

# Contribution à l'étude du climat de trois cavités souterraines belges

## La grotte de Ramioul, la grotte et abîme de Comblain-au-Pont et la carrière souterraine de Petit-Lanaye inférieure

Julie P <sup>1</sup>, Michel E , Camille E ,  
Jean G et Luc W

### RÉSUMÉ

Des mesures de température et de CO<sub>2</sub> ont été réalisées pendant un an dans la grotte de Ramioul et dans la grotte et abîme de Comblain-au-Pont, et pendant six mois dans la carrière souterraine de Petit-Lanaye inférieure. La température a été mesurée de manière continue à l'aide de *dataloggers*. Ces mesures et la comparaison entre les différentes cavités ont permis de mieux comprendre le fonctionnement de leurs climats.

Dans la grotte de Ramioul, qui est fermée par des portes non isolantes, les mouvements d'air sont relativement faibles mais il existe des échanges de chaleur entre les masses d'air extérieure et souterraine par conduction à travers les portes. La cavité peut être divisée en plusieurs régions qui ont des comportements climatiques différents. Des taux élevés et dangereux de CO<sub>2</sub> avaient déjà été mesurés dans la grotte. Ces taux varient de manière irrégulière et sans rapport avec le cycle saisonnier naturel, et les origines de ce CO<sub>2</sub> restent incertaines.

La grotte et abîme de Comblain-au-Pont est composée de deux régions bien distinctes : l'une confinée et l'autre ventilée. La région ventilée se comporte comme un tube à vent en hiver, mais qui ne s'inverse pas en été. À plus grande échelle, on peut aussi la considérer comme une sorte de piège à air froid puisqu'elle a une morphologie descendante.

Dans la carrière souterraine de Petit-Lanaye inférieure, le nombre restreint de mesures ne permet pas d'établir un diagnostic complet de l'organisation climatique, mais donne déjà un premier aperçu pour la saison estivale. On distingue déjà des secteurs plus ou moins influencés par les variations de la température extérieure, probablement en relation avec certains courants d'air qui s'organisent de façon complexe dans le réseau labyrinthique de galeries.

MOTS-CLÉS : climatologie souterraine, grotte, température, CO<sub>2</sub>, Belgique.

### ABSTRACT

*Some temperature and CO<sub>2</sub> measures have been made for one year in the cave of Ramioul and in the cave of Comblain-au-Pont, and for six months in the underground quarry of Petit-Lanaye inférieure. Temperature has been measured by dataloggers. These measures and the comparison between the different caves contributed to a better understanding of their climates.*

*In the cave of Ramioul, closed by non insulated doors, the air movements are relatively low but there are some heat exchanges between the outside and inside air by conduction through the doors. The cave can be divided into two parts each with a different climatic behaviour. High and dangerous CO<sub>2</sub> rates have already been measured in this cave. Rates fluctuate in an irregular way and without any connection with the natural seasonal cycle, and the CO<sub>2</sub> origins stay uncertain.*

*The cave of Comblain-au-Pont can be divided into two major parts: one enclosed and the other ventilated. The ventilated region is a "wind tube" during the winter, but it doesn't reverse in the summer. On a larger scale, this region can be considered as a cold air trap despite its two exits, since it has a descendant morphology.*

*In the underground quarry of Petit-Lanaye inférieure, the low number of data doesn't allow a complete diagnosis of the climate organisation, but can give a first idea for the summer period. We can already distinguish some parts that are more or less influenced by the outside temperature fluctuations, probably in relation with some air movements which organised themselves in a complex way in the labyrinthic galleries network.*

*Keywords* : subterranean climatology, cave, temperature, CO<sub>2</sub>, Belgium.

## 1. Introduction

### 1.1. L'étude climatique

L'idée de cette étude est partie des problèmes que connaît la grotte de Ramioul, où l'on observe en particulier des taux de CO<sub>2</sub> anormalement élevés. Une étude climatique se révélait être intéressante et quelques mesures avaient

déjà été réalisées par M. Erpicum et M. Dethier. Nous avons décidé de réaliser des mesures dans plusieurs cavités afin de permettre une

<sup>1</sup> Cet article est un résumé du mémoire intitulé *Contribution à l'étude du climat de trois cavités souterraines belges* réalisé par Julie Piron pour l'obtention du titre de licenciée en sciences géographiques (Piron, 2006).

comparaison. La grotte et abîme de Comblain-au-Pont a été choisie car son climat était déjà relativement bien connu grâce aux mesures de J. Godissart et C. Ek (Godissart, 1975). La carrière souterraine de Petit-Lanaye inférieure est l'objet de plusieurs études géomorphologiques menées depuis 2003 (Willems *et al.*, 2005, 2006). Il s'agit d'un site Natura 2000 abritant le plus grand dortoir de chauves souris de Belgique.

Des mesures de température en continu ont été réalisées pendant un an dans les grottes de Ramioul et de Comblain-au-Pont, et pendant quelques mois dans la carrière souterraine de Petit-Lanaye inférieure. Elles ont été accompagnées par quelques mesures ponctuelles de la teneur en CO<sub>2</sub> et de la direction des mouvements d'air. Les ouvrages de Choppy (1986a, 1988, 1990, 1986b), Lismonde (2002a, 2002b) et Massen *et al.* (1997) nous ont servi d'ouvrages de référence en ce qui concerne le climat souterrain.

## 1.2. Instruments de mesure

Les mesures dans les cavités souterraines sont conditionnées par les instruments utilisés. À cause de l'humidité importante et du caractère saturé de l'air, la plupart des instruments de mesure classiques ne peuvent être utilisés pendant une longue durée. Or, l'objet de notre étude était d'avoir des mesures continues de température, ce qui impliquait de laisser des instruments en permanence dans les cavités.

Pour les mesures de température, nous avons utilisé des *dataloggers* auxquels étaient reliées des sondes. Les sondes mesurent la température de l'air aux endroits où elles sont placées, et le *datalogger* stocke les données qu'elles lui envoient. Il suit ensuite de télécharger les données enregistrées par le *datalogger* sur un ordinateur portable.

Deux sortes d'instruments de mesure de température ont été utilisés : ceux de type Hotdog, munis de deux sondes, et ceux de type Ecolog, munis de quatre sondes. Ces instruments ont mesuré la température toutes les six minutes pour les Hotdog et toutes les trois minutes pour les Ecolog. Les deux types ont été testés et donnent des mesures comparables et fiables. Cependant, nous avons remarqué que les Hotdog souffrent de l'humidité à long terme. Les mesures ont souvent été aberrantes à cause de gouttes d'eau de condensation qui se

déposaient sur les sondes. De plus, la connexion entre ces *dataloggers* et l'ordinateur était parfois impossible à cause de l'humidité. Plusieurs données ont ainsi été perdues et les Hotdog ne sont donc pas utilisables en grottes pendant une longue durée.

Le taux de CO<sub>2</sub> a été mesuré de façon ponctuelle. Nous avons fait des mesures le plus souvent possible, lors de nos visites, en utilisant une pompe manuelle à piston Gastec et des tubes de détection de CO<sub>2</sub>. À Ramioul, nous avons également pu estimer le taux de CO<sub>2</sub> et mesurer le taux de CO grâce au détecteur multigaz Solaris appartenant au Préhistosite. Le taux de CO<sub>2</sub> peut être estimé à partir de celui d'O<sub>2</sub> car, en général, la somme de ces deux gaz est plus ou moins constante. Il faut cependant être très prudent quant aux précisions différentes et nous n'avons utilisé les mesures d'O<sub>2</sub> que pour faire des estimations grossières du taux de CO<sub>2</sub> et de ses variations.

Ces mesures de température et de CO<sub>2</sub> ont été, de temps en temps, complétées par la détection de mouvements d'air. Le sens et une estimation de la vitesse ont été déterminés en plusieurs endroits et à des hauteurs différentes, en observant la direction et l'inclinaison de la fumée d'un bâton d'encens incandescent.

## 2. La grotte de Ramioul

### 2.1. Présentation générale de la grotte

Le village de Ramioul se situe à une quinzaine de kilomètres en amont de Liège, sur le versant en rive droite de la Meuse. La grotte<sup>2</sup> se trouve un peu au sud du village et le massif calcaire, dans lequel elle s'est creusée, est exploité par la carrière Carmeuse.

La grotte est composée de trois étages dont seuls les étages moyen et supérieur sont accessibles pour les visites. L'étage moyen est constitué d'une longue galerie subhorizontale, entrecoupée de plusieurs petites salles allongées. Après la petite salle de l'entrée, on arrive dans la salle van den Broeck, dont le niveau est un peu inférieur à celui de l'entrée. Un peu plus loin se trouve la crevasse Henri Bernard, seul accès à l'étage inférieur. Au bout de la galerie de l'étage moyen se trouve une grande salle où un escalier permet d'accéder à l'étage supérieur,

<sup>2</sup> Coordonnées Lambert : x = 225,0 m ; y = 141,2 m.

plus petit. L'étage inférieur, beaucoup plus grand que les deux autres, est constitué d'une galerie subhorizontale qui se divise ensuite en deux galeries parallèles orientées nord-sud. Il n'est pas accessible aux visites touristiques, puisque le seul accès est la crevasse Henri Bernard, un puits vertical d'une trentaine de mètres de profondeur. La région ouest est bien connue des spéléologues qui s'y sont aventurés, mais personne n'a jamais pu accéder dans la région est, qui est obstruée par un éboulement infranchissable. Le réseau inférieur a été exploré il y a une cinquantaine d'années par des spéléologues, mais il ne peut plus être visité à présent à cause des problèmes de taux de CO<sub>2</sub> dangereux, dont nous reparlerons plus loin. En effet, il est impossible de remonter rapidement le puits en cas de taux trop élevé de CO<sub>2</sub>.

La grotte de Ramioul est aménagée pour les visites. Les orifices sont fermés par des portes en métal, non isolantes. Même si ces portes laissent passer la chaleur par conduction, les courants d'air sont bloqués et l'air extérieur ne rentre pas, sauf lors des ouvertures de portes.

## 2.2. Lieux de mesures

Les *dataloggers* et sondes ont été disposés comme indiqué sur la figure 1. Nous les avons placés de façon à mesurer les températures

de lieux qui semblaient avoir des régimes climatiques différents. Le Hotdog 5 a été placé près de l'entrée afin de caractériser l'air et de la porte sur la température, et pour pouvoir comparer la température de la grotte avec celle de l'extérieur. Le Hotdog 6, puis l'Ecolog FB, ont été placés près de la fosse Bernard afin de tenter de détecter les mouvements d'air venant de l'étage inférieur, et l'influence de celui-ci sur le climat des étages moyen et supérieur. Le Hotdog 7 et l'Ecolog Escalier avaient pour but de mettre en évidence les caractéristiques des températures de l'étage supérieur et le gradient vertical dans la grande salle.

## 2.3. Température de part et d'autre de la porte d'entrée

La grotte de Ramioul a un climat particulier, car conditionné par son caractère peu ventilé, à cause des portes qui empêchent l'air extérieur d'y rentrer. Cependant, la température extérieure influence celle de la grotte, notamment dans les parties proches des orifices. Nous avons considéré comme température extérieure de référence celle enregistrée par la station météorologique du Sart Tilman (Liège).

Les données montrent que la topographie influence également très fortement la température : l'entrée de la grotte et la salle d'entrée

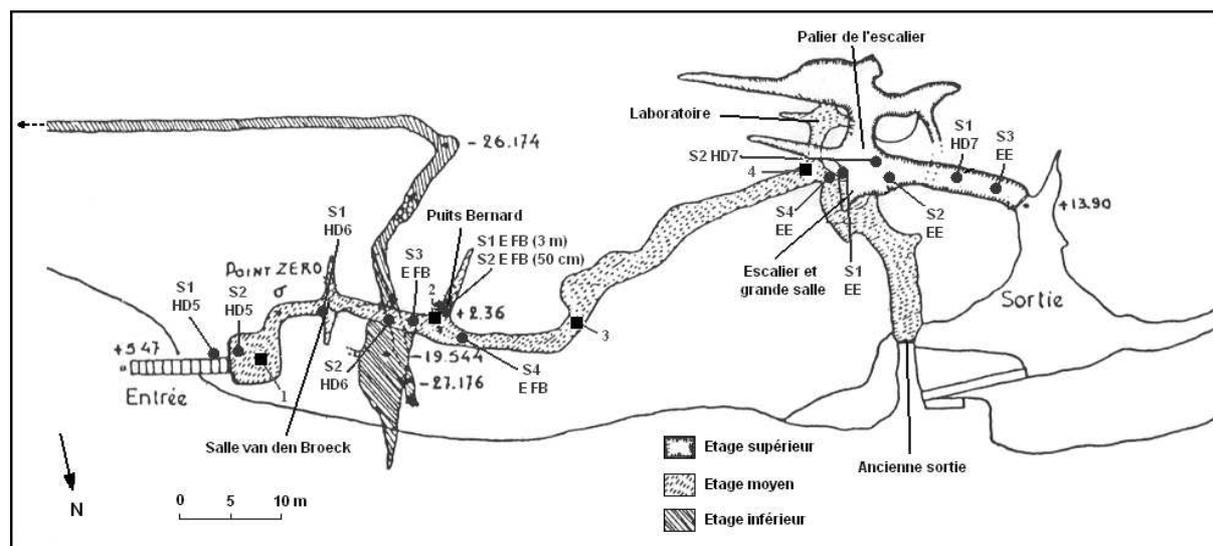


FIG. 1. – Plan des réseaux moyen et supérieur de la grotte de Ramioul (levé par L. Vandebosch, 1930). Vue en plans superposés, les chiffres sont les altitudes par rapport à une altitude de référence au point zéro.

- : Emplacements des sondes de température  
(HD : Hotdog, E FB : Ecolog FB, EE : Ecolog Escalier)
- : Lieux de mesures de CO<sub>2</sub> (numérotés de 1 à 4)

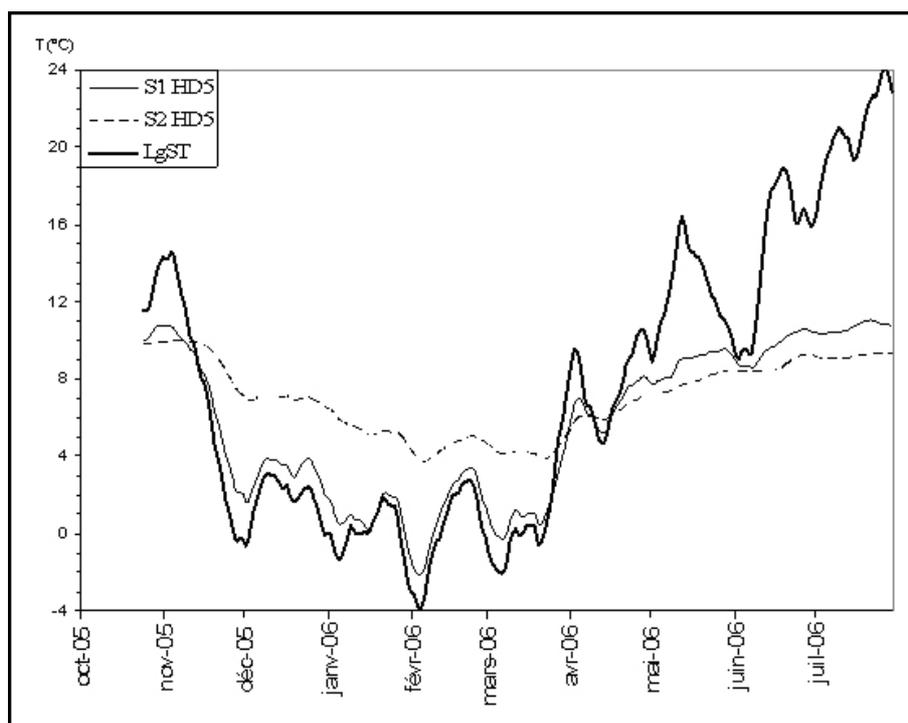


FIG. 2. – Comparaison entre la température extérieure au Sart Tilman (LgST), à l'extérieur, près de l'entrée de la grotte de Ramioul (S1 de Hotdog 5), et dans la grotte de Ramioul, près de la porte (S2 de Hotdog 5). Moyennes glissantes sur dix jours : les dates en abscisse représentent la période de dix jours précédant cette date.

sont dans une dépression, une sorte de cuvette, et c'est là qu'il fait le plus froid. Il s'agit d'un piège à air froid. La galerie subhorizontale a une température constante, mais il suit d'une petite dénivellation pour bloquer l'air froid qui s'accumule dans les points bas. Dans la grande salle, les mesures montrent bien le gradient vertical de température. L'air est stratifié et stable.

Les portes bloquent la plupart des courants d'air et la grotte n'est affectée que par de faibles mouvements d'air, qui sont quand même bien décelables avec la fumée d'un bâton d'encens. Par contre, en analysant les températures tout au long de l'année, on se rend compte que les portes ne sont pas isolantes et qu'elles sont le siège d'échanges thermiques relativement importants. La figure 2 montre les moyennes sur dix jours des températures dans la grotte près de l'entrée (S2 HD5), à l'extérieur de la grotte dans la cuvette d'entrée (S1 HD5) et au Sart Tilman (LgST). On voit que la température à l'intérieur de la grotte varie beaucoup moins que celle du Sart Tilman. Dans la dépression, juste devant l'entrée de la grotte, le comportement est intermédiaire : il suit la courbe du Sart Tilman en hiver et celle de la grotte en été. En fait, la

cuvette se comporte comme un piège à air froid : elle se remplit d'air froid l'hiver et cet air froid, plus dense donc plus lourd, ne peut s'échapper de la cuvette l'été. De plus, l'air à l'intérieur de la grotte est plus froid que l'air extérieur en été et cet air froid refroidit l'air extérieur au contact de la porte par conduction.

#### 2.4. Température et circulation de l'air dans le puits Bernard

En analysant les mesures effectuées par Ecolog FB du 13 janvier au 8 mars, on peut mettre en évidence trois types de situations (A, B et C) reprises sur la figure 3. Pour cette période, lorsque la température extérieure est comprise entre  $-3$  et  $+5$  °C (situation A), la température dans le puits (sondes 1 et 2) est plus basse que dans la galerie (sondes 3 et 4). Lorsque la température extérieure devient plus basse que  $-3$  °C (situation B), la température dans le puits fluctue rapidement, ce qui indique des mouvements d'air entre la galerie et le puits. On peut supposer que de l'air froid entre par l'entrée, coule en nappe sur le sol et s'engouffre dans le puits. Cet air froid n'atteint

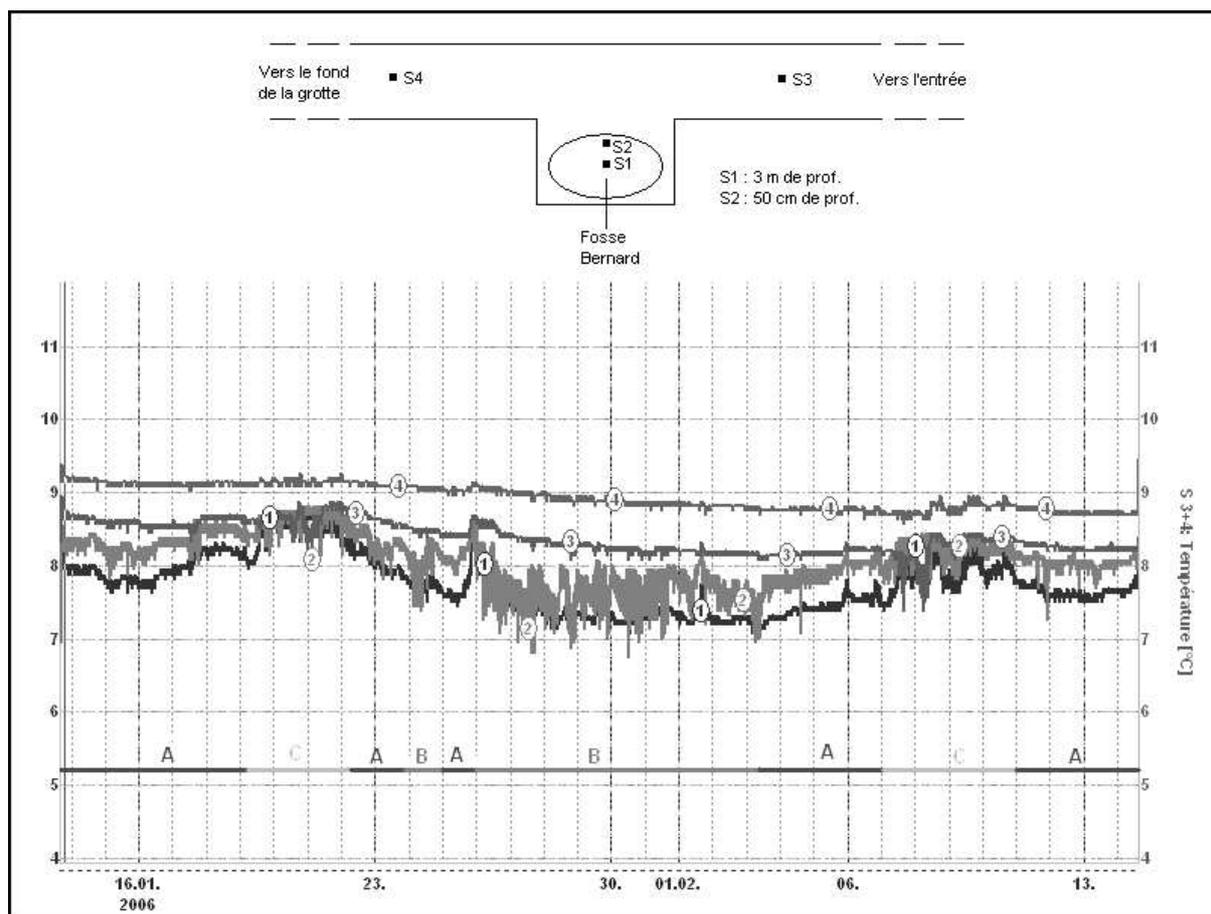


FIG. 3. – Situations A, B et C pour les sondes 1 à 4 de l'Écolog FB (Fosse Bernard, grotte de Ramioul), du 13-01-06 au 14-02-06 (les emplacements des sondes sont représentés sur une vue en plan du couloir principal de l'étage moyen).

pas la sonde S3 qui est en hauteur. Par contre, lorsque la température extérieure augmente et dépasse les  $+5\text{ }^{\circ}\text{C}$  (situation C), les sondes 1, 2 et 3 ont toutes la même température, mais S4 reste plus chaude. La mise en évidence de ces trois situations différentes prouve l'influence des variations de la température extérieure sur la température et les mouvements d'air dans la grotte. Cependant, pour mieux comprendre la circulation de l'air entre les étages moyen et inférieur par le puits Bernard, il faudrait réaliser d'autres mesures dans l'étage inférieur.

Les températures mesurées dans la galerie avant et après la fosse Bernard (S3 et S4), notamment dans les situations B et C, laissent supposer qu'il existe une circulation d'air dans le circuit « entrée – puits Bernard – étage inférieur ». En effet, dans le reste de la grotte (entre le puits Bernard et la sortie), la température varie beaucoup moins. Cette circulation paraît différente en été et en hiver et pourrait jouer un rôle dans les flux de  $\text{CO}_2$  dans le puits Bernard.

## 2.5. L'effet des ouvertures de portes

Lors des ouvertures de portes, les sondes enregistrent des pics chauds ou froids de température, selon que la température extérieure est plus chaude (en été) ou plus froide (en hiver) que la température de la grotte. Ces pics sont plus importants s'il y a une grande différence entre les températures extérieure et dans la grotte. La figure 4 montre un exemple de plusieurs pics chauds dus aux ouvertures des portes.

## 2.6. Le problème du $\text{CO}_2$

Dans les grottes, le taux de  $\text{CO}_2$  est souvent plus élevé que dans l'atmosphère extérieure et varie normalement selon les saisons, en relation avec l'activité biologique des végétaux qui rejettent du  $\text{CO}_2$  par leurs racines dans le sol. Cependant, dans la grotte de Ramioul, des taux de  $\text{CO}_2$  anormalement élevés ont été

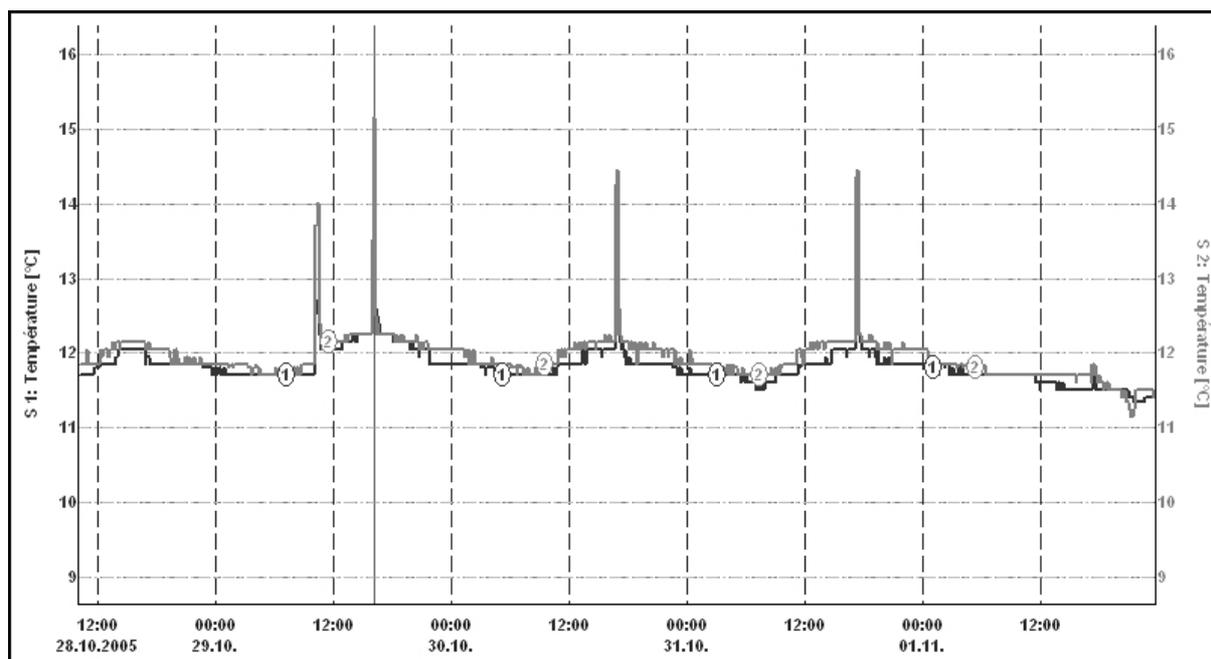


FIG. 4. – Pics de température dus aux ouvertures de la porte de sortie de la grotte de Ramioul (Hotdog 7)

mesurés et ils ne semblent suivre aucune logique dans le temps ni en fonction des saisons. En effet, C. Ek et J. Godissart ont mesuré des taux allant jusqu'à 6 %. À 30 cm du sol, au-dessus de la fosse Bernard, nous avons pu détecter des variations très rapides du taux de CO<sub>2</sub> le 29 mars 2006, lorsque nous avons mesuré 4000 ppm (0,04 %) à 11 h et 1,1 % à 11 h 35 ! Il paraît donc indispensable de placer un instrument qui mesure et enregistre en continu le CO<sub>2</sub> pour pouvoir disposer de mesures fiables et interprétables.

Trois hypothèses sont proposées pour expliquer l'origine des taux anormaux de CO<sub>2</sub> : une origine naturelle avec une accumulation dans l'étage inférieur, un produit de la réaction des schistes à ampélites avec le calcaire, ou un gaz dégagé lors des tirs de mine de la carrière Carmeuse (Ek & Hubart, 1988).

Si le CO<sub>2</sub> était d'origine naturelle, c'est-à-dire produit par l'activité biologique dans l'humus, les taux devraient systématiquement augmenter en été et diminuer en hiver, lorsque l'activité biologique est réduite. Ce n'est pas le cas et cette hypothèse est donc peu probable. La production de CO<sub>2</sub> par la réaction chimique des schistes à ampélites avec le calcaire est connue depuis longtemps. Déjà au début du xx<sup>e</sup> siècle, Van den Broeck, Martel & Rahir (1910) avaient remarqué que du CO<sub>2</sub> s'échappait du Trou du

Diable à Ramioul et avaient déjà émis cette hypothèse. Cette cavité se trouve juste au contact du calcaire viséen et des schistes namuriens à ampélites. La grotte de Ramioul n'est pas très loin de ce contact, et on peut imaginer que le CO<sub>2</sub> se propage dans des fissures et vienne s'accumuler dans la grotte. Le dégagement de CO<sub>2</sub> lors des tirs de mine de la carrière est un débat controversé. Lors des tirs, plusieurs gaz sont dégagés, dont du CO<sub>2</sub>, du CO et probablement des oxydes d'azote. La présence de CO a été détectée plusieurs fois dans la grotte, toujours près de la fosse Bernard (Hubart, 2003). Or, le CO ne peut provenir que des tirs de mine, car il n'est pas présent naturellement dans l'atmosphère. Si le CO arrive jusque dans la grotte, on peut donc penser que le CO<sub>2</sub> dégagé par ces mêmes tirs y arrive aussi et cette hypothèse est la plus probable.

Quelles que soient ses origines, le CO<sub>2</sub> s'accumule très probablement dans l'étage inférieur et ressort de temps en temps par le puits Bernard, en fonction des circulations d'air et sans doute aussi selon les quantités de gaz formées. On a d'ailleurs vu, grâce aux mesures de température, qu'une circulation existait entre l'étage inférieur et le tronçon « entrée – fosse Bernard ». Il reste à descendre dans le puits Bernard avec des bouteilles d'oxygène pour y étudier les circulations d'air ...

## 2.7. Conclusion concernant le climat de la grotte de Ramioul

Le climat de la grotte de Ramioul est principalement régi par la quasi absence de ventilation à cause des portes fermées. Des échanges thermiques ont tout de même lieu à travers les portes, qui ne sont pas isolantes, et les zones directement à côté des portes sont influencées par la température extérieure. L'entrée se trouve dans une petite dépression dans laquelle de l'air relativement froid venant de la grotte s'accumule en été. En hiver, la température de la dépression est proche de la température extérieure (fig. 2), mais les échanges thermiques à travers la porte d'entrée interviennent également.

La partie de l'étage moyen, comprise entre l'entrée et la fosse Bernard, semble fonctionner en relation avec l'étage inférieur, qui est actuellement inaccessible. Les relations entre ces deux étages sont donc encore mal connues et mal comprises, mais il existe des courants d'air dans le puits Bernard qui fait la jonction entre les deux étages. La partie profonde de l'étage moyen, qui s'étend de la fosse Bernard au bas de l'escalier, est très peu influencée par les variations de la température extérieure. Elle se rapproche d'une zone confinée puisque la température est relativement stable. L'air de la grande salle présente un gradient vertical de température. La salle contient un grand volume d'air, ce qui lui confère une grande inertie. La température de la partie stable de l'étage supérieur est 1 ou 2 °C plus haute que celle de l'étage moyen. Des variations de températures qui sont enregistrées dans le haut de la salle sont complètement atténuées dans le bas de la salle.

À l'étage supérieur, la galerie de sortie est parcourue par des courants d'air de sens différents au plafond et au sol, comme dans le modèle de Trombe pour une grotte subhorizontale (Trombe, 1952; Choppy, 1986a). Ces courants d'air sont surtout marqués lors des ouvertures de portes, pendant lesquelles les masses d'air extérieure et souterraine s'échangent de la chaleur. Le palier supérieur de l'escalier, qui se trouve dans la partie haute de la grande salle, est parfois influencé par ces courants d'air et ces échanges de chaleur, mais dans une moindre mesure.

Le CO<sub>2</sub> a un comportement complètement anarchique et imprévisible. Des taux élevés se rencontrent aussi bien en été qu'en hiver, et un excès de CO<sub>2</sub> peut se produire à n'importe

quel moment de la journée. Il semble sortir du puits par bouffées. Nous pensons que le CO<sub>2</sub>, dont l'origine est encore inconnue ou incertaine, s'accumule dans le réseau inférieur, et ressort de temps en temps, en fonction des courants d'air. Il est possible et probable qu'il ait plusieurs origines : naturelle, réaction chimique des schistes à ampélites et du calcaire, tirs de mine de la carrière, modification de la circulation de l'air suite à l'exploitation du massif, ...

## 3. La grotte et abîme de Comblain-au-Pont

### 3.1. Présentation générale de la grotte

Le village de Comblain-au-Pont se situe sur le long de l'Ourthe, à environ 20 km de Liège. La grotte et abîme<sup>3</sup> se trouvent sur le versant de la rive gauche, à 1 km à l'ouest de l'Ourthe.

La seule entrée naturelle est l'abîme, puits subvertical profond de 22 m. Il mène à une longue galerie couverte d'éboulis et de débris venus du plateau. Ensuite, la grotte est constituée d'une série de grandes salles, hautes et spacieuses, reliées entre elles par des couloirs étroits. Les visiteurs entrent par l'entrée artificielle, qui mène à un long couloir descendant, avec un escalier. L'entrée de l'abîme se situe 10 m plus haut que l'entrée artificielle, dans le versant boisé. La construction de l'entrée artificielle a évidemment modifié le régime climatique de la grotte, du moins dans la région ventilée, puisqu'elle ne possédait qu'une seule entrée naturelle, l'abîme, avant le percement de ce second accès. L'entrée artificielle est fermée par une porte grillagée qui laisse passer l'air et l'abîme est ouvert. Les deux entrées participent donc à la ventilation de la grotte.

J. Godissart connaissait déjà bien le régime climatique de la grotte et abîme de Comblain-au-Pont. La grotte se divise en deux régions principales, que nous appellerons région confinée et région ventilée. La dynamique de l'air est totalement différente dans ces deux régions. La région ventilée, qui s'étend des entrées jusqu'à la salle des Échos, fonctionne comme un tube à vent en hiver, mais le courant d'air ne s'inverse pas en été. Dans la région confinée, qui commence à

<sup>3</sup> La grotte et abîme de Comblain-au-Pont sont communément appelés « grotte de l'abîme ». Coordonnées Lambert : x = 235,0 m ; y = 130,3 m.

la salle des Échos et va jusqu'au plus profond de la grotte, les courants d'air sont faibles et il s'agit principalement de courants de convection. La température y est stable toute l'année.

### 3.2. Lieux de mesure

Le puits du GRSC (Hotdog 1) a été choisi comme premier lieu de mesure. Il se trouve dans la région ventilée, qui est donc influencée par les variations de la température de l'air extérieur. Nous avons rajouté ensuite le Hotdog 4 au point bas près du GRSC pour confirmer le courant d'air du tube à vent et pour mettre en évidence l'influence du point bas dans cette circulation. Le Hotdog 3 a été placé dans la salle des Échos, car elle est située à la limite de la région confinée. Le grand volume d'air qu'elle contient n'est pas soumis aux courants d'air et se stratifie en couches d'air de température et de densité différentes. Le carrefour de l'abîme est un embranchement de galeries et il nous a semblé

### 3.3. Les circulations d'air dans la région ventilée

Les températures enregistrées par les quatre sondes d'Ecolog CA nous ont permis de confirmer l'existence du courant d'air, de type tube à vent, déjà observé par J. Godissart dans la région ventilée de la grotte (fig. 6a). La sonde S4 enregistre une température plus élevée et qui fluctue peu comparativement aux trois autres sondes. Cela prouve qu'en période hivernale, de l'air sort par l'abîme. Cet air est plus chaud car il ne provient pas de l'extérieur mais de l'intérieur de la grotte, où il a eu le temps de se réchauffer. L'air froid venant de l'extérieur descend tout droit dans l'escalier de l'entrée (S1)

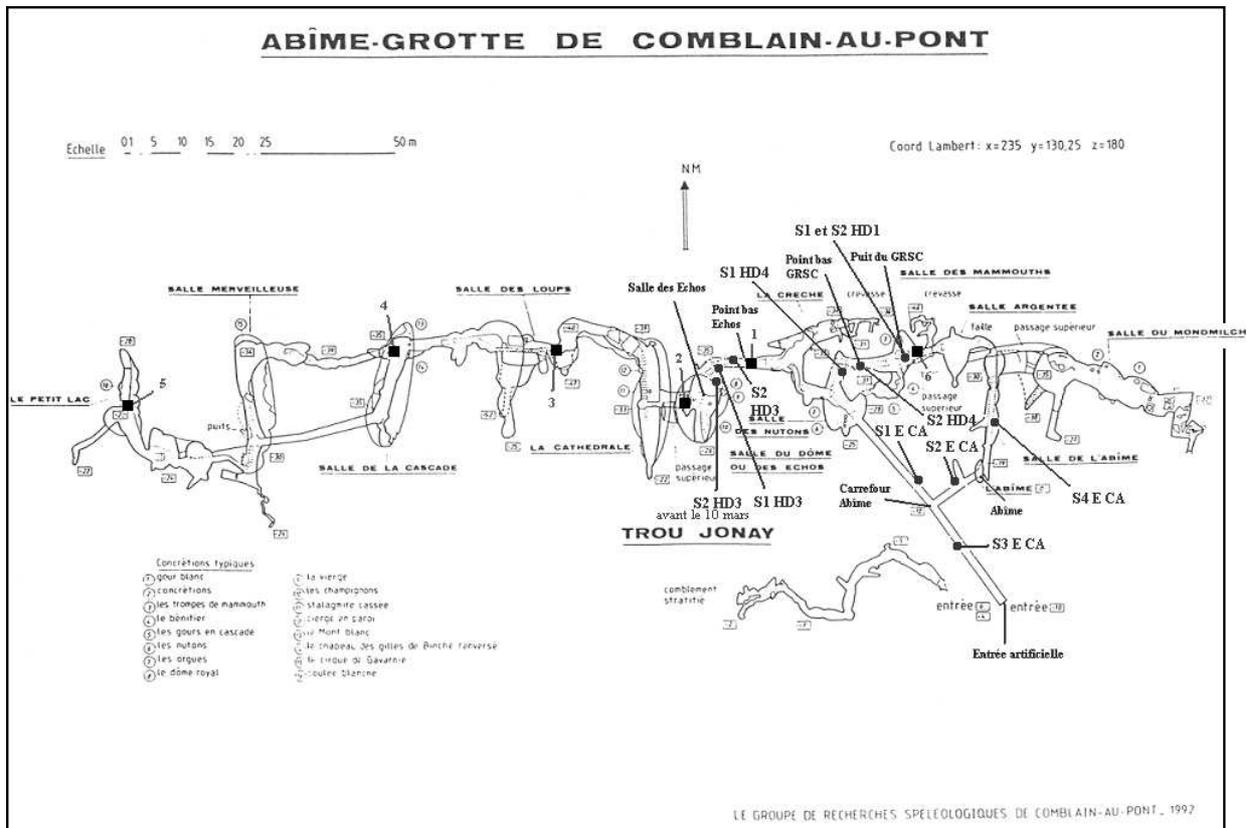


FIG. 5. – Plan de la grotte et abîme de Comblain-au-Pont (levé par le Groupe de Recherche Spéléologique de Comblain-au-Pont, G.R.S.C.).

- : Emplacements des sondes de température  
(HD : Hotdog, E CA : Ecolog Carrefour Abîme)
- : Lieux de mesures de CO<sub>2</sub> (numérotés de 1 à 6)

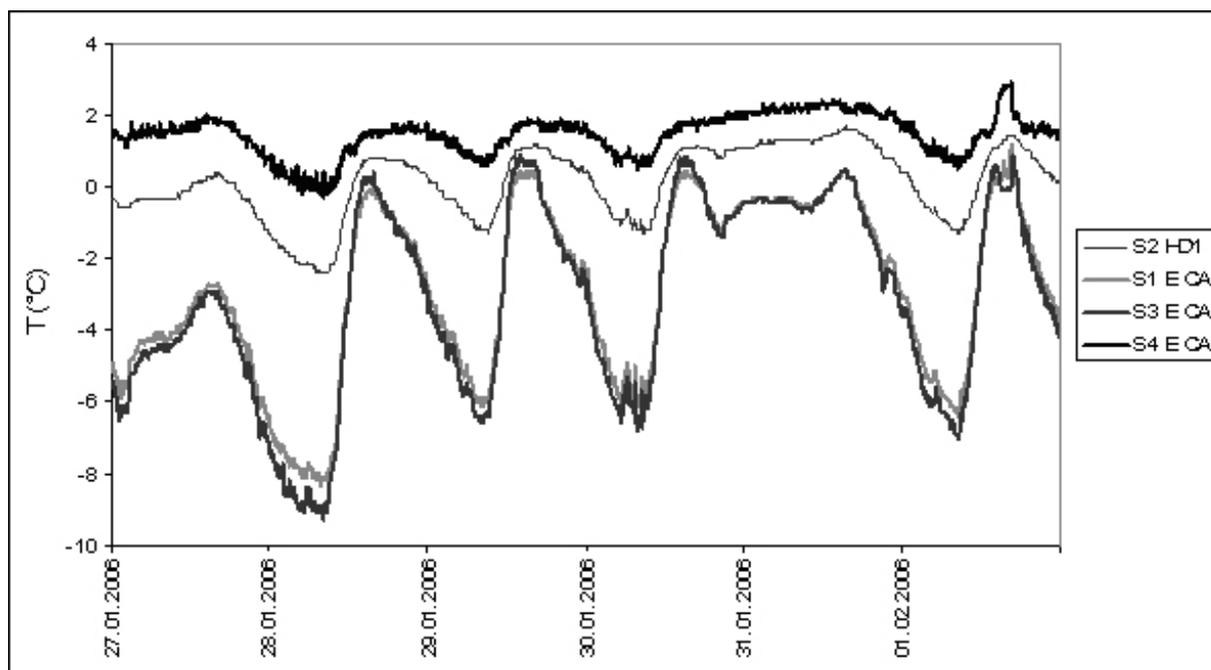


FIG. 6a. – Températures dans le tube à vent de la grotte et abîme de Comblain-au-Pont du 27-01-06 au 01-02-06 (E CA : Ecolog Carrefour Abîme, HD1 : Hotdog 1, puits du GRSC)

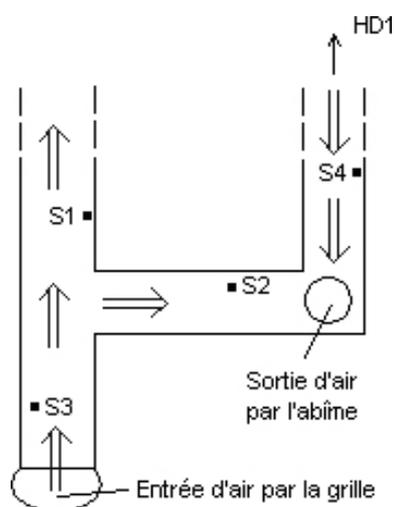


FIG. 6b. – Organisation du courant d'air de type tube à vent en hiver dans la région ventilée de la grotte et abîme de Comblain-au-Pont (vue en plan). Les sondes S1, ..., S4 sont celles d'Ecolog CA - Carrefour abîme.

jusqu'au puits du GRSC, puis remonte et ressort par l'abîme (fig. 6b).

La figure 7 montre bien que les variations de température s'atténuent en fonction de la distance parcourue par l'air dans la grotte. La sonde S1 d'Ecolog CA enregistre de fortes variations. Ensuite, en suivant le trajet de l'air, on arrive dans la salle du Mammouth, au puits du GRSC (S2 de Hotdog 1). Là, les variations sont déjà atténuées par l'inertie de la partie de la

grotte parcourue par l'air depuis l'entrée. À la sonde S4 de l'Ecolog CA, lorsque l'air s'apprête à sortir par l'abîme, les variations ont encore été atténuées et l'air s'est réchauffé.

La porte grillagée de l'entrée artificielle a été obstruée avec de la frigolite pendant environ un mois et demi (février-mars), à cause de travaux de renforcement du plafond de la galerie qui menaçait de s'écrouler. Nous avons donc eu la chance de pouvoir analyser les changements de régime de la ventilation lors de cette obstruction de porte qui, de plus, a eu lieu en hiver, alors que la région ventilée de la grotte se comportait comme un tube à vent. On voit très bien l'anomalie de température pendant la période de travaux sur la figure 7. Le courant d'air du tube à vent est stoppé ou du moins fortement atténué par l'obstruction de la porte et l'air froid extérieur n'entre plus par l'entrée artificielle.

### 3.4. Température et confinement dans la salle des Échos

Dans la région confinée, la température est très stable tout au long de l'année. Dans la salle des Échos, la température ne varie pas de manière significative et est proche de 9,6–9,7 °C. Le plancher de la salle s'élève de plusieurs mètres à l'entrée de la salle, ce qui empêche l'air froid,

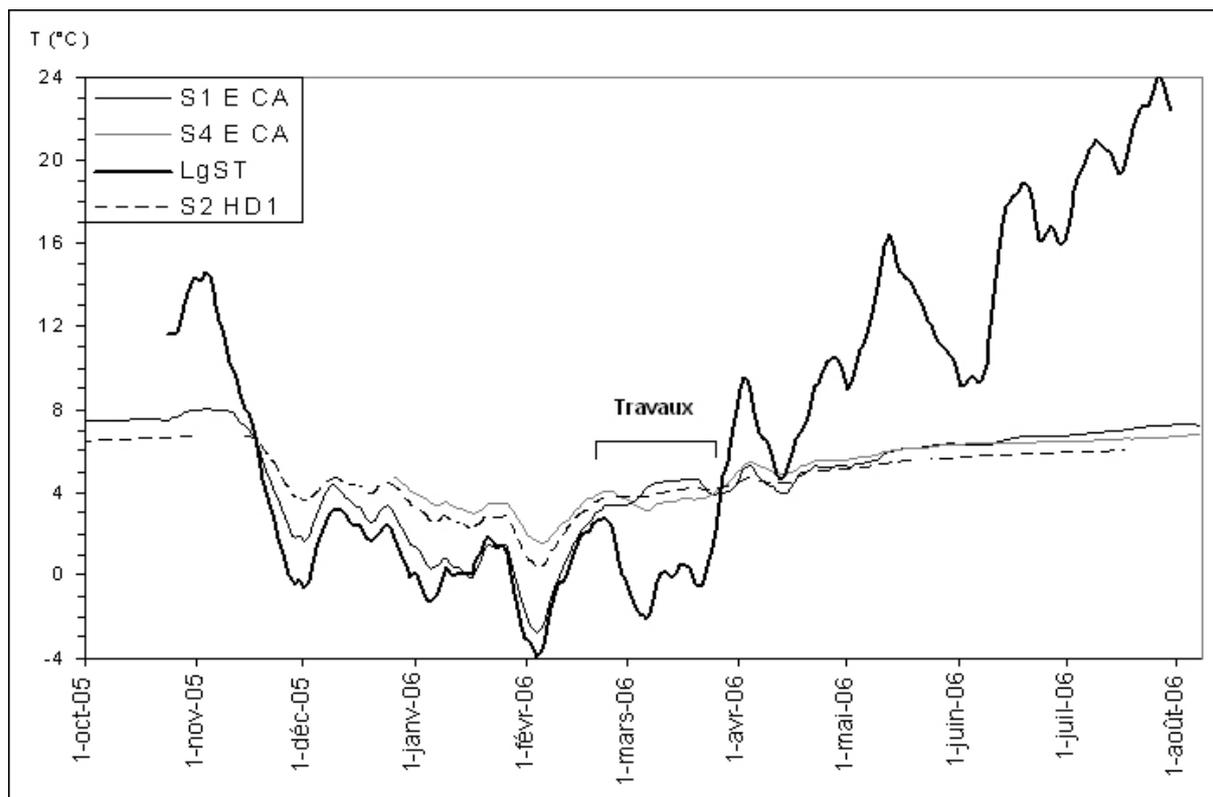


FIG. 7. – Températures mesurées par différentes sondes dans la grotte et abîme  
(Moyennes sur 10 jours : les dates représentent la période de 10 jours précédant cette date)

plus dense, de s'y répandre. Dans la salle des Échos, cet air froid entre en contact avec l'air chaud et saturé de la région confinée de la grotte, ce qui provoque d'intenses condensations.

### 3.5. Le CO<sub>2</sub>

Le taux de CO<sub>2</sub> est toujours plus élevé près du Petit Lac, l'endroit le plus profond de la grotte. Il reste très élevé dans la salle de la Cascade et la salle des Loups. Dans la région ventilée de la grotte, le taux de CO<sub>2</sub> est très faible et a presque la même valeur qu'à l'extérieur, c'est-à-dire environ 350 ppm<sup>4</sup>. Dans la région confinée, il varie avec les saisons, de manière périodique, avec un maximum à la fin de l'été, vers septembre-octobre, (environ 2,5 % au Petit Lac) et un minimum en hiver (moins de 2 000 ppm au Petit Lac). Cela prouve que le CO<sub>2</sub> dans la grotte et abîme de Comblain-au-Pont est d'origine naturelle, lié à l'activité biologique du sol (Ek, 1979; Gewelt & Ek, 1986). Les données de M. Naparus, C. Ek et J. Godissart (Naparus, 2004) sont beaucoup plus précises que les nôtres

<sup>4</sup> ppm = parties pour 1 million ; 10 000 ppm = 1 %.

en ce qui concerne le CO<sub>2</sub>, et nous ne faisons ici que confirmer ce qui est déjà connu.

### 3.6. Conclusion concernant le climat de la grotte et abîme

La circulation est simple à comprendre en hiver (fig. 8). La grotte se comporte, dans sa région ventilée, comme un tube à vent, avec l'air froid extérieur entrant par l'entrée inférieure, c'est-à-dire l'entrée artificielle, et ressortant

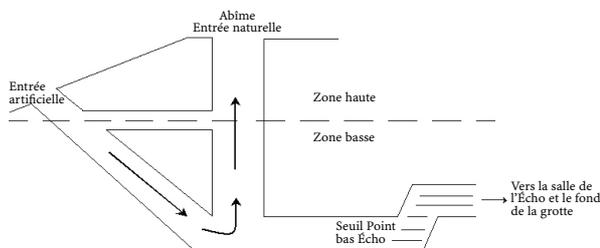


FIG. 8. – Représentation schématique de la circulation de l'air dans la région ventilée de la grotte et abîme de Comblain-au-Pont (vue en coupe). D'après les explications de J. Godissart, qui considère que les colonnes d'air des parties basse et haute doivent être considérées séparément pour les calculs de débits.

ensuite par l'abîme après s'être réchauffé dans la grotte. Le point bas se trouvant juste avant la salle des Échos est une barrière topographique qui empêche l'air froid de se propager jusque dans la salle. On a un gradient vertical de température au niveau de ce point bas, l'air étant plus chaud dans la salle des Échos que dans la région ventilée fonctionnant comme un tube à vent.

En été, le courant d'air s'arrête. Dans un tube à vent classique (Trombe, 1952 ; Choppy, 1986a ; Godissart, 2001), on aurait eu une inversion du sens du courant d'air en été car, pendant cette saison, l'air dans la grotte est plus froid, donc plus dense, que l'air extérieur. Il aurait donc tendance à sortir de la grotte par l'entrée la plus basse, alors que de l'air chaud extérieur, plus léger, serait entré par l'entrée supérieure. À Comblain, pourtant, le courant d'air en été est très faible, voire quasi nul, et son sens varie fréquemment, de manière oscillatoire. En effet, la morphologie descendante de la grotte fait que les deux entrées sont trop hautes pour que l'air froid puisse s'échapper comme dans un tube à vent classique. Nos mesures montrent d'ailleurs que la grotte reste très froide l'été par rapport à la température extérieure et par rapport aux autres cavités étudiées.

En raison de sa morphologie descendante et de ses deux entrées, la grotte possède à la fois les caractéristiques d'un tube à vent et d'un piège à air froid. On pourrait donc considérer le comportement de la région ventilée comme intermédiaire. Du point de vue de la température et des échanges de chaleur, la grotte se comporte plutôt comme un piège à air froid, puisque l'air froid s'accumule en hiver dans le massif et celui-ci libère les frigidités stockées pendant l'été, de sorte que la grotte est toujours relativement froide. Mais, du point de vue des courants d'air, la grotte se comporte clairement comme un tube à vent l'hiver.

## 4. La carrière souterraine de Petit-Lanaye inférieure

### 4.1. Présentation générale de la cavité

La carrière souterraine de Petit-Lanaye inférieure<sup>5</sup> est une des nombreuses carrières creusées dans la craie de la Montagne Saint-Pierre, située entre les vallées du Geer et de la Meuse,

près de la frontière belgo-hollandaise. N'étant plus exploitée depuis les années 1930, la carrière de Petit-Lanaye inférieure a la forme d'un réseau labyrinthique de hautes galeries subhorizontales, qui se sont développées sur une quinzaine de kilomètres. Les passages sont hauts d'une dizaine de mètres et larges de 4 à 5 m. Plusieurs carrières, séparées à l'origine, ont fini par fusionner. Ceci explique des différences d'altitude observées dans les planchers et les voûtes de certains secteurs par rapport à d'autres.

Il existe de nombreuses entrées plus ou moins accessibles. L'entrée principale mentionnée sur la carte (fig. 9) est celle par laquelle nous entrons. Les « porches » sont des ouvertures à flanc de versants plus ou moins abrupts. Les autres accès sont en général partiellement murés et donc difficilement accessibles. Plusieurs puits verticaux laissent aussi entrer et sortir l'air. Certaines entrées étant facilement accessibles, les carrières sont régulièrement parcourues par de nombreux visiteurs intempestifs. Les parois de la carrière sont couvertes de graffitis et de nombreux déchets jonchent le sol. Nous avons donc placé les instruments de mesure en hauteur mais, malgré cela, un des *dataloggers* a été volé.

Contrairement à la grotte de Ramioul et à la grotte et abîme de Comblain-au-Pont, où le climat était déjà partiellement connu, la carrière souterraine de Petit-Lanaye inférieure n'avait jamais fait l'objet d'une étude climatique approfondie (Brioz, 2005). L'étude que nous avons menée dans la carrière a duré six mois et est une première étape d'une étude qui, nous l'espérons, sera poursuivie.

### 4.2. Lieux de mesure

Le premier *datalogger* (Ecolog porches) a été installé dans un des couloirs latéraux à proximité des porches (point A sur la figure 9). Les deux sondes ont été placées à environ 4,5 m de hauteur, à peu près au milieu de la galerie, dans le couloir latéral. Le second instrument (Ecolog ch-souris) se trouve dans un endroit où nous avons remarqué la présence de nombreuses chauves-souris en hibernation (point B sur la figure 9). La carrière souterraine de Petit-Lanaye est l'un des plus grands dortoirs à chauve-souris de Wallonie et il était donc particulièrement intéressant de caractériser le climat dans lequel elles vivent. Assez proche des porches également, le point B est plus à l'intérieur de la cavité, et

<sup>5</sup> Coordonnées Lambert :  $x = 243,2$  m ;  $y = 166,0$  m.

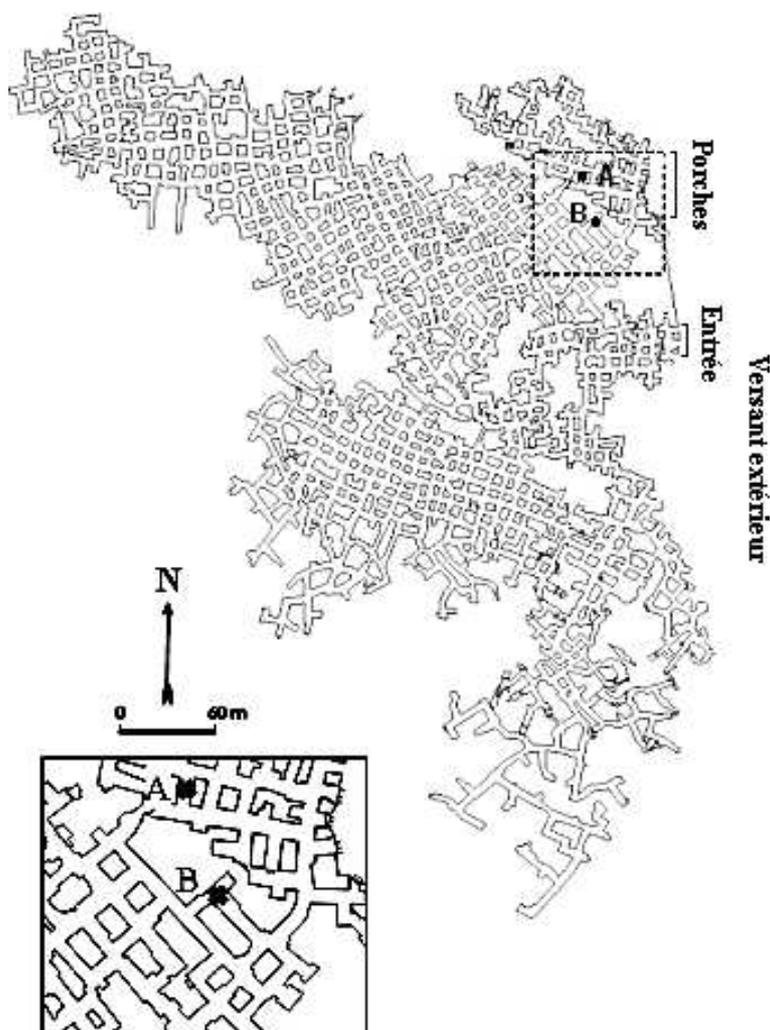


FIG. 9. – Plan de la carrière souterraine de Petit-Lanaye inférieure  
A : Ecolog porches ; B : Ecolog ch-souris

ne subit donc pas directement l'influence des variations extérieures de température. L'obscurité y est totale, alors que le couloir latéral où nous avons placé l'Ecolog Porches est un peu éclairé par une lumière diffuse venant des porches. L'air entrant ou sortant par les porches doit passer par plusieurs embranchements de galeries se croisant à angle droit avant d'atteindre l'emplacement de l'Ecolog ch-souris.

#### 4.3. Comparaison entre les deux endroits de mesure

L'air de la carrière souterraine est plus statique en B, moins sujet aux courants d'air et moins influencé par les variations de la température extérieure, que celui en A (fig. 10), ce qui explique en partie la présence des chauves-souris à cet endroit. Seulement certaines variations de

température mesurées en A se retrouvent en B. Cela est sans doute dû au fait que seulement certaines masses d'air extérieur qui s'engourent dans les couloirs arrivent jusqu'en B. Les différences de température entre les deux lieux de mesure sont en relation avec la ventilation de la grotte, mais nos mesures sont insuffisantes pour pouvoir la caractériser précisément, d'autant plus que — vu la configuration labyrinthique des galeries — la circulation de l'air y est sans doute très complexe.

#### 4.4. Mesures de la journée du 31 mars 2006

Le 31 mars 2006, nous avons réalisé des mesures le long de trois transects dans la carrière. Cela nous a permis de mettre en évidence le fait que deux couloirs proches et parallèles peuvent avoir des comportements opposés (pour l'un, la

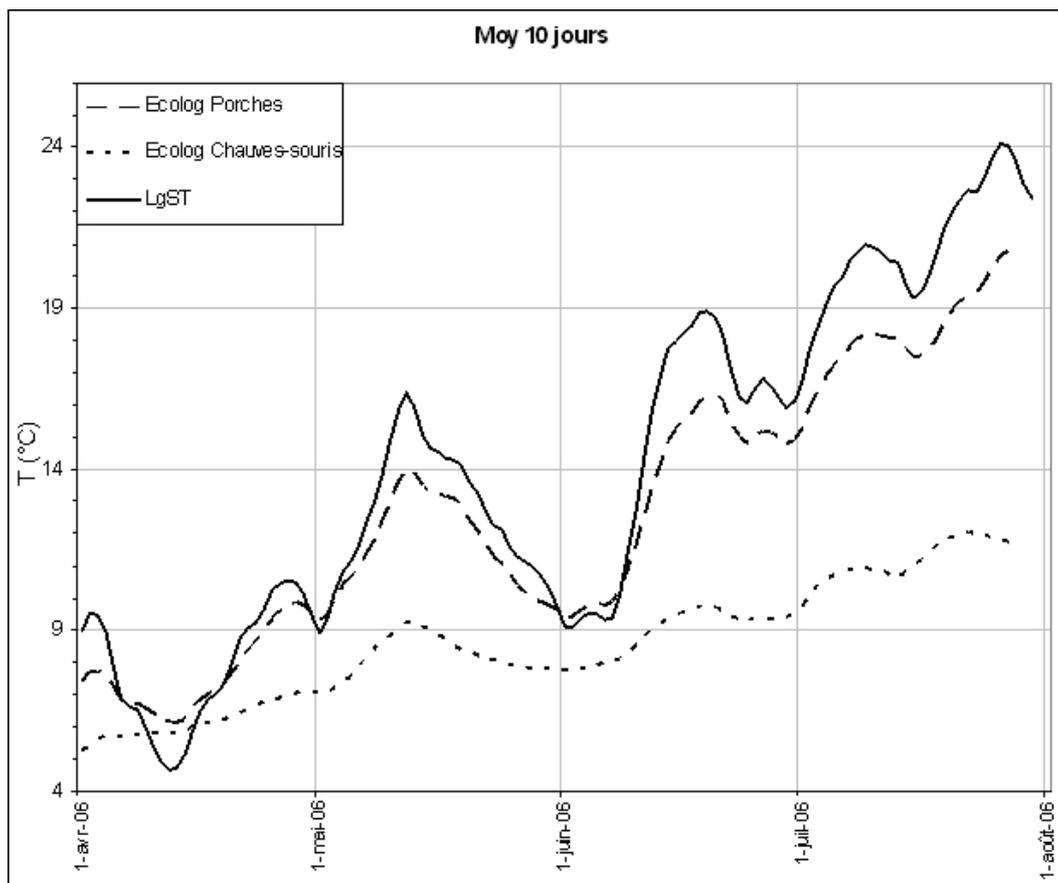


FIG. 10. – Moyennes glissantes sur dix jours des températures mesurées dans la carrière souterraine de Petit-Lanaye inférieure et au Sart Tilman.

température diminue lorsque l'on s'éloigne des porches, et pour l'autre, c'est le contraire), et que c'est la topographie qui est la cause de ces différences. Il existe, en effet, dans le deuxième couloir, une série d'éboulis hauts de 2 à 3 m qui modifient la topographie et donc la circulation de l'air. Dans ce couloir, la température peut varier de plus de 1 °C entre un creux et un sommet d'éboulis, tandis que pour les deux autres transects, il n'y a pas plus de 0,2 °C de différence entre deux points de mesure successifs.

#### 4.5. Conclusion concernant le climat de la carrière souterraine

Les quelques mesures que nous avons réalisées dans la carrière souterraine de Petit-Lanaye inférieure donnent une première idée du climat de la cavité. La forme labyrinthique de la carrière complique l'organisation des courants d'air et nous avons déjà pu mettre en évidence le fait que les deux régions de la carrière, reliées par la

galerie de jonction, réagissent différemment aux variations de la température extérieure. L'Ecolog porches (point A) est le plus influencé par la température extérieure car il n'est pas très loin des porches et en ligne droite par rapport à ceux-ci. L'Ecolog chauves-souris (point B) se trouve dans une région plus statique de la carrière mais enregistre tout de même des variations de température, malgré l'angle droit qui atténue le courant d'air.

Pour mieux comprendre les variations de température à l'intérieur de la carrière, il faudrait pouvoir mesurer les courants d'air dans les différents couloirs, pendant des périodes assez longues, et les mettre en relation avec la température.

#### 5. Conclusion générale

La principale différence entre la grotte de Ramioul et la grotte et abîme de Comblain-au-Pont réside dans leur ventilation. La grotte de Ramioul est fermée par des portes pleines

et n'est donc pas parcourue par des courants d'air importants, tandis que l'entrée artificielle de la grotte de Comblain-au-Pont est fermée par une porte grillagée laissant passer l'air, et l'abîme est une entrée ouverte. La carrière souterraine est particulière car elle comporte de nombreuses entrées, la configuration de ses galeries est labyrinthique, elle est beaucoup plus grande que les deux grottes naturelles. De plus, elle est creusée dans la craie, ce qui influence certainement son climat, car la craie est plus poreuse que le calcaire et absorbe donc l'humidité, cela se répercutant sur la température.

La température est en moyenne plus basse dans la grotte et abîme de Comblain-au-Pont que dans les deux autres cavités<sup>6</sup>, étant donné sa morphologie descendante. En effet, selon le principe du piège thermique, de l'air froid s'accumule en hiver dans la grotte mais ne peut en ressortir l'été, puisque l'air froid est plus dense que l'air chaud. La température des cavités étudiées est donc régie par deux facteurs principaux : la topographie et la ventilation.

L'originalité de cette étude climatologique réside dans le fait que la température a été mesurée et enregistrée en continu, ce qui, à notre connaissance, a été très peu réalisé en Belgique. C'est un avantage certain par rapport aux mesures ponctuelles, qui permettent seulement de voir comment se répartissent les températures dans les cavités, et non comment elles évoluent. Dans les trois cavités étudiées, nous avons véritablement pu mettre en évidence l'évolution des températures sur une année (six mois dans la carrière de Petit-Lanaye inférieure), et étudier les variations de température à différentes échelles de temps. Cela nous a permis de mieux comprendre le climat dans les trois cavités étudiées.

Bien sûr, il reste des questions en suspens, notamment à Ramioul, où les taux de CO<sub>2</sub> sont toujours inexplicables et où l'étage inférieur est inconnu du point de vue climatique, et à Petit-Lanaye. Il serait intéressant de continuer à faire des mesures dans les trois cavités, éventuellement plus espacées, pour pouvoir disposer de séries de longue durée qui pourraient être comparées à des mesures du climat extérieur. La carrière souterraine de Petit-Lanaye pourrait faire l'objet d'une modélisation des courants

d'air dans l'ensemble des galeries et embranchements et cela en relation avec la présence de chauve-souris et le site Natura 2000.

### Remerciements

Pour leur accueil, leur aide sur le terrain et leurs précieux conseils, nous tenons à adresser nos plus sincères remerciements à Michel Dethier, Jean-Marie Hubart, Jules Haeck, Étienne Lebon et Fernand Collin pour la grotte de Ramioul, au Centre d'Initiation et de Formation à l'Environnement (C.I.F.E.C.) et aux animateurs de la grotte et abîme de Comblain-au-Pont, et à la Division Nature et Forêt (D.N.F.) de la Région wallonne, aux membres du Club de Recherche Spéléo Ourthe-Amblève (C.R.S.O.A.) et à Roger Vandenvinne pour la carrière de Petit-Lanaye. Merci aussi à Marc Frédéric, aux étudiants de deuxième licence en géographie de l'Université de Liège, et à toutes les personnes qui nous ont accompagné sur le terrain et qui ont relu ce travail.

### Bibliographie

- BRIFFOZ A., 2005. « Température et hygrométrie dans Lanaye inférieure (21-22.5.2005) », *CRSOA Infos*, 329 : 27-31.
- CHOPPY J., 1986a. *Processus climatiques dans les vides karstiques. Première partie : Dynamique de l'air*, 2<sup>e</sup> édition, Paris, 72 p.
- CHOPPY J., 1988. *Processus climatiques dans les vides karstiques. Deuxième partie : Composition de l'air*, 2<sup>e</sup> édition, Paris, 79 p.
- CHOPPY J., 1990. *Processus climatiques dans les vides karstiques. Troisième partie : Température de l'air*, 2<sup>e</sup> édition, Paris, 73 p.
- CHOPPY J., 1986b. *Processus climatiques dans les vides karstiques. Quatrième partie : Microclimats*, Paris, 76 p.
- EK C., 1979. « Variations saisonnières des teneurs en CO<sub>2</sub> d'une grotte belge : le Trou Joney à Comblain-au-Pont », *Annales de la Société géologique de Belgique*, 102 : 71-75.
- EK C. & HUBART J.-M., 1988. *La grotte de Ramioul et son site, Problèmes d'environnement*, Livret-guide de l'excursion du 4 juin 1988 de la Société Géographique de Belgique, 12 p.
- GEWELT M. & EK C., 1986. « L'évolution saisonnière de la teneur en CO<sub>2</sub> de l'air de deux grottes belges : Ste-Anne et Brialmont, Til », *New directions in karst*, Proceedings of the Anglo-French Karst Symposium

<sup>6</sup> Rappelons cependant que l'étage inférieur de la grotte de Ramioul n'a pas été étudié.

- (1983), edited by K. Paterson & M. M. Sveeting, Geo Books, Norwich, p. 49–76.
- GODISSART J., 1975. « Températures et régimes thermiques des grottes belges », *Speleologica Belgica*, 3 : 34–39.
- GODISSART J., 2001. « Le tube à vent de l'abîme de Beaumont à Esneux », *Geological Survey of Belgium, Professional Paper*, 295 : 18–20.
- HUBART J.-M., 2003. *Rapport sur la présence de CO dans la grotte de Ramioul*, inédit, 4 p.
- LISMONDE B., 2002a. *Climatologie du monde souterrain, Tome 1 : Vent des ténèbres*, CDS Isère, Grenoble, 167 p.
- LISMONDE B., 2002b. *Climatologie du monde souterrain, Tome 2 : Aérologie des systèmes karstiques*, CDS Isère, Grenoble, 362 p.
- MASSEN F., BOES C., EK C., FABER S., KIES A., SCHINTGEN G., SINNER E. & WARINGO G., 1997. *The Moestro cave. A study on the Geology and Climate of Luxembourg's largest maze cave*, Centre de recherche publique – Centre Universitaire, Luxembourg, 199 p.
- NAPARUS M., 2004. *Morphologie des stalagmites et micro-climatologie à la Grotte et l'Abîme de Comblain-au-Pont (Belgique)* (Travail de fin d'étude Erasmus), Université de Liège, 31 p.
- PIRON J., 2006. *Contribution à l'étude du climat de trois cavités souterraines belges. La grotte de Ramioul, la grotte et abîme de Comblain-au-Pont et la carrière souterraine de Petit-Lanaye inférieure*, Mémoire présenté pour l'obtention du grade de licenciée en sciences géographiques, Université de Liège, Faculté des Sciences, 172 p.
- TROMBE F., 1952. *Traité de spéléologie*, Payot, Paris, 367 p.
- VAN DEN BROECK E., MARTEL R.-A. & RAHIR E., 1910. *Les cavernes et les rivières souterraines de la Belgique*, Tome 2, *Carbonifère*, p. 44–52 des annexes.
- WILLEMS L., RODET J., FOURNIER M., MASSEI N., LAIGNEL B., DUSSART-BAPTISTA L., SCHYNS J.-C., DUSAR M. & EK C., 2005. « Genèse d'un système karstique dans la craie en Basse Meuse (Frontière belge-néerlandaise) », *Karst et Aménagement du territoire*, Région wallonne, Jambes, poster.
- WILLEMS L., RODET J., FOURNIER M., LAIGNEL B., DUSAR M., LAGROU D., POUCKET A., MASSEI N., DUSSART-BAPTISTA L., COMPÈRE P. & EK C., 2006. « Polyphase karst system in Cretaceous chalk and calcarenite of the Belgian-Dutch border », *Zf. für Geomorphologie*, Berlin – Stuttgart (sous presse).

Adresse de l'auteur :

Julie PIRON  
Rue de la Casquette, 29  
4000 Liège  
BELGIQUE  
julie.piron@gmail.com