la Balme et du Cerdon. Les teneurs mesurées varient de 300 à 15.500 ppm; ces faibles valeurs sont corrélées avec la circulation de l'air dans les deux grottes et avec les sources du CO₂. Les valeurs trouvées dans ces deux grottes sont ensuite comparées avec les teneurs observées dans d'autres grottes françaises.

MOTS-CLÉS: gaz carbonique, grottes, France, Jura méridional.

ABSTRACT. *Seasonal variations of carbon dioxide in two caves from south Jura: La Balme and Cerdon, a comparison with other French caves.* Seasonal measurements of carbon dioxide were made over a period of one year in two caves from southern Jura: the caves of La Balme and of Cerdon. Carbon dioxide contents range from 300 to 15,500 ppm; these low values are correlated with the circulation of the air in the two caves and with the origin of the carbon dioxide. The values found in these caves are then compared with those measured by researchers in other French caves.

KEYWORDS: carbon dioxide, caves, France, southern Jura.

1. INTRODUCTION

Le facteur essentiel de la dissolution des calcaires est, le plus souvent, le gaz carbonique (Roques, 1959). C'est dire l'importance dans les phénomènes karstiques. Son étude présente un grand intérêt biologique: le CO₂ provient en très grande partie du métabolisme de la biomasse et, en retour, la teneur en CO₂ 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 du CO₂ en grotte datent d'il y a bien longtemps (voir par exemple Forel, 1865). Mais c'est à une vingtaine d'années seulement que remonte la systématisation des analyses dans ce milieu (Ek *et al.*, 1968; Renault, 1968; Miotke, 1974; Atkinson, 1975, 1977; James, 1977; Renault, 1979) et c'est au cours des dernières années que les mesures ont pris une grande extension (Ek, 1981; Ek *et al.*, 1981; Ek & Gewalt, 1985; Klimchuck *et al.*, 1981; Lewis, 1981; Renault, 1981, 1982; Gewalt & Ek, 1983, 1986; Massen, 1992).

La présente note est basée sur 79 mesures effectuées en 1992 et 1993 dans les grottes de la

Balme et du Cerdon. Ces mesures ont été faites à une échelle saisonnière à des endroits précis. Il nous a paru utile de présenter les données déjà obtenues. Enfin, on a comparé ces teneurs en CO_2 aux teneurs obtenues dans d'autres grottes françaises.

2. PRESENTATION DES GROTTES ETUDIEES

2.1. LA GROTTTE DE LA BALME (FIG. 1)

Cette grotte est creusée dans les calcaires du Jurassique supérieur; elle s'ouvre vers l'WNW dans une paroi abrupte à l'altitude de 210 m et se pré-

sente comme une cavité plutôt subhorizontale, longue de 3.100 m. Entre l'entrée principale et la salle de La Grande Coupole, la cavité se développe sur 100 m à peu près. Le porche de la grotte a une hauteur de presque 35 m (x 13 m). De part et d'autre de ce porche, se développe un labyrinthe de galeries. De la salle de la Coupole vers l'Est, on trouve la galerie du ruisseau souterrain et la résurgence supérieure; vers le Sud, on trouve la galerie «géante» du Moine, surmontée de la petite galerie des Chauves-souris. Le réseau noyé a été plongé sur 1.370 m (1980). La longueur totale est de presque 3.100 m en 1981 (Chabert, 1981).

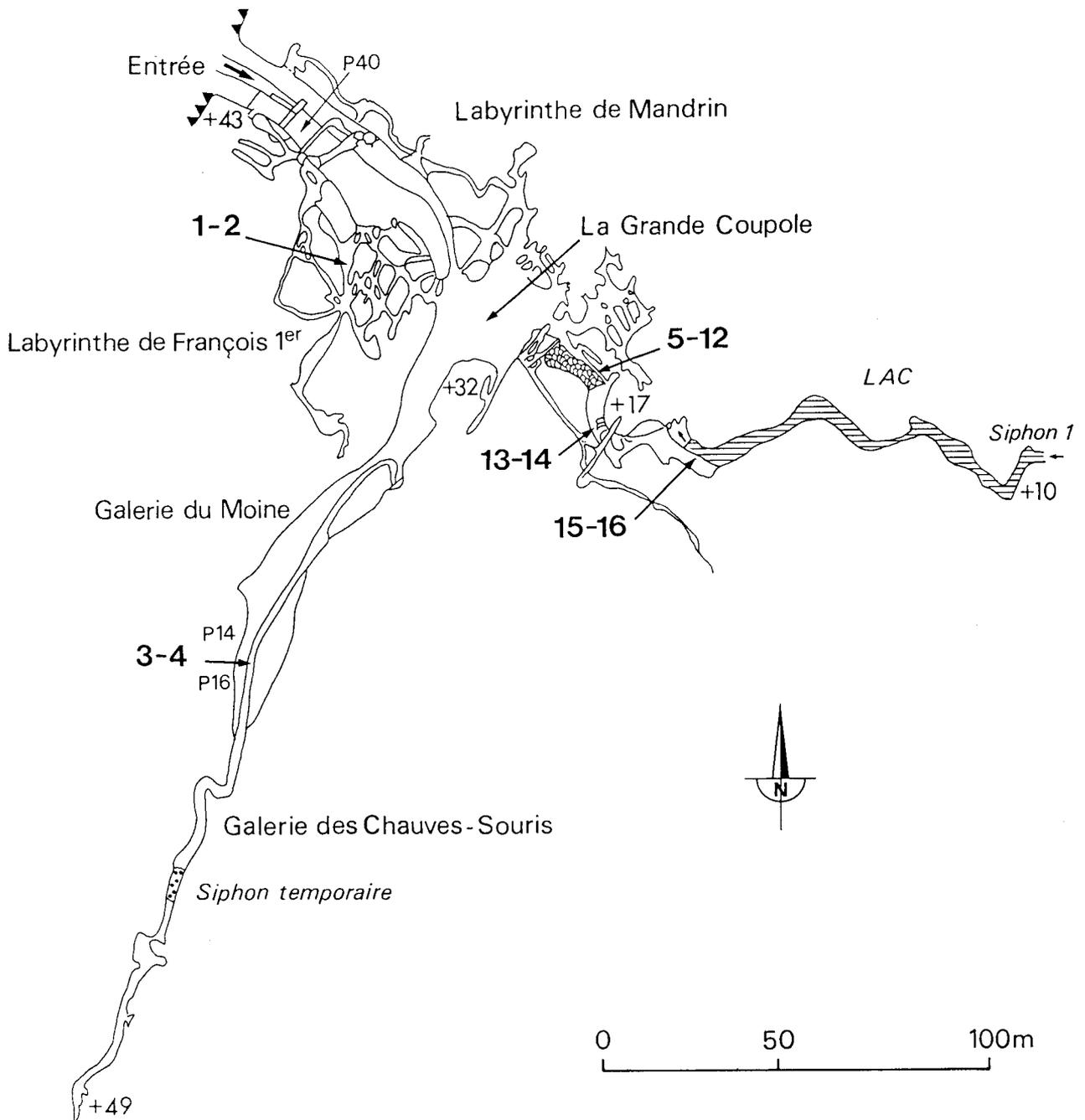


Figure 1. Plan de la grotte de la Balme (La Balme-les-Grottes, Isère) et emplacement des points de mesures (topo F.J.S., habillage d'après le fond topographique du G.R.E.F.F. Vénissieux, cotes altimétriques d'après Andra, 1992b). Les chiffres en gras renvoient aux mesures de CO_2 .

On observe peu de traces de dissolution, il s'agit donc bien d'une grotte à voûte mécanique. La grande salle par exemple a une orientation parallèle aux grandes fractures. Sur les parois, à l'intérieur de la grotte, on observe de la calcite biochimique (mondmilch); ce sont des parois typiques des grottes chaudes.

Dans la partie interne de la grotte, les dépôts les plus visibles sont des blocs effondrés parfois énormes. Quelques dépôts morainiques probablement remaniés peuvent être observés par endroit.

Enfin, l'orientation de l'escarpement dans lequel se développe la grotte (NNE-SSW) détermine ses caractéristiques atmosphériques: grotte chaude.

2.2. LA GROTTA DU CERDON (FIG. 2)

Cette grotte s'est développée dans les calcaires du Jurassique supérieur (Portlandien/Kimméridgien) à l'altitude de 580 m. C'est une grotte colmatée, autrefois empruntée par une rivière drainant le synclinal de Ceignes. Depuis l'endroit où la rivière pénétrait sous terre (perte) jusqu'à sa sortie dans la vallée, elle parcourt quelques centaines de mètres. La morphologie dominante est celle d'un long couloir (avec par endroit des salles) creusé par l'eau courante, avec la présence de formes telles que des coups de gouge d'une longueur d'onde de 20 à 30 cm, des lapiés en rigoles, des marmites renversées au plafond... Un puits s'ouvre dans la partie inférieure, menant vers le bas de la falaise de la reculée. Ses galeries sont aux décors multiples singularisées par la statue cambodgienne, le Dais, des gours... conduisant à l'immense salle de la Fromagère.

Par l'ancien siphon de la rivière souterraine, colmaté par des éboulis au cours des millénaires et dégagé en 1981, on débouche en pleine falaise de

reculée dans un refuge fréquenté dès la préhistoire: la «Cabourne Chopêtre».

Contrairement à la grotte de la Balme, cette grotte est une grotte ouverte à deux entrées opposées et se caractérise par des températures basses (grotte froide).

3. METHODE

Les dosages du CO₂ ont été effectués avec un détecteur de gaz GASTEC. Cet appareil est constitué d'une pompe manuelle à piston qui aspire 100 ml d'air à travers un tube réactif contenant un indicateur coloré. La teneur de l'air en dioxyde de carbone est lue directement en ppm (par volume) et elle correspond à la longueur de la zone ayant viré de couleur. Pour les faibles teneurs en CO₂, de 300 à 5.000 ppm, on utilise les tubes réactifs 2LL (extra low range) et pour les teneurs plus élevées, les tubes low-range (2L) permettant de mesurer de 2.500 à 30.000 ppm (0,25 à 3% vol.). Avec les deux modèles de tube réactif, le CO₂ réagit avec l'hydrazine: $\text{CO}_2 + \text{N}_2\text{H}_4 \rightarrow \text{NH}_2\text{-NH}\cdot\text{COOH}$, réaction qui décolore un indicateur redox en violet (Gewelt & Ek., 1986). La précision minimale garantie par le constructeur est de 25%, mais l'étalonnage de l'appareil montre une précision supérieure et une reproductibilité des mesures à 10% près (Ek *et al.*, 1981). Le temps nécessaire pour une mesure est de 2 ou 3 minutes, suivant le tube réactif utilisé.

La pompe à soufflet DRÄGER, basée sur le même principe de la coloration de tubes indicateurs, est très généralement utilisée en Allemagne (Miotke, 1974) et en France (Renault, 1982).

Dans un certain nombre de cas en France, les dosages ont été réalisés à l'analyseur Zeiss infrarouge, léger, peu encombrant et d'utilisation facile, mais l'évaluation des teneurs s'effectue par la lec-

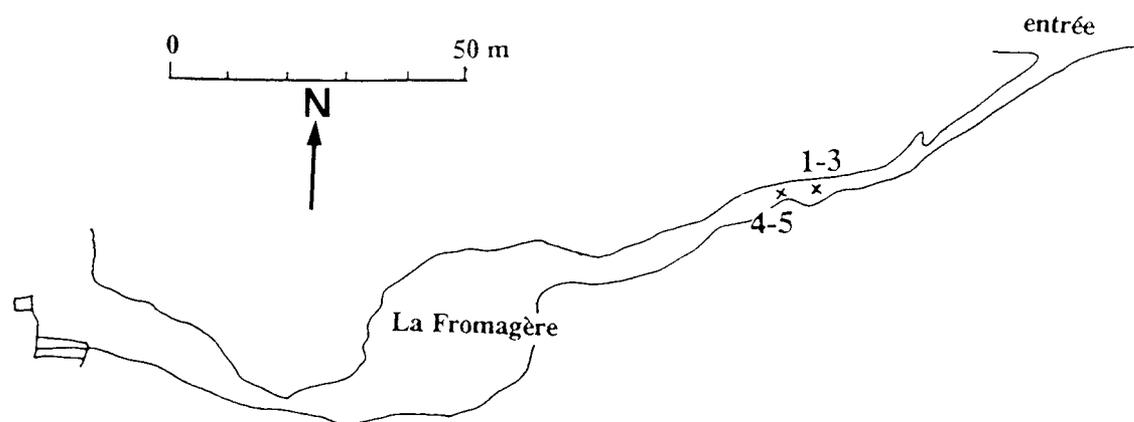


Figure 2. Plan de la grotte du Cerdon (d'après l'inventaire spéléologique de l'Ain) et emplacement des points de mesures.

Tableau 1. Teneur de l'air en gaz carbonique aux grottes de la Balme (La Balme-les-Grottes).
Carbon dioxide in La Balme cave (La Balme-les-Grottes).

N°	Localisation	CO ₂ en ppm				
		24/07/1992	10/10/1992	07/02/1993	29/05/1993	
1	Derrière la salle François Ier	325	325	325	325	
2	Dans la même salle en montant l'escalier au plafond de la petite voûte	500	600	500	625	
3	Grande Fontaine:	au-dessus de la surface d'eau principale	400	500	400	450
4		au-dessus du gour à quelques cm du plafond	650	650	600	600
5	Avant la salle du lac:	au pied du gour, à 20 cm du sol	800	4000	450	6000
6		au milieu, juste au-dessus de l'eau	1000	3000	450	4200
7		au-dessus de la surface de l'eau au milieu du gour	1500	3000	500	1100
8		niveau supérieur du gour	1100	3000	700	2000
9		au plafond, au-dessus du gour	500	3000	1000	750
10	A quelques mètres du site précédent:	à 10 cm de la surface de l'eau	900	5000	500	9000
11		à 50 cm de la surface de l'eau	900	5000	500	7500
12		au plafond	900	5000	1000	6750
13	Dernier rétrécissement, 25 m avant la salle du lac	à 25 cm au-dessus de la surface d'eau	10000	10000	5000	7500
14		à 10 cm du plafond	11000	11000	5000	7000
15	Salle du lac	à 50 cm du sol	14500	14500	5000	15000
16		en remontant le cours d'eau en barques sur une dizaine de mètres à 50 cm au-dessus de l'eau	14500	14500	7500	15500
17	A l'extérieur de la grotte	350	350	300	350	

Tableau 2. Teneur de l'air en gaz carbonique aux grottes du Cerdon.
Carbon dioxide in Cerdon cave.

N°	Localisation	CO ₂ en ppm		
		24/07/1992	11/10/1992	30/05/1993
1	Dans la galerie qui mène à la salle des Couleurs, 5 m avant cette salle au pied de la "Tête" à 50 cm au-dessus d'un gour	3000	700	1000
2	Dans une fissure proche du gour	4000	700	1500
3	A 10 cm au-dessus du gour	800	800	1200
4	Dans le petit gour situé à gauche du chemin juste après la table calcaire à 10 cm au-dessus de l'eau	3100	1200	1450
5	Au milieu de la galerie au même endroit à 50 cm du sol	3200	500	1400
6	A l'extérieur de la grotte	400	350	450

ture sur cadran gradué en échelle arithmétique. Les teneurs inférieures à 0,2% ne peuvent être appréciées (Renault, 1982).

Antérieurement, le dosage du CO₂ de l'air était effectué par électrolyse d'une solution de NaCl ayant absorbé le CO₂ d'un échantillon d'air (Koepf, 1952; Hilger, 1963; Delecour, 1965; Ek *et al.*, 1968; Delecour *et al.*, 1968). Cette méthode offre une meilleure précision: 0,1 mg CO₂/l, soit environ 60 ppm (Ek, 1981), mais elle est nettement plus longue et plus lourde à mettre en oeuvre. L'appareillage nécessaire en dosage pèse plus de 10 kg contre moins de 0,5 kg pour le détecteur GASTEC.

4. RESULTATS ET DISCUSSION

Quatre séries de mesures ont été effectuées en été 1992 (temps sec et chaud), en automne 1992

(temps pluvieux), en hiver 1993 (temps froid et sec) et au printemps 1993 (temps pluvieux, orage de fin de printemps). Les tableaux 1 et 2 fournissent une description des endroits de prélèvement et la hauteur (H) par rapport au sol des salles et galeries ainsi que les teneurs observées. La majorité des mesures sont faites à hauteur d'homme (170 < h < 200 cm), à 50 cm de hauteur et au niveau du sol (5 < h < 20 cm).

4.1. LES GROTTES DE LA BALME

En juillet, la teneur de l'air atmosphérique extérieur est de 300 ppm à la sortie de la grotte. Dans la grotte, les teneurs varient de 325 ppm dans la salle François Ier (salle ventilée) à 14.500 ppm dans la salle du lac non ventilée et en position basse (le CO₂, gaz lourd, s'y accumule). Les teneurs des fissures ou des gour sont en général plus fortes que celles des galeries (les fissures représentent alors

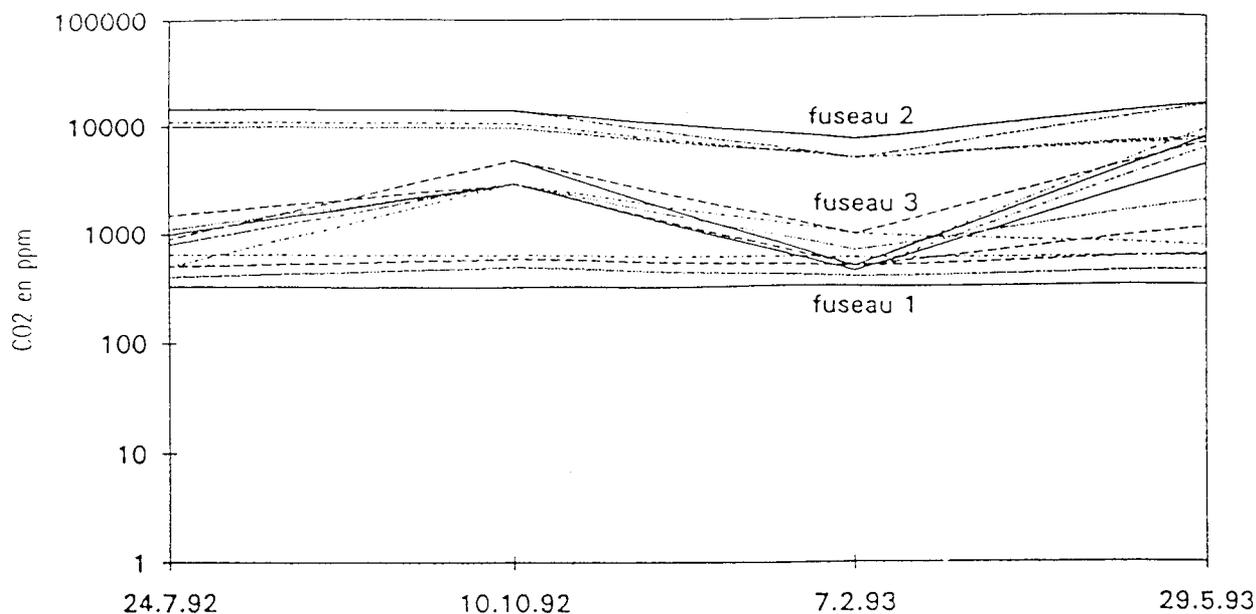


Figure 3. Grotte de la Balme: variations saisonnières du CO₂ de l'air.

la voie d'accès du CO₂ du sol dans les grottes) à l'exception de la salle du lac. Les valeurs élevées dans cette salle suggèrent l'existence d'un flux de CO₂ apporté par le cours d'eau souterrain. Donc ce ruisseau est une autre source d'apport de CO₂ à l'air de la cavité. Dans l'ensemble, on constate une légère croissance vers le fond de la grotte. Cette arrivée du CO₂ par le ruisseau suppose des implications sur la régénération de potentiel de dissolution.

En octobre, les mesures effectuées dans les mêmes sites s'échelonnent de 300 à 14.500 ppm. Ces teneurs sont souvent plus fortes que celles enregistrées en juillet, mais aucune mesure ne montre une teneur supérieure à la teneur admissible. Les teneurs dans la salle du lac sont restées les mêmes pendant les deux saisons.

En hiver, les teneurs varient de 325 à 7.500 ppm. Elles sont beaucoup plus faibles par rapport aux teneurs des deux saisons précédentes. Notons cependant, que ces mesures ont été faites le premier jour de l'ouverture de la grotte après une fermeture de deux mois à peu près. Ceci exclut toute contamination de l'air de la cavité par le CO₂ respiratoire. Ces faibles valeurs reflètent un minimum d'activité de la biomasse en hiver.

Au printemps, les teneurs varient de 325 à 15.500 ppm et dépassent parfois celles observées en automne. Le fait marquant cette fois-ci est la diminution du CO₂ du bas vers le haut.

La présentation de toutes ces teneurs sur un même graphique montre trois fuseaux de CO₂ dans cette grotte (fig. 3).

a) Une série à teneurs faibles et homogènes au cours des quatre saisons (sites 1, 2, 3, 4); ces sites sont bien aérés.

b) Une série à teneurs élevées et homogènes au cours des quatre saisons (sites 13, 14, 15, 16); cette zone se caractérise par une nappe de CO₂ acheminée par le ruisseau souterrain.

c) Une série à teneurs qui varient d'une saison à l'autre (sites 5 à 12) avec des teneurs plus élevées en mai et en octobre et des teneurs plus faibles en février et en juillet. Ces variations sont dues au fait que parfois ce sont les gours qui fournissent le CO₂ et parfois ce sont les fissures.

Avant la salle du lac (fig. 4A), des mesures à diverses altitudes permettent de mettre en évidence une stratification du CO₂ (fig. 4B). En mai, les teneurs sont très élevées au pied du gour (6.000 ppm) et diminuent très rapidement jusqu'à 1.100 ppm (point 7) et 750 ppm au plafond (point 9). En hiver, c'est plutôt l'inverse qui se produit: les valeurs les plus élevées sont celles observées vers le haut. On note une décroissance du CO₂ du haut vers le bas. En juillet, on observe une augmentation du bas vers le haut (1.500 ppm au point 7) puis une décroissance vers le haut (la valeur la plus faible est celle mesurée au plafond: 500 ppm). Enfin, en octobre, les teneurs sont homogènes avec toutefois une valeur élevée au pied du gour (4.000 ppm).

Ces mesures paraissent curieuses (stratification inverse à celle que l'on pourrait attendre). Mais elles sont dues à la présence de la cascade.

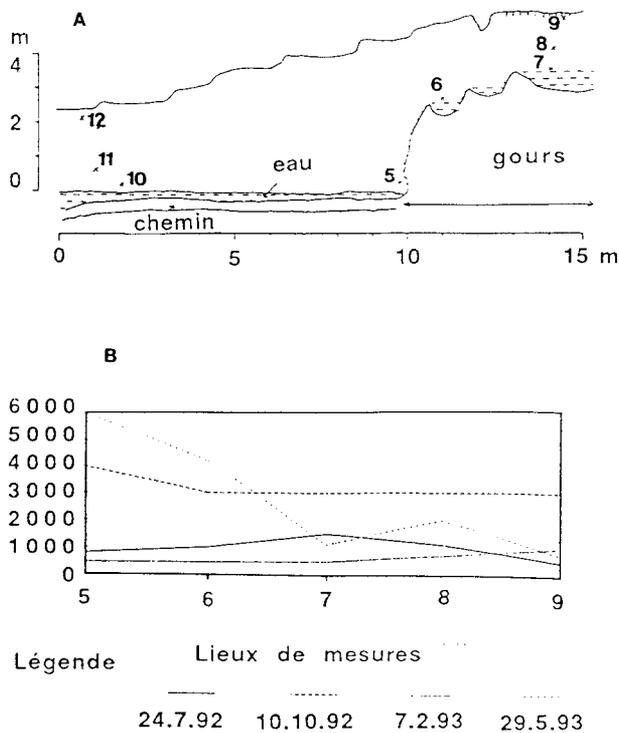


Figure 4. Grotte de la Balme: le secteur des gours avant la salle du Lac: A. coupe et emplacements des points de mesures; B. variations verticales de la teneur en CO_2 des points de mesure 5 à 9.

4.2. LES GROTTES DU CERDON

En juillet, la teneur de l'air extérieur sur le plateau à proximité de l'entrée de la grotte, est de 400 ppm. Les valeurs de CO_2 varient entre 800 (mesure 3) et 4.000 (mesure 2). Cette teneur maximale est dix fois supérieure à la teneur de l'air atmosphérique extérieur, mais est sept ou huit fois inférieure au seuil des teneurs admissibles. Vu que la teneur moyenne dans la galerie est 3.000 ppm (mesure 1) et que la teneur à 10 cm au-dessus du gour est

800 ppm (mesure 3), c'est bien la fissure qui a fourni le gaz carbonique ce jour-là (mesure 2). La fissure transmet le gaz carbonique qui vient du sol où il est fabriqué par les plantes et leurs racines.

En octobre, les teneurs varient entre 500 et 1.200 ppm; elles sont beaucoup plus faibles par rapport aux teneurs du 24 juillet, phénomène tout à fait inverse à ce qu'on a pu observer aux grottes de la Balme. Ceci est sans doute dû à l'influence des types de temps.

Ces valeurs élevées en été sont-elles dues à l'influence humaine? Il pourrait y avoir contamination de l'air par le CO_2 respiratoire. En fait, en été, plusieurs visites sont organisées par jour. Notons cependant, que cette fois-ci c'est le gour qui transmet du CO_2 (800 ppm). Au petit gour, on a enregistré une teneur de 1.200 ppm, alors qu'en été nous avons noté que c'était plutôt la fissure: 4.000 ppm en été contre 700 ppm en automne.

Au printemps, les teneurs varient très peu de 1.000 à 1.500 ppm; la valeur la plus élevée est celle d'une fissure (1.500 ppm). Dans l'ensemble, ces valeurs restent inférieures à celles de l'été et supérieures à celles de l'automne (fig. 5). Les teneurs du site n°3 (à 10 cm au-dessus du gour) n'ont pas changé beaucoup (800 à 1.200 ppm).

5. COMPARAISONS AVEC D'AUTRES GROTTES FRANCAISES

Les mesures de CO_2 en grottes ne sont pas encore disponibles en grandes quantités dans toutes les régions de France. On peut cependant prendre quelques exemples dans le Jura (Ek & Sbai, 1993; Sbai & Ek, 1993) et dans le sud de la France (Renault, 1968, 1979, 1981, 1982).

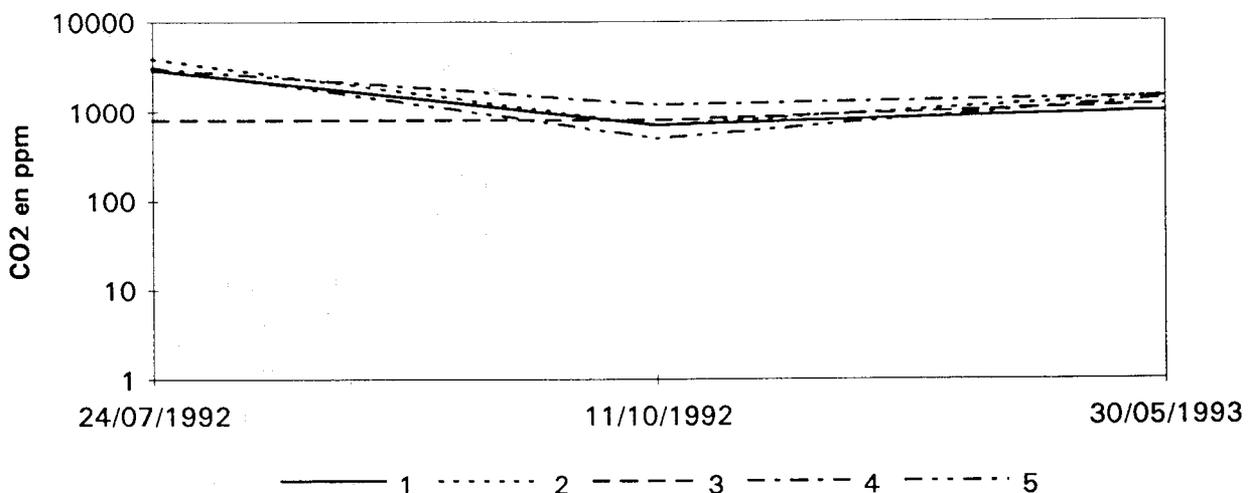


Figure 5. Grotte du Cerdon: variations saisonnières du CO_2 de l'air.

Tableau 3. Teneur de l'air en gaz carbonique dans quelques grottes du Jura méridional.
Carbon dioxide in several caves of South Jura

Cavité	Altitude	Développement total (en m)	Date de mesures	T °C	Nombre de mesures	CO2	
						min.	max.
Grotte sous les Sangles (Burbanche)	473	484	14/07/1993	10,6	10	4400	5500
Grotte du Pic (Songieu)	680	500	19/07/1993	9,5	3	450	17000
Grotte de Vaux-Saint-Sulpice (Cormaranche-en-Bugey)	870	357	19/07/1993	-	4	4700	7500
Grotte de Préou (Ruffieu)	698	698	19/07/1993	8	2	5500	9000
Grotte de la Touvière du Pilet (Seillonnaz)	-	-	20/07/1993	-	6	8000	10000
Grotte des Voleurs (Poncin)	275	260	26/07/1994	16	1	19000	19000
Grotte du Burlandier (cluse de Nantua)	610	1200	23/07/1994	11	5	1000	1200
Grotte d'en Perrucle (Jujurieux)	353	2080	18/07/1994	-	2	500	500
Grotte des Huguenots (Injoux)	520	1786	04/08/1994	13	2	1200	5000
Grotte de Corveissiat	378	560	21/07/1994	13	6	500	5000
Grotte des Parchets	540	120	22/07/1994	15	2	1000	3800
Grotte de la Balme	210	3100	24/07/1992	14	16	325	14500
Grotte du Cerdon	580	1000	25/07/1992	13	5	800	4000

Dans le Jura, plusieurs mesures ont été effectuées en été 1992, 1993 et 1994 (tab. 3). Les valeurs les plus faibles ont été enregistrées dans les grottes de la Balme: 325 ppm dans la salle François Ier (salle ventilée), dans la grotte du Pic (Songieu): 450 ppm (vaste galerie de forme elliptique), dans la grotte de Corveissiat: 500 ppm, dans la grotte d'en Perrucle (Jujurieux: 500 ppm et dans la grotte du Cerdon: 800 ppm (grande salle).

Les teneurs les plus élevées ont été enregistrées dans la grotte des Voleurs: 19.000 ppm, dans la grotte du Pic: 17.000 ppm à 10 cm de la surface de l'eau et 15.000 ppm à 50 cm de la surface de l'eau, et dans les grottes de la Balme: 14.500 ppm dans la salle du lac (non ventilée et en position basse: le CO₂, gaz lourd, s'y accumule).

Dans l'ensemble, les teneurs des fissures ou des gours sont plus fortes que celles des galeries (Sbai & Ek, 1993).

Dans le sud de la France, plusieurs grottes ont déjà fait l'objet d'analyses du CO₂ atmosphérique.

a) Dans la grotte de Lascaux (Dordogne), les valeurs moyennes se situent entre 5.000 et 20.000 ppm, dans la salle d'entrée les valeurs variant entre 0 et 10.000 ppm et 10.000 à 20.000 ppm suivant l'ouverture des portes du sas d'entrée. A partir de 1966, le CO₂ étant pompé dans le puits, les teneurs se stabilisent entre 0 et 5.000 ppm dans toute la grotte. Dans le puits, le CO₂ varie de 20.000 à 50.000, exceptionnellement 60.000 ppm.

Dans la grotte de Fort de Gaume, le CO₂ varie de 1.000 à 2.000 ppm.

b) Dans l'aven de Vincent (Ardèche), le CO₂ oscille entre un peu moins de 10.000 et 60.000 ppm.

c) Dans la grotte de Moulis (Ariège), les valeurs varient entre 400-600 et 2.500 ppm en 1962 et 200 et 4.300-4.400 ppm en 1969.

d) Dans le Quercy (Causse de Gramat, Lot) plusieurs grottes ont fait l'objet d'étude de CO₂ atmosphérique:

* Igue de Larcher (Montfaucon):
65.000 - 3.000 ppm (à moins 7 m)
45.000 - 1.600 ppm (à moins 3 m)

* Grotte de Roc, Traoucat, Sauliac:
200 - 2.000 ppm (au fond du porche d'entrée)
200 - 10.000 ppm (derrière l'étréouire d'entrée)
600 - 40.000 ppm (au point d'amarrage de l'échelle placée au-dessus de l'étréouire verticale).
40.000 - 57.500 (dans la grande salle).

* Grotte Pergaud (Catus):
40.000 - 45.000 ppm dans la grande salle
4.000 - 30.000 ppm dans la salle d'entrée
3 000 ppm dans l'étréouire d'entrée.

* Le Gouffre Pégaze (Miers): 66.000 ppm.

* Rivière souterraine des Vitarelles (Gramat): 300 - 2.000 ppm.

En comparant, d'une région à l'autre, les valeurs les plus élevées rencontrées, on peut distinguer dans le sud de la France (Renault, 1982) deux types de pressions de CO₂.

a) En pays de petite et moyenne montagne (Py-rénées), les pressions de CO₂ (pCO₂) maximales n'atteignent que 13.000 ppm et ceci dans le cas, actuellement exceptionnel, de la grotte de Niaux (Ariège).

b) En pays de plateau (Quercy, sud de l'Ardèche), les pressions de CO₂ maximales atteignent 70.000 ppm et des teneurs de 40.000 à 50.000 ppm sont d'observation courante (Renault, 1981).

Dans l'ensemble, ces valeurs sont beaucoup plus élevées par rapport à celles du Jura méridional. Si, à la grotte de Moulis (Arriège, au pied des Pyrénées), les teneurs ne varient qu'entre 200 et 4.400 ppm, dans une série d'autres grottes (en Dordogne, en Ardèche et dans le Gard), les chiffres cités vont de 200 à 66.000 ppm, mais se tiennent le plus souvent au-dessus de 5.000 ppm.

6. CONCLUSION

La plupart des mesures de la teneur en CO₂ de l'air dans les grottes de la Balme et du Cerdon indiquent des teneurs peu élevées allant de 300 à 15.500 ppm qui sont distribuées de manière différente selon les saisons. Les valeurs obtenues dans les grottes du Cerdon mieux aérées sont inférieures à celles de la Balme. Les teneurs les plus faibles sont situées dans des parties de la grotte qui sont soumises à de fortes aérations (300-325 ppm dans la salle François Ier, grotte de la Balme). Les mesures les plus fortes (15.500 ppm) sont situées à l'extrémité distale de la caverne dans la salle du lac (point 16) et au-dessus des gours ou dans des fissures.

La comparaison des mesures à une échelle verticale juste avant la salle du lac montre une certaine stratification des teneurs en CO₂.

Dans le sud de la France, les teneurs observées sont nettement plus élevées, en particulier dans les grottes de Dordogne, d'Ardèche et du Lot. Cela doit tenir aux configurations des grottes et peut-être à des influences de l'activité de la végétation et du climat.

7. BIBLIOGRAPHIE

- 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*, p. 498.
- ATKINSON, T.C., 1975. Carbon dioxide in the atmosphere of the unsaturated zone: an important control of groundwater hardness in limestones. *Journ. of Hydrology*, 35: 111-123.
- AUDRA, Ph., 1992 b. «Grotte de la Balme», *Scialet*, 21: 151-152.
- BÖGLI, A., 1969. CO₂, «Gehalte der Luft in alpinen karstböden und Höhlen», *Abh. V. Int. Kongr. Speläol.*, 2, S28: 1-9.
- DELECOUR, F., 1965. Détermination des activités biologiques par la méthode de Koepf. Standardisation et essai de la technique de dosage du CO₂. *Note de recherche n°2. Centre d'Ecopédologie forestière*, Gembloux.
- DELECOUR, F., WEISSEN, F & EK, C., 1968. An electrolytic field device for the titration of CO₂ in air. *The National Speleological Society Bulletin*, 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., 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 International Congress of Speleology, U.S.A.*, vol. 2: 672-673.
- EK, C., DELECOUR, F., & WEISSEN, F., 1968. Teneur en CO₂ de l'air de quelques grottes belges. Technique employée et premiers résultats. *Ann. Spéléol.*, 23: 243-257.
- EK, C., GILEWSKA, S., KASZOWSKI, L., KOBYLECKI, A., OLEKSYNOWA, K., & OLEKSYNOWA, B., 1969. Some analyses of the CO₂ content of the air in five Polish caves, *Zeit. für Geomorphologie*, 13 (3): 267-286.
- EK, C., CARON, D., & 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. *Le Naturaliste canadien*, 108: 57-63.
- EK, C., & GEWELT, M., 1985. Carbon dioxide in cave atmospheres. New results in Belgium and comparaison with some other countries. *Earth Surface Processes and Landforms*, 10: 173-187.
- EK, C., & SBAI, A., 1993. Variations saisonnières du CO₂ de l'air de deux grottes du Jura méridional (France). *XI-th International Congress of Speleology of the International Union of Speleology, 2-8 août 1993, Beijing, Chine*. p. 165.
- FOREL, M., 1865. Visite à la grotte des Fées. *Bull. Soc. Vaud. Sc. Nat. Lausanne*, 8, p. 247.
- GEWELT, M., & EK, C., 1983. Le CO₂ de l'air d'une grotte des Alpes ligures: La Caverna delle Fate, Premières mesures. *Bull. Soc. géogr. de Liège*, 19: 107-117.
- GEWELT, M., & EK, C., 1986. L'évolution saisonnière de la teneur en CO₂ de l'air de deux grottes belges: Ste-Anne et Brialmont, Tilff. New directions in karst, *Proceedings of the anglo-french karst symposium*, sept. 1983. Paterson, K., and Sweeting, M.M., Eds; Geo Books, Norwich, England, 49-76.
- HILGER, F., 1963. Activité respiratoire des sols équatoriaux. Application de la méthode respirométrique *in situ*. *Bull. Inst. Agron. Stat. Rech. Gembloux*, 31: 154-182.
- JAMES, J., 1977. Carbon dioxide in cave atmosphere. *Trans. Brit. Res. Assoc.*, 4: 417-429.
- KLIMCHUK, A.B., YABLOKOVA, N.L., & OLSHTYNSKY, S.P., 1981. The regularities in the formation of gas composition of the air in the large karst caves of Podolia and Bukovina, *Eighth International Congress of Speleology, U.S.A.*, 1: 21-23.
- KOEPF, H., 1952. Laufende Messung der Bodenatmung im Freiland. *Land. Forsch.*, 4: 186-194.
- LEWIS, W.C., 1981. Carbon dioxide in coldwater cave. *Eighth International Congress of Speleology, U.S.A.*, 1: 91-92.
- MASSEN, F., 1992. Quelques aspects climatologiques de la grotte de Moestroff. Colloque International de Karstologie, Diekirch, Moestroff, Luxembourg. 25-26 août, 1992, sous presse.
- MERENNE-SCHOUMAKER, B., 1975. Aspects de l'influence des touristes sur les microclimats de la grotte de Remouchamps. *Ann. Spéléol.*, 30 (2): 273-285.
- MIOTKE, F.D., 1974. Carbon dioxide and the soil atmosphere. *Abh. Karst-U.Höhlenkund, Reihe A*, 9: 1-49.
- RENAULT, P., 1968. Sur la distinction de plusieurs régions karstiques en raison de la teneur en anhydride carbonique des atmosphères de grottes. *C. R. Acad. Sc. Paris*, 267, Série D: 2288-2290.

RENAULT, P., 1979. Mesures périodiques de la pCO₂ dans les grottes françaises au cours de ces dix dernières années. Actes du Symposium intern. sur l'érosion karstique. U.I.S., Aix-en-Provence-Marseille-Nîmes, p: 17-32.

RENAULT, P., 1981. Le CO₂ dans l'atmosphère de quelques cavernes du Quercy (Lot, France). *Périgueux Spéleo-Dordogne*, 74: 100 p.

RENAULT, P., 1982. CO₂ atmosphérique karstique et spéléomorphologie. Intérêt pour les spéléologues. *Revue belge de Géogr.*, 106 (1): 121-130.

ROQUES, H., 1959. Sur la répartition du CO₂ dans les karsts. *Ann. Spéleol*, 14: 9-22.

SBAI, A., & EK, C., 1993. Le CO₂ dans l'atmosphère de quelques grottes du Jura méridional (Ain, France). Actes de la 3ème Rencontre d'Octobre, Montpellier: 98-101.

Manuscrit reçu le 7/7/1994; accepté le 25/7/1994.