

# L'atmosphère de la grotte de Ramioul

Jean GODISSART et Camille EK

---

À Jean-Marie Hubart, pionnier des études scientifiques  
de la grotte de Ramioul et ardent défenseur de la cavité

## RÉSUMÉ

La grotte de Ramioul se trouve sur la rive droite de la Meuse, à 15 km à l'ouest de la ville de Liège. Son développement est de l'ordre de 1200 mètres répartis en trois étages dont l'inférieur est parcouru par deux ruisseaux.

Depuis novembre 2004, un puits de trente mètres, reliant les deux étages inférieurs de la grotte, rejette du CO<sub>2</sub> avec des concentrations atteignant parfois 8 %.

Dès octobre 2008, les teneurs en CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub> et CO sont enregistrées en continu ainsi que les concentrations en radon qui fut détecté vers la même époque.

Les histogrammes de production du CO<sub>2</sub>, pour les années 2008 et 2009, montrent des maximums en hiver et des minimums en été, ainsi qu'une production plus élevée d'un facteur 12 à 20 par rapport aux grottes classiques.

Il semblerait, dans le cas présent, que l'origine du CO<sub>2</sub> ne soit pas seulement pédologique mais provienne surtout de la réaction chimique des eaux d'infiltration chargées d'oxygène sur les pyrites contenues dans les schistes namuriens, en contact avec le calcaire carbonifère.

MOTS-CLÉS : grotte, karst, calcaire, schiste, dioxyde de carbone, monoxyde de carbone, radon, *monitoring*, tube à vent.

## ABSTRACT

*Ramioul cave is located on the right bank of the Meuse river, 15 km west of Liege. Its total length is about 1200 m.*

*Since November 2004, a 30 meters shaft, connecting two storeys of the cave, has been giving off carbon dioxide concentrations as high as 8%.*

*CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub> and CO gases have been monitored since October 2008, as well as radon which was detected a little earlier.*

*Carbon dioxide histograms show maxima in winter, minima in summer and a production ranging from between 12 and 20 times that of other caves in Belgium.*

*It looks as if in this case the origin of the CO<sub>2</sub> is not to be found in the soil covering the limestone but perhaps in the oxidization of seepage water upon pyrites, contained in the Namurian shales close to Carboniferous limestone.*

*In the past, Carbon monoxide has been observed in the cave which is located next to a quarry, but is no longer present in the cave atmosphere.*

KEYWORDS: *cave, Karst, limestone, shale, carbon dioxide, carbon monoxide, radon, monitoring, chimney effect.*

## Avant-propos

Le 12 décembre 1971, une équipe de spéléologues descendait dans la grotte de Rosée, à quelques centaines de mètres de la grotte de Ramioul, pour observer les effets de récents tirs violents de la carrière voisine : ces déflagrations n'avaient-elles pas endommagé les magnifiques et célèbres fistuleuses de plus d'un mètre de long décorant la grotte ? C'est un tout autre effet des tirs qui se manifesta : toute l'équipe fut intoxiquée par des émanations de monoxyde de carbone. Le pire ne fut évité que parce qu'en surface une autre équipe incluant l'un de nous (C. E.) s'appropriait à visiter la grotte en compagnie de Jean-Marie Hubart et de deux de ses compagnons, Jean-Pierre Discry et André Vivier.

Après avoir alerté les services de secours, nous descendîmes dans la grotte pour en extraire les asphyxiés ; la dernière du groupe fut sortie sans connaissance. Une ambulance médicalisée les conduisit à l'hôpital.

*« La présence de CO est probablement due au fait que les gaz produits par les tirs de mine effectués cinq jours plus tôt à cent mètres de l'entrée ne se sont pas dissipés normalement mais ont fusé dans la grotte, grâce sans doute à un réseau de fentes » (Bulletin trimestriel des Chercheurs de la Wallonie, n° 49, janvier 1973).*

Jean-Marie Hubart nous entretint alors des préoccupations profondes que lui causait la protection des grottes de Rosée et de Ramioul. Ce jour-là commencèrent nos aventures avec Jean-Marie Hubart et les gaz des grottes.

## 1. Introduction

La grotte de Ramioul fut classée en 1938. Son étage inférieur, découvert bien après la procédure de classement, déborde largement du périmètre protégé ; il fut l'objet d'une convention de protection entre la commune de Flémalle, la société Carmeuse et les Chercheurs de la Wallonie, en 1987.

Comme la grotte recèle plusieurs espèces animales rares et vulnérables, elle a été érigée en cavité souterraine d'intérêt scientifique (CSIS) en 2001.

Ceci ne l'a pas mise à l'abri de tous les dangers. En 2004, plusieurs cas de malaises ont été relevés lors de visites guidées. Des mesures effectuées par l'ISSEP ont révélé une teneur de 7 % de CO<sub>2</sub> (dioxyde de carbone) et 14 % d'O<sub>2</sub> (oxygène) seulement, alors que la teneur normale à l'air libre est de 20,9 % d'oxygène et de 0,03 % de dioxyde de carbone.

À la même époque, Jean-Marie Hubart rappelait les occurrences dangereuses de CO (monoxyde de carbone) relevées depuis 2001. Les teneurs relevées ont atteint, par exemple, 485 ppm (parts par million), le 8 juin 2001, et 239 ppm, le 23 avril 2003, alors que le maximum admissible est de 25 ppm (norme de l'*American Conference of Governmental Industrial Hygienists*, ACGIH).

Alerté par ces épisodes dangereux, l'un de nous (J. G.) plaça, dans la grotte, en septembre 2007, deux coupelles de charbon actif pour doser le radon à l'orifice du puits Bernard (ou P30). Les mesures effectuées, à sa demande, par l'IRISIB (Institut de Recherche de l'Institut supérieur industriel de Bruxelles), sur ces deux échantillons, révélèrent les teneurs excessives de 8,7 et 10,6 kBq/m<sup>3</sup> (kilobecquerels par mètre cube), sans soulever la moindre inquiétude de la part du responsable des mesures.

Les soucis de Jean-Marie Hubart au sujet de l'atmosphère de la grotte étaient, on le voit, pleinement justifiés.

C'est ce qui nous a décidés à consacrer à la cavité une étude de trois gaz potentiellement dangereux :

- le dioxyde de carbone,
- le monoxyde de carbone
- et le radon.

Sur ce dernier gaz, nous serons très brefs car nous avons fait appel à un spécialiste, le professeur Willy Vanderschueren, qui lui consacre, dans ce même volume, une étude spécifique.

## 2. La grotte

### 2.1. Le cadre géologique

#### 2.1.1. La structure

La grotte de Ramioul s'est développée dans le flanc sud d'un synclinal carbonifère d'axe est-ouest situé sur la rive droite de la Meuse, à proximité du contact avec les schistes namuriens qui occupent le noyau du synclinal (voir la carte géologique, fig. 1). La géologie a été levée par E. Poty et est décrite en détail dans Ek & Hubart, 1988, d'où nous tirons la substance de ce qui suit. La grotte se développe dans le Viséen. Les étages moyen et supérieur de la cavité sont dans le V3 tandis que l'étage inférieur traverse en plus le V1 et le V2 (fig. 2). Si le V2 et le V3 sont essentiellement calcaires, le V1 est, lui, partiellement dolomitique.

#### 2.1.2. L'ampélite

Les schistes namuriens surmontent stratigraphiquement le calcaire. Ils comportent, au contact même de celui-ci, une *ampélite*, schiste noir riche en pyrite et en sulfates d'aluminium, de potassium et parfois d'autres composés alcalins. Le mot *ampélite* vient du grec *ampelos*, la vigne, car ce matériau fut jadis largement utilisé pour fertiliser les terres des vignobles (Fraipont, 1936).

Les schistes à ampélites colorent en rouge certains versants de la Meuse entre Huy et Liège. Ils ont été largement exploités en carrières souterraines, non seulement pour l'amendement des vignes, mais aussi pour le dégraissage des laines et la fixation de leurs colorants (Delatte, 1951). Les eaux météoriques infiltrées dans ces schistes acquièrent une réaction acide qui les rend corrosives vis-à-vis du calcaire (Cosyns, 1907).

### 2.2. Le contexte hydrogéologique

La grotte de Ramioul se situe entre les pertes d'un ruisseau (les chantoirs du Champ des Oiseaux) et l'émergence du cours souterrain (la « résurgence » du Bruta) ; c'est donc une grotte du type « réseau chantoir-résurgence » dans la classification d'Yves Quinif (1977).

Les chantoirs du Champ des Oiseaux sont situés non loin de la faille eifélienne, qui marque en cet endroit le contact du calcaire carbonifère avec l'imperméable dévonien (fig. 1).

Les eaux circulent dans l'étage inférieur de la grotte, qui est actuellement interdit d'accès à cause d'occurrences sporadiques de dioxyde de carbone et, plus rarement, de monoxyde de carbone. Cet étage est essentiellement orienté nord-sud et se développe donc perpendiculairement aux étages moyen et supérieur parcourus par les visiteurs (fig. 2).

Après leur traversée du calcaire carbonifère, les eaux parcourent souterrainement des schistes namuriens, et, pour commencer, les schistes à ampélites, jadis exploités pour la fabrication d'alun. Elles ressortent dans le village de Ramioul sous le nom de « résurgence » du Bruta. Mais les schistes qu'elles viennent de traverser ne sont guère karstifiables ; il ne peut donc s'agir d'une résurgence vraie. Nous pensons que l'on est en présence d'une araine, drain creusé par les mineurs pour l'évacuation des eaux de mine ; les ampélites étaient, en effet, exploitées là souterrainement. Le bloc-diagramme (fig. 3) est un essai de représentation en perspective de la circulation des eaux, de leur perte (au Champ des Oiseaux) à leur réapparition au jour (au Bruta, à Ramioul).

Le découpage du bloc-diagramme évoque d'ailleurs – certes très schématiquement, et imparfaitement – une réalité physique, car les travaux de la carrière ont sapé le massif tant à l'est qu'à l'ouest de la grotte.

## 3. Trois constituants de l'air de la grotte

Comme nous l'avons dit plus haut, cette étude est essentiellement consacrée à trois gaz : le dioxyde de carbone, le monoxyde de carbone et le radon.

### 3.1. Le dioxyde de carbone

#### 3.1.1. Les observations antérieures

L'épisode d'asphyxie que nous avons relaté dans l'avant-propos n'est pas le premier connu dans la région. À une date indéterminée, probablement dans les toutes dernières

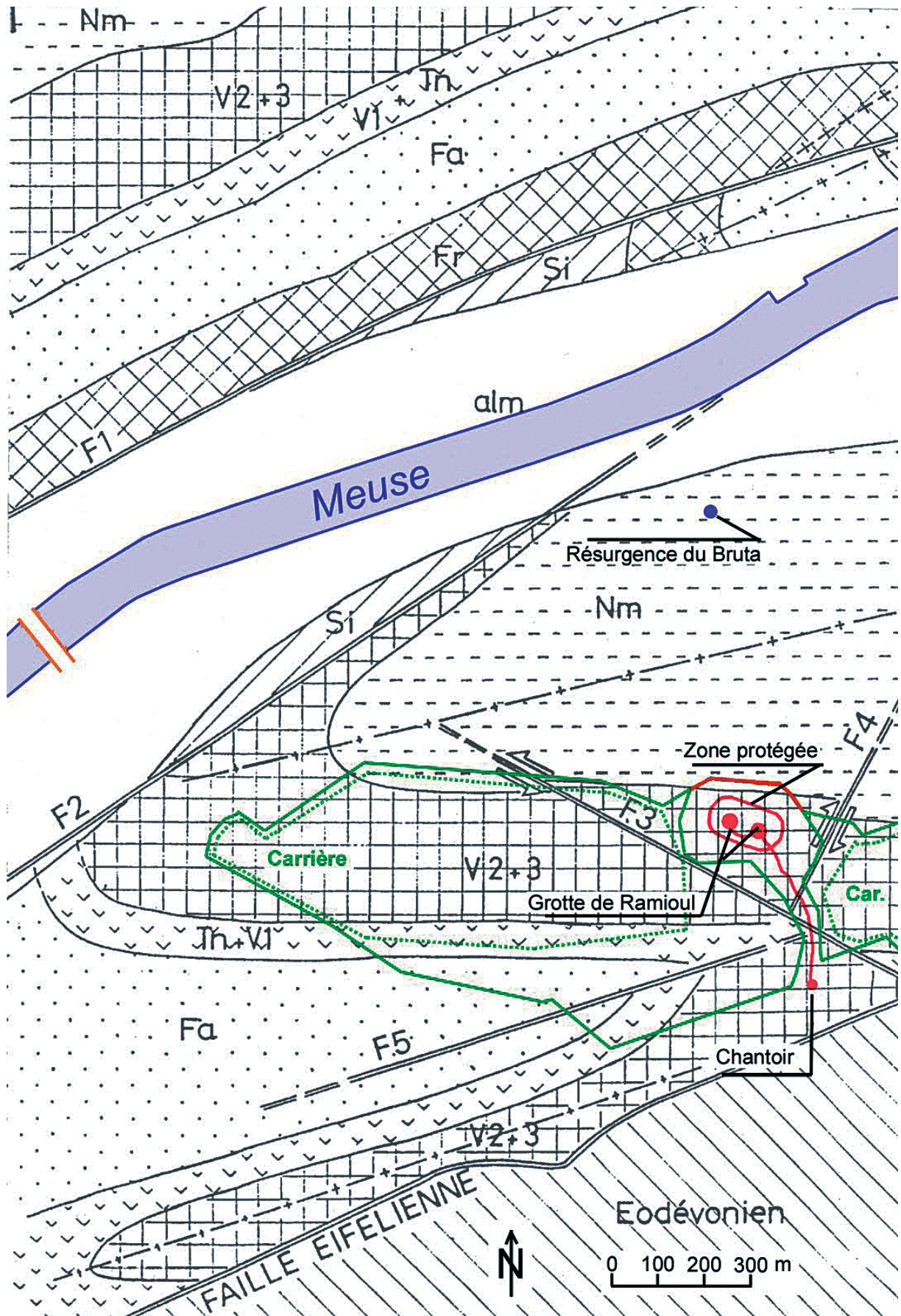


Fig. 1. – La grotte de Ramioul dans son cadre. En rouge : la grotte (tracé très schématisé). En vert : les carrières. En brun : le chemin de contournement de la grotte et le pont d'Engis. Géologie d'après E. Poty (in Ek & Hubart, 1988). Si : Silurien. Fr : Frasnien. Fa : Famennien. Tn+V1 : Tournaisien et Viséen inférieur. V2+V3 : Viséen moyen et supérieur. Nm : Namurien. F1 à F5 : failles.

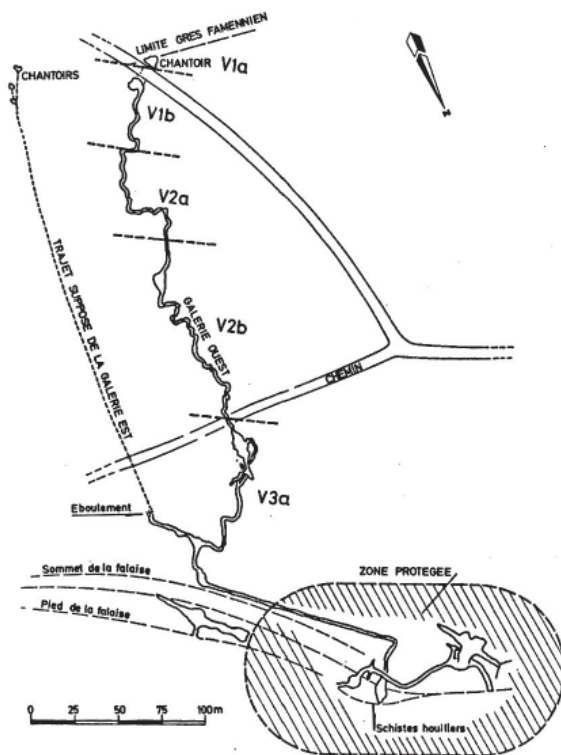


Fig. 2. – La grotte de Ramioul. Plan. Limites géologiques d'après E. Poty (in Ek & Hubart, 1988). On voit que tout l'étage inférieur (galerie est et galerie ouest) est en dehors du site classé, tout comme la grotte aux Végétations (juste à l'est de la précédente).

années du XIX<sup>e</sup> siècle, M. Doudou, descendu dans le trou du Diable une première fois sans incident, eut la désagréable surprise de trouver, à sa deuxième visite, une nappe de CO<sub>2</sub>. Sa mésaventure est relatée par Van den Broeck, Martel et Rahir (1910, tome II, annexes : 51-52). Il ne s'agissait pas alors de CO. Le trou du Diable est situé dans une paroi calcaire mise à jour lors de l'exploitation des schistes à ampélites, riches en pyrite ; c'est aux réactions du sulfure de fer avec les eaux météoriques que Van den Broeck, Martel et Rahir, qui relatent l'épisode, attribuent le dégagement de dioxyde de carbone (1910, tome II : 1586-1592).

Plus récemment, en novembre 2004, plusieurs cas de malaises ont été signalés au cours des visites guidées dans la grotte de Ramioul. Ces malaises disparaissaient à la sortie, ce qui donne bien à penser qu'ils étaient dus au dioxyde de carbone (note inédite de Jean-Marie Hubart au Conseil d'administration des Chercheurs de la Wallonie du 1er décembre 2004).

La société Carmeuse, informée par le directeur du Préhistorite, a fait procéder à une analyse d'air par l'ISSEP. Au lieu des 21 % d'oxygène présents dans un air normal, il y avait 14 % d'oxygène et 7 % de dioxyde de carbone (note citée).

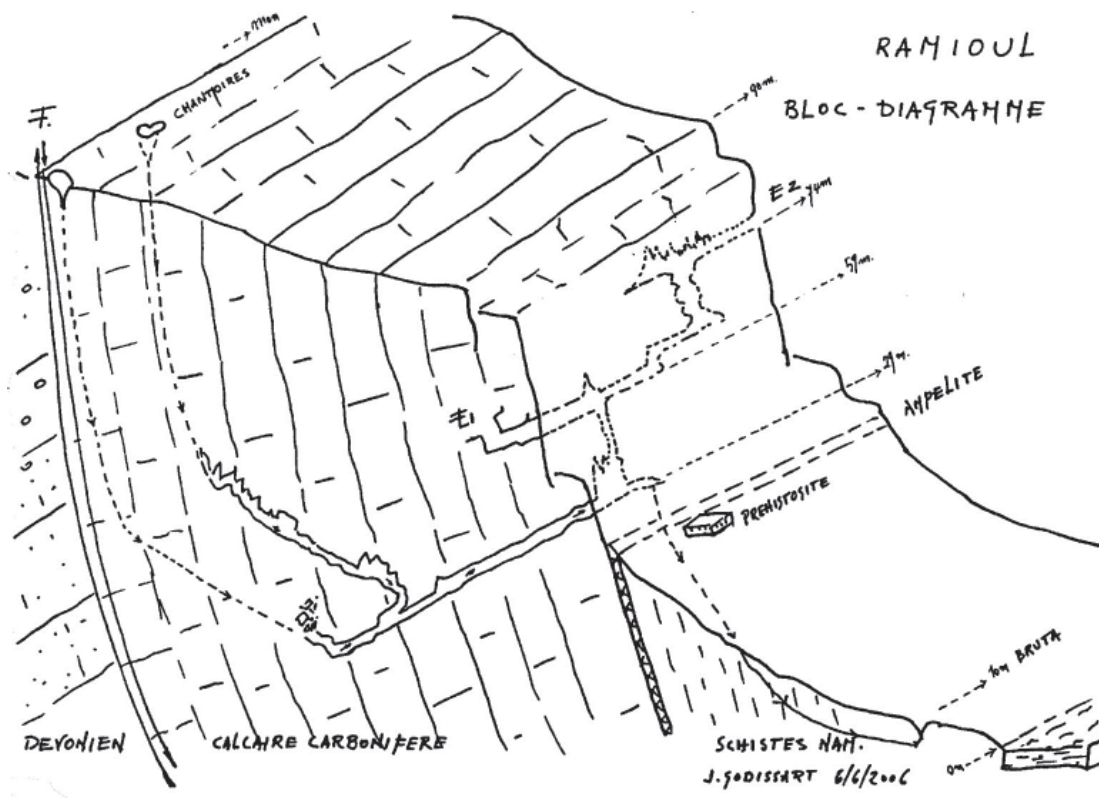


Fig. 3. – Bloc-diagramme. Vue très schématique de la grotte dans son contexte géologique et hydrogéologique, des chantoirs par où l'eau pénètre sous terre jusqu'à la source du Bruta. Dans le bas de la figure, à droite, la Meuse.

### 3.1.2. Nos premières mesures

La grotte de Ramioul étant une *Cavité souterraine d'Intérêt scientifique* (ceci est un statut officiel au Service public de Wallonie), les problèmes liés à la qualité de l'atmosphère de la grotte ont incité le Comité de gestion à nous demander une étude de la question. À plusieurs reprises, nous avons mesuré, dans la grotte, des teneurs supérieures à 1,5 % de CO<sub>2</sub>. Ces épisodes sont entrecoupés de périodes où le dioxyde est très peu abondant, parfois pas plus que dans l'air extérieur. C'est ainsi que l'air sortant du puits Bernard contenait 3,4 % de CO<sub>2</sub> en février 2005, mais n'en avait plus que 400 ppm en mars<sup>1</sup>.

Nous donnons, à titre d'échantillon, un tableau montrant l'alternance de périodes très pauvres en CO<sub>2</sub> et de périodes d'abondance excessive (tableau 1).

Tableau 1

1. Salle d'entrée, à 1,80 m au-dessus du sol.
2. Orifice du P30, au niveau du sol.
3. Au P30, à 1,80 m au-dessus du sol.
4. 10 m plus loin, vers l'intérieur de la grotte, à 1,80 m au-dessus du sol.

Note. Le 8 mars 2005, un extracteur d'air fonctionne dans le P30 (puits Bernard) et refoule l'air de ce puits à l'extérieur.

Année	Date	Teneur en CO <sub>2</sub> de l'air (ppm)			
		1 (1.8m)	2 (0m)	3 (1.8m)	4 (1.8m)
2005	15/01	400	33 000		7 500
	08/03	-	400	-	-
	14/10	10 000	19 000	2 500	-
	20/12	500	500	500	500
2006	13/01	-	400	400	500
	15/09	5 100	15 000	2 000	1 400
	03/11	450	500	500	700
	20/12	500	14 500	2 500	3 000
2007	12/09	500	600	600	600
	27/11	500	17 000	3 500	3 500
	19/12	400	500	500	500
2008	17/01	3 200	21 000	11 000	7 000

Dans ce tableau, comme dans toutes nos analyses, les faibles teneurs en CO<sub>2</sub> sont affectées d'une erreur de +/- 50 ppm et, en tout cas, ne risquent pas une erreur de 100 ppm. Au-dessus de 1000 ppm, l'erreur de mesure devient nettement inférieure à 10 % de la valeur mesurée.

Les mesures ont été prises, comme nous le faisons d'habitude, à 180 cm et à 30 cm (parfois 10) au-dessus du sol de la galerie. En effet, c'est la teneur à hauteur de nez qui importe pour la respiration, mais les mesures au ras du sol montrent des gradients ou des différences de masses d'air ou des courants d'air non négligeables.

Le tableau montre surtout qu'il y a parfois de très fortes teneurs en CO<sub>2</sub> dans le puits et à son orifice.

La teneur en CO<sub>2</sub> de l'air de la grotte de Ramioul varie très fort, on le voit, et de façon très irrégulière.

La plupart des maximums ont été observés en hiver, mais de façon épisodique.

Une étude de Julie Piron *et al.* (2007), essentiellement basée sur un mémoire de fin d'études de la première (Piron, 2006), a donné des résultats absolument en accord avec nos observations. De plus, disposant de plusieurs enregistreurs continus, elle a mis en évidence la rapidité parfois très grande des augmentations temporaires de la teneur de l'air en CO<sub>2</sub>.

Un autre fait à remarquer est l'apparition du dioxyde de carbone et du radon au début des années 2000, probablement entre 2000 et 2004. C'est du moins à cette époque que l'on a pu prendre conscience d'une présence intempestive et excessive de ces gaz. Sans doute, leur apparition soudaine est-elle imputable à des modifications du système de fissures de la roche calcaire, soit par l'ouverture à l'air libre de certains conduits, soit par le poids de remblais de couverture, ce qui aura eu pour effet de perturber le trajet souterrain des gaz.

<sup>1</sup> 1 % = 10 000 ppm ; 400 ppm = 0,04 %

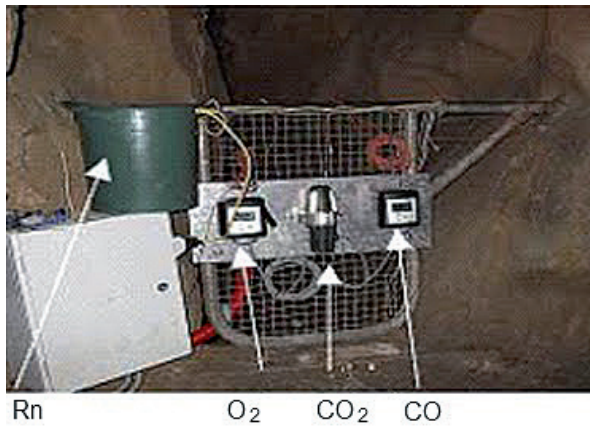


Fig. 4. – Enregistreur multigaz Dräger installé au sommet du P30. Devant la grille du garde-corps, de gauche à droite, les capteurs de  $O_2$ ,  $CO_2$  et  $CO$ , dont les mesures (faites toutes les 20 secondes) sont transmises au *data logger* situé à l'entrée de la grotte. La flèche d'extrême-gauche pointe le conteneur de l'enregistreur de radon, le détecteur de radon proprement dit se trouvant dans le puits à trois mètres de profondeur.



Fig. 5. – L'analyseur à infra-rouge portatif à lecture directe Dräger X-am 7000

### 3.1.3. Le monitoring Dräger et ses résultats

La société Carmeuse a fait installer, dans la grotte, au sommet du puits, à la demande de la direction du Préhistosite et du Comité de gestion de la *Cavité souterraine d'intérêt scientifique (CSIS)*, un système d'enregistreur multigaz Dräger (fig. 4), dont les données nous parviennent mensuellement sous forme de tableau Excel comprenant (pour le seul  $CO_2$ ) 4321 mesures par jour. Comme les données sont enregistrées pour les trois capteurs, les tableaux Excel mensuels comportent quelque 388 890 mesures que nous dépouillons régulièrement. Toutefois, la concentration en  $CO$ , recherchée toute les vingt secondes, comme celle des autres gaz, s'est toujours avérée nulle.

Le professeur Willy Vanderschueren a installé là aussi – au-dessus du P30 – son dispositif de mesure du radon, dont la sonde est suspendue à trois mètres de profondeur dans le puits. Les résultats de ses travaux sont exposés dans le même volume (Vanderschueren, 2010).

À ce dispositif, nous avons ajouté temporairement deux autres *data loggers* : le premier enregistre les températures de l'air au sommet du P30 et le second, qui est une sorte de bascule anémométrique à trois états de notre conception (J. G.), enregistre le sens des échanges.

Les vitesses dans le courant d'air ont été mesurées ponctuellement au moyen d'un anémomètre thermique ; elles sont généralement très proches de 10 cm/sec à la margelle du puits. Cet appareil nous a permis de mesurer les débits de la veine fluide et, partant, la production de dioxyde de carbone, en  $m^3$  de  $CO_2$  pur par semaine.

Les gradients verticaux de  $CO_2$  dans le flux d'air furent également mesurés avec l'appareil portatif Dräger X-am 7000 (fig. 5). Cet instrument, rapide et sensible, nous a été aimablement prêté par le professeur J.-M. Bouquegneau, du Département des Sciences de l'Environnement de l'Université de Liège.

Ainsi, nous avons pu calculer les débits de la veine fluide et, partant, la production de  $CO_2$ , ramenée en  $m^3$  de  $CO_2$  pur par semaine.

L'histogramme (fig. 6) représente le cycle annuel du  $CO_2$  depuis le 27 octobre 2008 jusqu'au 22 mars 2010. Sa courbe enveloppe

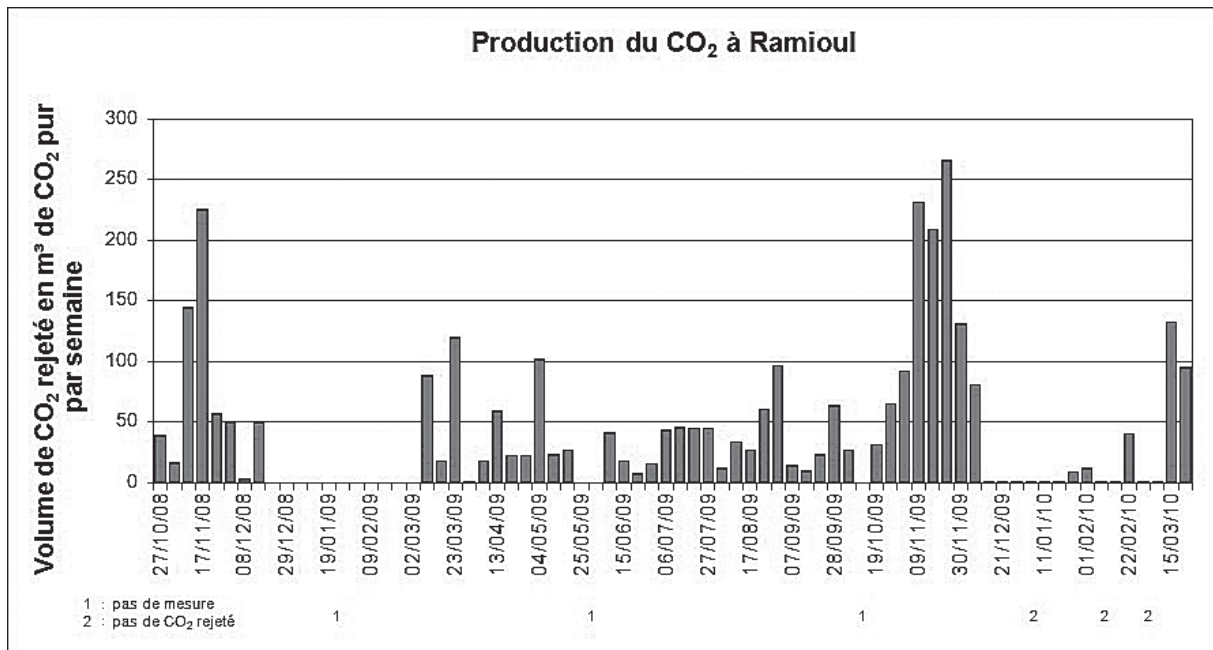


Fig. 6. – Histogramme de la production hebdomadaire de CO<sub>2</sub> par le P30, du 27 octobre 2008 au 22 mars 2010. Les volumes sont exprimés en m<sup>3</sup> par semaine. On note un maximum net au début de la saison froide.

montre un minimum estival et un pic qui semble se manifester chaque année au début de la saison froide.

La production de dioxyde de carbone pour l'année 2009 est de 2200 m<sup>3</sup> de CO<sub>2</sub> pur. Elle est beaucoup plus élevée que celle d'autres grottes de Belgique. Ainsi, à la grotte de la Fontaine de Rivière, à Hamoir, cavité d'un volume de l'ordre de 30 000 m<sup>3</sup>, la production annuelle de gaz carbonique est de 180 m<sup>3</sup>. C'est de l'ordre de douze fois moins qu'à Ramioul. Encore, le maximum, à la Fontaine de Rivière, est-il estival, lié à l'activité de la biomasse, ce qui n'est pas le cas à Ramioul.

Ajoutons que le chiffre de 2200 m<sup>3</sup> est une valeur minimale. En effet, elle ne tient pas compte du CO<sub>2</sub> rejeté à l'extérieur lors des inversions du sens de circulation, comme nous le verrons plus loin, ni de l'erreur systématique induite par une installation des capteurs malencontreusement fixés à l'abri du flux d'air émanant du puits.

La figure 7 montre la position des capteurs au sommet du puits Bernard (ou P30). À gauche, le puits, à droite, le sentier de visite. Sur le garde-corps, on a fixé une plaque d'aluminium et, sur celle-ci, des capteurs posés de telle façon qu'ils sont à l'abri du flux de gaz issu du puits. Nous avons comparé les don-

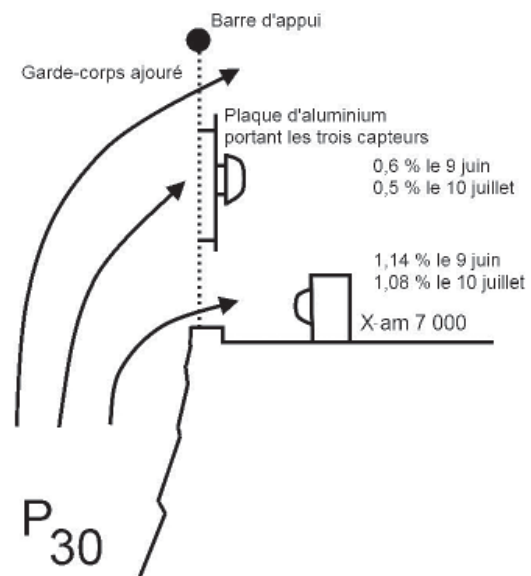


Fig. 7. – Installation de capteurs au sommet du P30. L'appareil Dräger X-am 7000 posé sur le sol est portatif ; l'enregistreur multigaz est fixé sur une plaque et tourne le dos au puits.

nées de ces capteurs à celles que recueille un enregistreur exposé aux émanations du puits (X-am 7000 sur la figure). Le résultat, montré sur la figure 7, est que les capteurs fixes n'enregistrent que la moitié de la quantité de gaz sortant effectivement du puits.

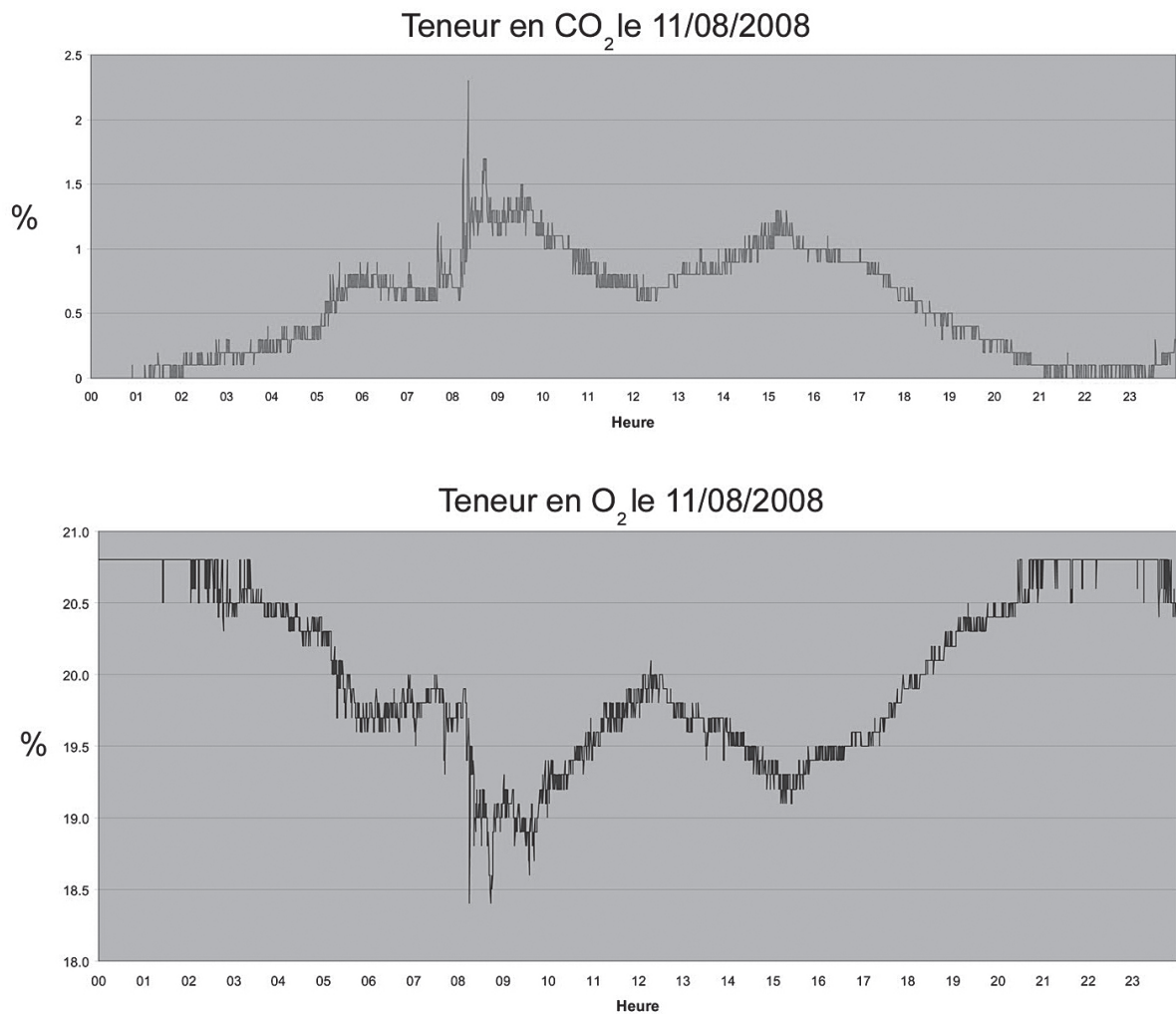


Fig. 8. – Courbes de  $\text{CO}_2$  et de  $\text{O}_2$ , le 11 août 2008. Mesures de l'enregistreur multigaz Dräger. On remarque la parfaite symétrie des teneurs en  $\text{CO}_2$  et  $\text{O}_2$ , vérifiant la relation :  $\text{O}_2 \text{ \%} + \text{CO}_2 \text{ \%} = 20,9 \text{ \%}$ .

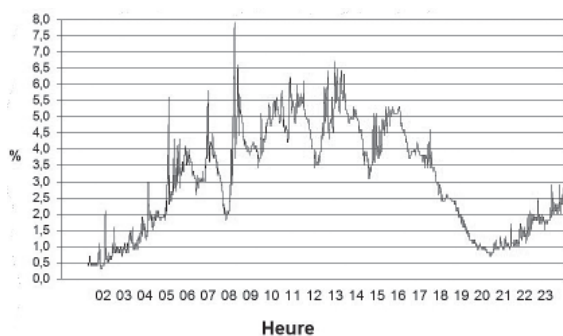


Fig. 9. – Courbe des teneurs en  $\text{CO}_2$ , le 20 novembre 2008. On observe un bref maximum de 7,9 %.

### 3.1.4. Comparaison avec les variations de la teneur en oxygène

L'air normal contient 20,9 % d'oxygène. La première analyse d'air incluant l'oxygène est celle de l'ISSEP sur trois échantillons prélevés le 22 novembre 2004 et donne, le jour de l'analyse, 7 % de dioxyde de carbone et 14 % d'oxygène (message inédit de J.-M. Hubart au Conseil d'administration des Chercheurs de la Wallonie, décembre 2004). Il est, en effet, habituel que l'augmentation de la teneur en  $\text{CO}_2$  se fasse aux dépens de l' $\text{O}_2$ . Ce chiffre extrême n'a été dépassé qu'une fois dans nos analyses. Le 20 novembre 2008, une bouffée de gaz carbonique a dépassé 4 % pendant une demi-heure et a culminé pendant quelques minutes à 7,9 % (fig. 9). Et, le 15 janvier 2005, nous avons constaté, en compagnie de J.-M.

Tableau 2.- Mesures de CO<sub>2</sub> et O<sub>2</sub> à la grotte de Ramioul le 15 janvier 2005

Heure	N°	Lieu	Haut. cm	CO <sub>2</sub> ppm	CO <sub>2</sub> %	O <sub>2</sub> %
11 : 20	0	Air extérieur, au dessus de l'escalier	180	400	0,04	21,2
11 : 40	1	À 6 m de l'entrée est	180	400	0,04	21,2
12 : 00	2	2 m avant le puits P30	180	1 600	0,16	20,4
			30	400	0,04	
12 : 20	3	Dans le puits P30, à -5 m	-500	33 000	3,30	
12 : 30	4	15 m plus loin que le puits P30	180	7 500	0,75	
12 : 35	3	Bord du puits, niveau du sol	10	33 000	3,30	16,0
12 : 40	5	Entrée du labo souterrain	180	7 500	0,75	20,4
			30	10 000	1,00	19,9
12 : 55	6	Salle sup. concrétionnée	180	2 500	0,25	

N° : numéro du lieu de mesure.

Haut. : hauteur en cm de la prise de mesure par rapport au sol de la galerie.

CO<sub>2</sub> ppm et % : nous présentons les données dans ces deux unités pour éviter les erreurs ; en général, les mesures de CO<sub>2</sub> sont exprimées en ppm, mais les fortes teneurs et la comparaison avec l'oxygène, dosé en % rendent plus claire l'expression en %.

O<sub>2</sub> : les mesures ont été faites par Jean-Pierre Discry avec un oxymètre.

Hubart et de J.-P. Discry, de fortes teneurs en CO<sub>2</sub> (plus de 3 %), corrélatives de réductions de O<sub>2</sub> (tableau 2).

La teneur de l'air en CO<sub>2</sub> était encore de 3,4 % en février, mais l'entrée d'air extérieur dans la grotte fit tomber, en mars, la concentration en dioxyde à 400 ppm, la teneur de l'air libre.

La corrélation entre les fortes teneurs de CO<sub>2</sub> et les réductions à peu près équivalentes des teneurs de O<sub>2</sub> s'est toujours observée au cours des mesures ultérieures. Nous donnons, à titre d'exemple, les teneurs de l'air en oxygène et en dioxyde de carbone, observées le 11 août 2008 (fig. 8). La symétrie des deux courbes est remarquable.

On verra, d'autre part, sur la figure 9, que les pics des valeurs de CO<sub>2</sub> peuvent être très brefs et que, à défaut d'un enregistrement continu, on peut les rater ; il est vrai qu'alors ils n'ont rien de dangereux.

### 3.1.5. Comparaison avec d'autres grottes

Les autres grottes de Belgique ont un comportement tout différent. Nous y faisons des mesures depuis plus de quarante ans (Ek *et al.*, 1968 ; Delecour *et al.*, 1968 ; Ek, 1969). Nos travaux continuent (Godissart, 1994 ; Piron *et al.*, 2007 ; Godissart & Ek, 2008 ; Ek & Godissart, 2009). Le dioxyde de carbone n'atteint pas, dans les autres grottes, des valeurs aussi fortes qu'à Ramioul.

D'autre part, les variations de la pression partielle du gaz sont, dans toutes les grottes, saisonnières, passant par un maximum en été et un minimum en hiver (Ek, 1979). Nous n'en prendrons que deux exemples que nous considérons comme significatifs.

À la grotte Sainte-Anne, à Tilff (Esneux), nous avons fait, durant une année, des mesures mensuelles au milieu de la cavité (c'est-à-dire à peu près à mi-distance entre l'entrée et l'extrémité distale). Nous avons procédé à des mesures dans les galeries et dans les fissures. Les résultats apparaissent dans les figures 10 et 11.

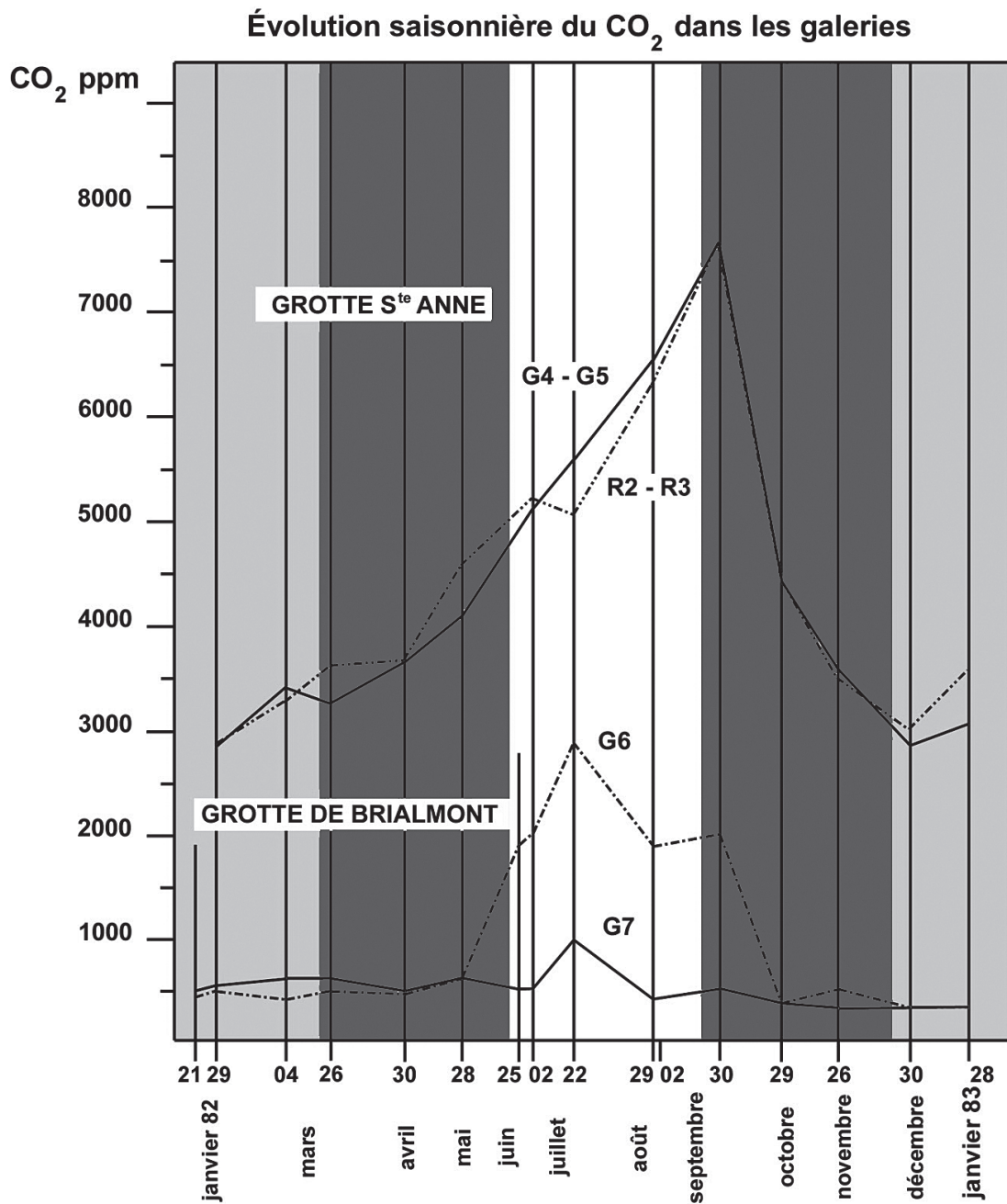


Fig. 10. – Le dioxyde de carbone dans les galeries de la grotte Sainte-Anne et de la grotte de Brialmont, à Tilff, en 1982. Évolution saisonnière. La galerie G7 est située à quelque 10 m sous le plateau, G6 à quelque 20 m. Les points G4, G5, R2 et R3 sont à 80 m environ de profondeur.

Plus les points de prélèvement sont en profondeur, plus le maximum de concentration de CO<sub>2</sub> est tardif.

On distingue partout, aussi bien dans les galeries (fig. 10) que dans les fissures (fig. 11), un maximum durant la belle saison et un minimum hivernal (Ek & Gewalt, 1985).

Dans les deux graphiques, les galeries (G) et fissures (F), représentées sur les courbes I, sont les plus superficielles (à quelques mètres sous le sol) ; les courbes III représentent les

galeries et fissures les plus profondes (à près de 90 m sous la surface). Les courbes II se situent à un niveau intermédiaire. Les maximums sont de plus en plus tardifs, au fur et à mesure que l'on considère des cavités plus profondes. Ceci est un indice que le CO<sub>2</sub> diffuse lentement du sol vers la profondeur.

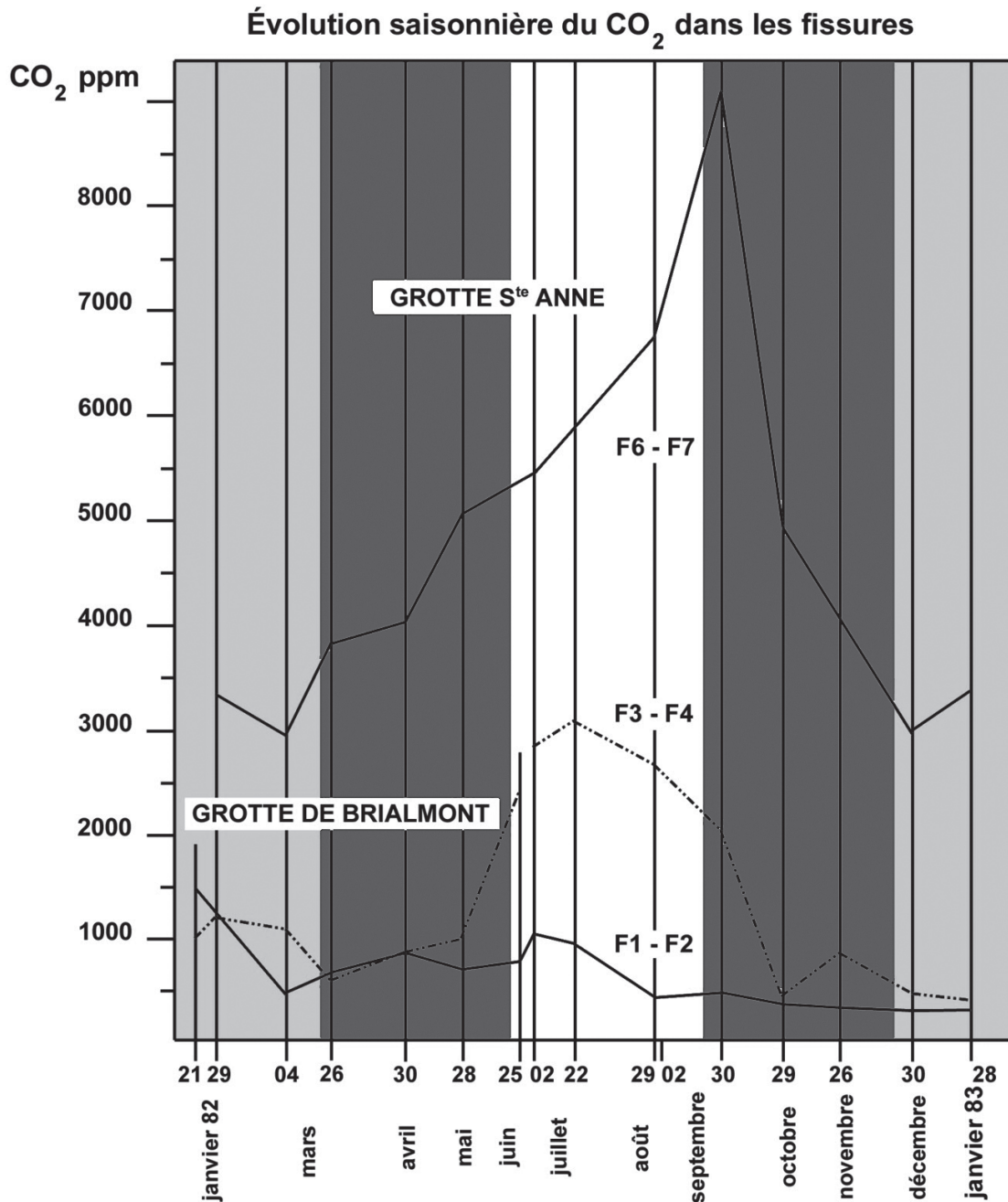


Fig. 11. – Le dioxyde de carbone dans les fissures de la grotte Sainte-Anne et de la grotte de Brialmont, à Tilff, en 1982. Évolution saisonnière. Chaque courbe représente la moyenne des teneurs de deux fissures voisines. Les fissures F1 et F2 sont à moins de 10 m de profondeur sous le plateau ; les fissures F3 et F4 sont à 20 m ; les fissures F6 et F7 sont à quelque 70 m sous la surface du sol.

Le maximum de teneur en CO<sub>2</sub> est d'autant plus tardif que les fissures sont en profondeur.

Le caractère saisonnier des variations de CO<sub>2</sub> s'observe dans toutes les grottes belges. C'est le cas, par exemple, de la grotte Merveilleuse à Dinant (fig. 12). Les teneurs y sont de l'ordre de 500 ppm en hiver ; durant la saison chaude, les teneurs sont d'environ 1200 ppm (Ek & Godissart, 1990).

Nous avons montré le même cycle saisonnier à la grotte de Comblain-au-Pont (voir les figures des pages 52 et 53 in Ek & Godissart, 2007).

Il n'y a qu'à Ramioul que les maximums se présentent en hiver, mais seulement par moments, de façon sporadique (fig. 13). Alors que, dans les autres grottes que nous avons

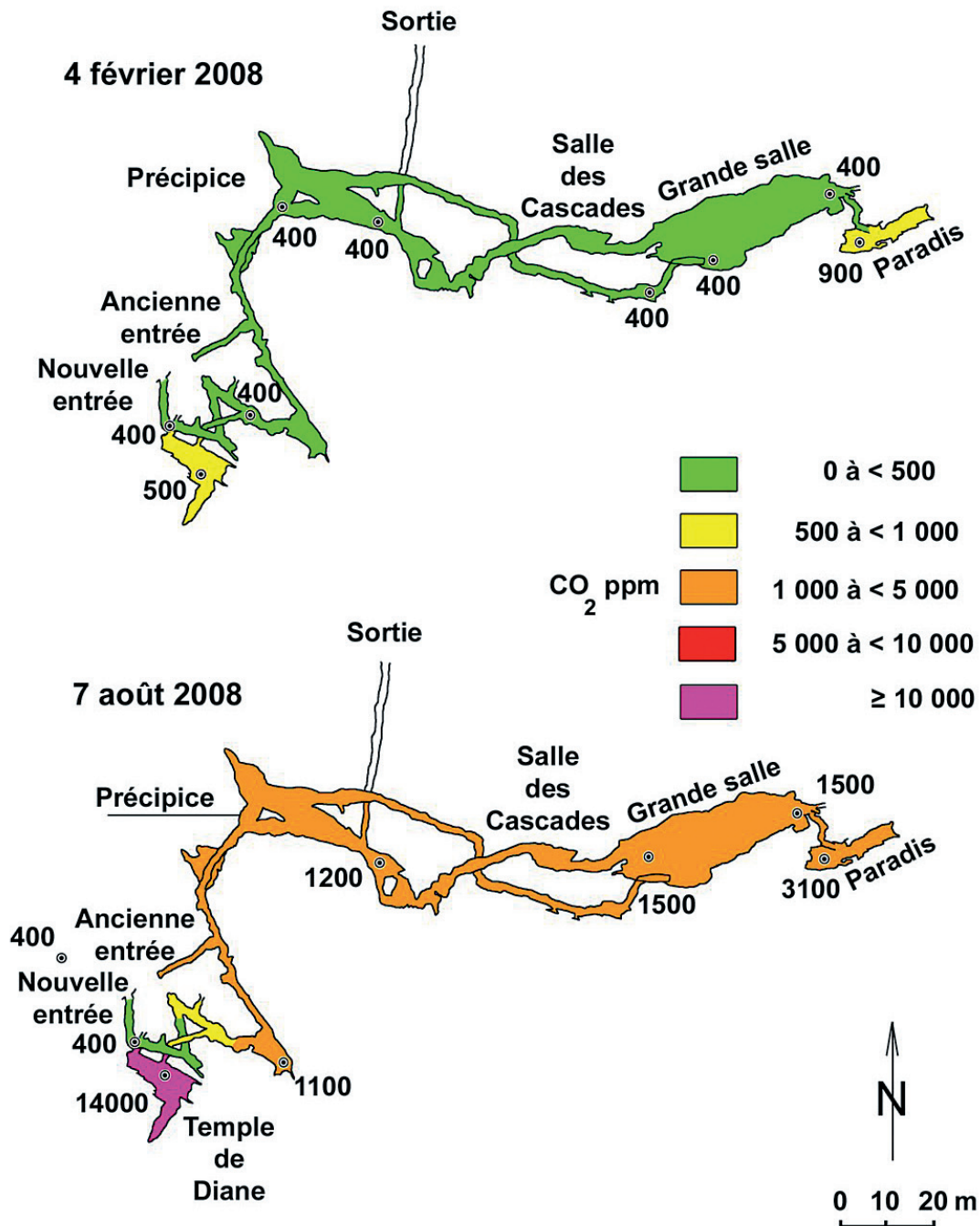


Fig. 12. – Le dioxyde de carbone dans la grotte « Merveilleuse », à Dinant, en 2008.

étudiées en Belgique, les principales variations de la teneur en CO<sub>2</sub> sont liées à l'évolution de la végétation, et surtout à celle de la biomasse du sol, à Ramioul, un autre facteur prédomine : il semble qu'ici, comme nous l'avons dit plus haut, le CO<sub>2</sub> présente une origine différente, en relation avec l'infiltration de l'eau météorique à travers les schistes ampélifères et pyriteux namuriens jouxtant

le calcaire carbonifère. Les maximums annuels de CO<sub>2</sub> se produisent en saison froide, lorsque l'évapotranspiration est minimale et que l'infiltration est donc maximale (fig. 6).

Les cartes de la figure 13 montrent que la concentration du gaz carbonique, dans la grotte de Ramioul, varie fortement au cours d'une même saison.

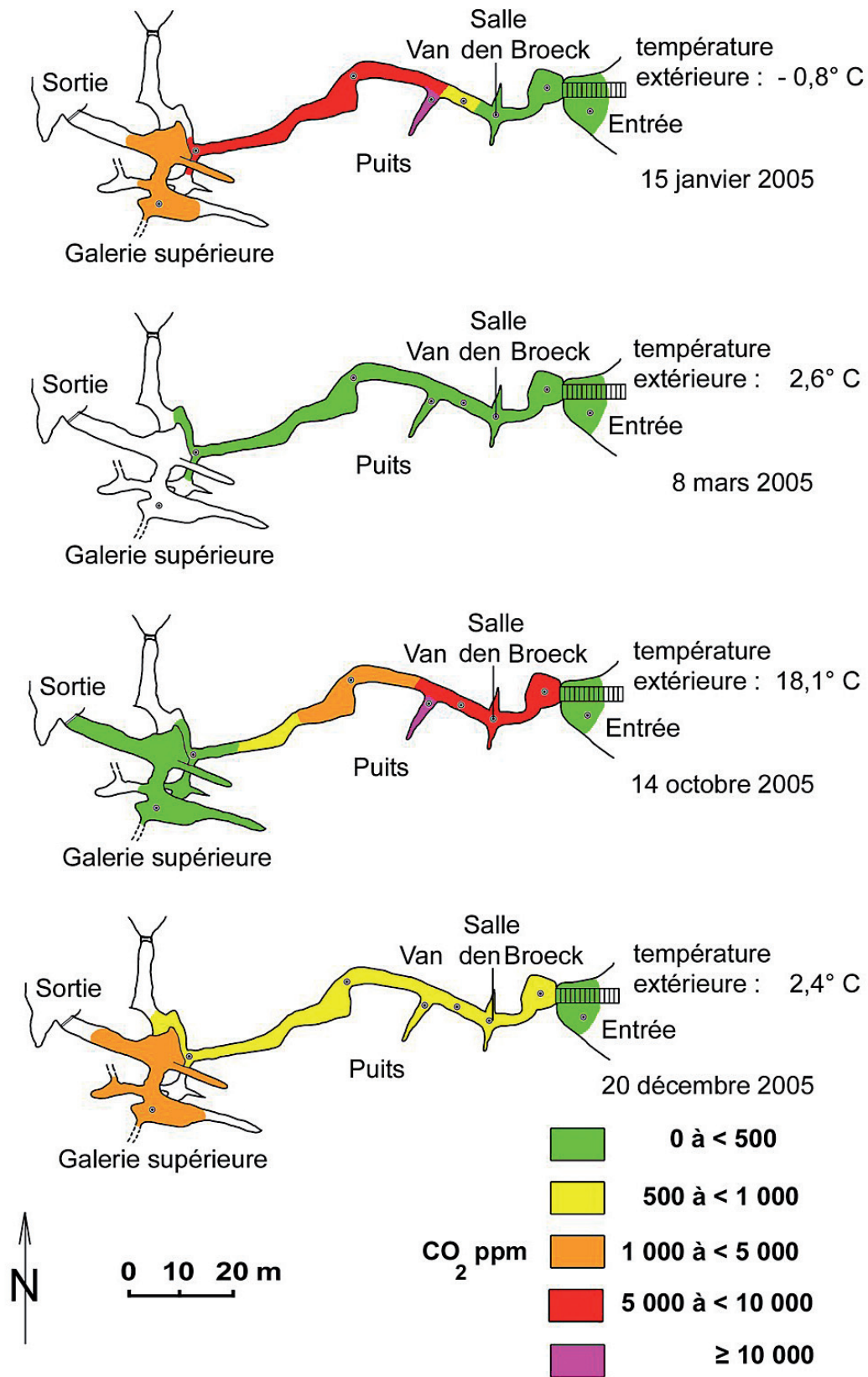


Fig. 13. – Variations non saisonnières de la teneur en CO<sub>2</sub> de la grotte de Ramioul, en 2005.

## 3.2. Le monoxyde de carbone

### 3.2.1. Le danger du monoxyde de carbone

Le monoxyde de carbone est un gaz incolore et inodore, toxique parce qu'il se combine à l'hémoglobine du sang en formant de la carboxyhémoglobine, empêchant ainsi l'hémoglobine de fixer l'oxygène. Respiré un certain temps à une concentration dans l'air supérieure à 50 ppm, il peut commencer à provoquer des premiers symptômes d'empoisonnement. Mais c'est surtout à des concentrations supérieures à 400 ppm qu'il peut induire des maux de tête et devenir dangereux. Le seuil de sécurité est fixé à 50 ppm par l'*American Conference of Governmental Industrial Hygienists* (A.C.G.I.H.).

### 3.2.2. Les occurrences du monoxyde de carbone

Nous avons rapporté, dans l'avant-propos, l'accident de 1971, au cours duquel trois spéléologues furent gravement asphyxiés dans la grotte de Rosée, à moins de 500 m de la grotte de Ramioul.

Sortis de la grotte par nous et conduits à l'hôpital, ils y furent soignés pour intoxication par le CO. Depuis lors, les manifestations du monoxyde de carbone furent nombreuses, malgré le caractère très occasionnel, au début, des analyses.

Ainsi, on a relevé 60 ppm le 9 mars 2001, 48 ppm le 22 du même mois, 485 ppm le 8 juin 2001 et 108 ppm le 11 janvier 2002. Chaque fois (sauf la première, pour laquelle on n'a pas de données), les émanations de CO suivaient un tir ayant eu lieu la veille ou le jour même, dans une zone proche de la grotte (rapport de J.-M. Hubart, 2003).

On enregistra encore 239 ppm le 23 avril 2003 (il y avait eu un tir le 22), puis diverses occurrences plus rares et plus faibles jusqu'en 2006 (courrier de Julie Piron à J.-M. Hubart et C. Ek, 23 avril 2006).

Depuis, l'installation du dispositif de *monitoring* par la société Carmeuse en 2006, nous n'avons connaissance d'aucune occurrence.

## 3.3. Le radon

Le radon, détecté, pour la première fois, à Ramioul, en septembre 2007, par Jean Godissart, est étudié, depuis janvier 2008, par W. Vanderschueren et il fait l'objet d'une analyse statistique très détaillée dans le présent volume.

Nous nous contenterons ici d'évoquer ses rapports avec les occurrences du CO<sub>2</sub>. La figure 14 ci-dessous montre de haut en bas :

- A. les données climatologiques du mois de mars 2009, où les températures de l'air sont figurées en rouge.
- B. le graphe du radon que W. Vanderschueren nous a aimablement transmis.
- C. le graphe du CO<sub>2</sub> provenant des enregistrements Dräger sur le site du P30.

Nous y avons distingué deux périodes :

En 1, du 4 au 7 mars, les températures de l'air extérieur sont inférieures à 5°C (donc nettement inférieures à celle de la cavité) et, le P30 étant dès lors absorbant, nous n'observons pas de CO<sub>2</sub> ni de radon pendant cet intervalle, sauf les teneurs habituellement rencontrées dans l'atmosphère libre.

En 2, du 17 au 23 mars, les températures extérieures oscillent autour de la valeur moyennes de 5°C, soit dans la gamme de +12° à - 1°C. Le puits est alors alternativement absorbant (quand il fait froid dehors) et refoulant.

Les pics de radon durant cette période correspondent aux maximums diurnes de température.

Les arrivées du CO<sub>2</sub> sont plus modestes et plus rares.

Nous en déduisons que les émanations de radon sont - ce mois-là tout au moins - « modulées » par les températures extérieures : au-dessus de 5°C, l'air sort du puits ; il y a transfert ou advection ; au-dessous de cette température, le courant s'inverse et emprunte une autre issue comme l'indiquent nos enregistrements anémométriques.

Ceci démontre la capacité de traceur du radon comparée à celle du CO<sub>2</sub> dont l'élaboration est sans doute moins constante.

## Données climatologiques de mars 2009

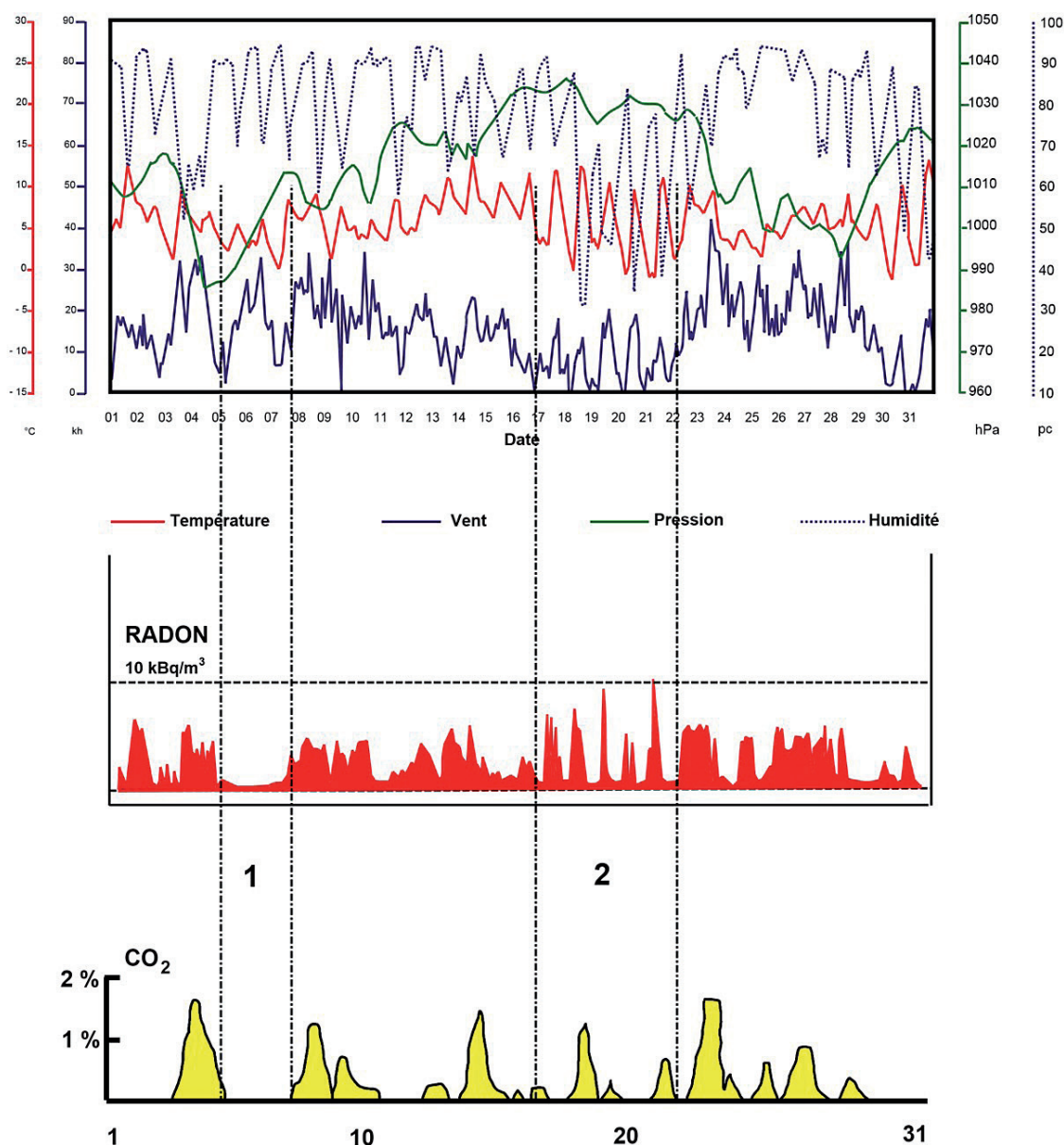


Fig. 14. – Températures et émanations de radon et de dioxyde de carbone, en mars 2009.

## 4. Conclusions

### Origine du dioxyde

Les teneurs parfois excessives en CO<sub>2</sub> et en CO dans la grotte ont nécessité une longue étude. L'atmosphère de la grotte de Ramioul, tout comme celle de ses voisines immédiates, a parfois été dangereuse.

Une partie au moins des dégagements de dioxyde de carbone est liée au contact du Viséen supérieur avec les schistes namuriens à ampélites qui rendent les eaux agressives vis-à-vis du calcaire, par une chaîne de réactions chimiques fort bien décrites par G. Cosyns (1907).

Le gaz carbonique est aussi fourni par la respiration de la biomasse du sol. Nous avons montré la relation étroite entre l'activité biologique dans le sol et la diffusion du CO<sub>2</sub>, dans les autres grottes de Belgique. Mais ici, on l'a vu (fig. 6), les maximums de concentration en gaz carbonique ne correspondent pas du tout à la période d'activité de la végétation. Contrairement à ce qui se passe dans les autres grottes étudiées, l'activité pédologique n'est pas – loin s'en faut – la source principale du CO<sub>2</sub> de la grotte de Ramioul.

## Un modèle physique des mouvements d'air : une hypothèse

Ainsi que nous l'avons signalé plus haut, les courants d'air et leurs inversions (puits absorbant) sont détectés par notre bascule anémométrique.

Les enregistrements synchrones de la bascule, du capteur de CO<sub>2</sub> Dräger installé sur le site, des températures dans le flux d'air à la margelle du puits et dans l'atmosphère libre montrent que, lorsque les températures extérieures descendent sous la barre des 5°C, le puits devient absorbant et les pCO<sub>2</sub> chutent aux alentours de 500 ppm puisque, dans ces conditions, l'air extérieur pénètre dans la grotte.

Semblable situation s'est présentée de façon durable durant l'hiver 2009-2010 (fig. 6).

Nous proposons, ci-dessous (fig. 15), un schéma fonctionnel capable de rendre compte de cet état de choses.

La grotte de Ramioul est représentée en coupe schématisée avec ses deux ouvertures naturelles E1 et E2 situées à des niveaux différents ; une troisième entrée hypothétique, E3, - dessinée en traits interrompus - débouche à un niveau intermédiaire. Cette entrée pourrait en fait être constituée de multiples fissures plutôt que d'un conduit bien individualisé.

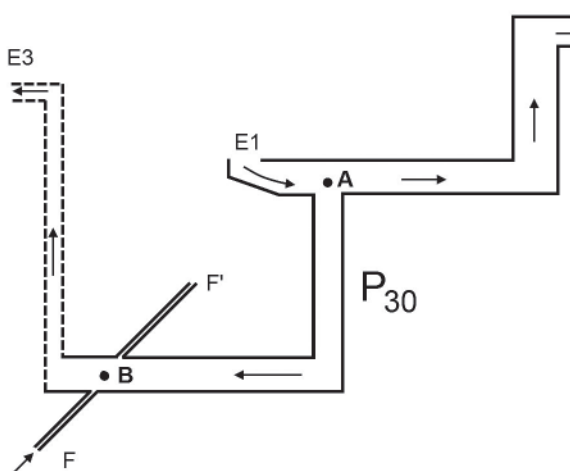


Fig. 15. – Schéma du fonctionnement d'un tube à vent à trois orifices. E1, E2, E3 : entrées de la cavité ; A : sommet du puits Bernard (P30) ; B : intersection de la galerie de l'étage inférieur avec une faille. Les flèches indiquent le sens des courants d'air en période froide.

Nous supposons qu'elle a été mise à jour lors de travaux de carrière. En effet, le fonctionnement décrit ici n'avait jamais été décelé avant 2004. Cette entrée peut très bien n'être pas pénétrable par l'homme.

Au point B, nous avons figuré la faille FF' cartographiée par E. Poty comme traversant la galerie inférieure (cf. F4 dans le levé géologique, fig. 1), faille dont le rejet met en contact le calcaire carbonifère avec les schistes namuriens d'où proviennent probablement les émanations de CO<sub>2</sub> et de radon.

Ce dispositif constitue un tube à vent à trois orifices.

En période froide (température extérieure < 5°C et donc inférieure à celle de la grotte), l'air extérieur pénètre par E1, parce que l'air froid, dense, entrera par l'orifice le plus inférieur tandis que l'air de la grotte, plus chaud, sortira par les orifices supérieurs. L'air froid se répartit en deux courants, l'un vers E2 et l'autre vers E3.

De la sorte, les émanations qui apparaissent en B sont rejetées par l'orifice E3 et la pression partielle de CO<sub>2</sub> en A chute aux alentours de 400 ppm, soit la valeur de l'air extérieur.

Les graphes du radon que W. Vanderschueren nous a aimablement transmis montrent la même « extinction » aux basses températures (fig. 14).

En période chaude (température extérieure > 5°C), le sens des courants s'inverse et les émanations apparaissent à nouveau en A.

Le modèle ci-dessus nous suggère que la production du CO<sub>2</sub> et du radon ne s'interrompt pas : tout simplement, les émanations empruntent une autre voie. Cette autre voie pourrait être, fût-ce *pro parte*, l'orifice (ou les fissures) E3.

D'autre part, la courbe enveloppe du cycle annuel du CO<sub>2</sub> (fig. 6) affiche un pic annuel important aux mois de novembre et décembre où la production atteint 250 à 300 m<sup>3</sup>/semaine avec des températures extérieures comprises entre 5 et 10°C.

Or, pendant la période estivale, nous constatons que la production du gaz carbonique est très faible, inférieure à 50 m<sup>3</sup>/semaine avec quelques pics entre 50 et 100 m<sup>3</sup>/semaine.

Nous supposons que ce CO<sub>2</sub>, très probablement issu des schistes namuriens, à l'instar du radon, pourrait être le produit d'une réaction chimique d'oxydation des sulfures ou de l'ampélite par les eaux météoriques et ne serait pas d'origine rhizosphérique. Ceci explique notre constatation énoncée au début de ces conclusions que le dioxyde de carbone est moins abondant dans la grotte en été, malgré la fourniture en cette saison du CO<sub>2</sub> biogénique.

L'altération implique évidemment la présence d'eau. Dès lors, la quantité de CO<sub>2</sub> produite dépendrait de l'infiltration et, partant, de la pluviosité.

### **Le monoxyde de carbone**

Le monoxyde de carbone a été détecté jadis dans l'air de la grotte à plusieurs reprises, notamment par J.-M. Hubart, E. Lebon et J. Godissart. Nous pensons que ce gaz ne peut guère provenir que des tirs de la carrière.

Un rapport inédit de J.-M. Hubart le signale au début des années 70. Le phénomène ne fut ensuite plus observé jusqu'en 2001. De mars 2001 à janvier 2002, il y eut huit occurrences de CO, dont quatre négligeables et quatre plus importantes : 48, 60, 108 et 485 ppm. Ce sont des concentrations dangereuses. Pour trois de ces occurrences au moins, d'après une lettre de J.-M. Hubart, des tirs à proximité de la grotte avaient été effectués la veille. Il en fut de même en 2003, lorsque C. Casseyas, du Préhistosite de Ramioul, mesura une concentration de 239 ppm le 23 avril et des concentrations beaucoup plus faibles en mai de la même année. Du monoxyde de carbone a encore été détecté jusqu'en 2006, mais en plus faible concentration.

Jusqu'alors, les occurrences observées peuvent ne représenter qu'une partie de la réalité, puisque rien n'était perceptible quand il n'y avait pas d'expérimentateur dans la cavité.

Fin 2008, un dispositif d'enregistrement automatique permanent fut installé dans la grotte par les soins de la société Carmeuse. Les appareils enregistrent en continu, toutes les vingt secondes, CO<sub>2</sub>, CO et O<sub>2</sub>. Cet appa-

reillage est muni d'un dispositif d'alarme et, depuis sa mise en service le 27 octobre 2008, plus aucune trace de monoxyde de carbone n'a été signalée dans la cavité.

### **Le radon**

Le comportement du radon à Ramioul est étudié systématiquement depuis trois ans par W. Vanderschueren et on trouvera dans sa contribution, dans ce même volume, une étude statistique fouillée de la question (Vanderschueren, 2010).

Comme le dioxyde de carbone, le radon n'apparaît pas à la sortie du puits Bernard (P30) lorsque la température extérieure est inférieure à 5°C, c'est-à-dire nettement inférieure à celle de la grotte. C'est qu'alors l'air du dehors, froid, descend dans la cavité et dans le puits. En outre, aux basses températures, l'évapotranspiration est moindre, le fond de la grotte est plus mouillé et la forte solubilité du radon (330 cm<sup>3</sup>.l<sup>-1</sup>) favorise sa dissolution dans l'eau. Enfin, comme le fait remarquer W. Vanderschueren, en hiver, les fissures du sol et du calcaire sont plus remplies d'eau, ce qui contrarie la montée du gaz. En été, les fissures, asséchées et ouvertes, favorisent le dégagement. C'est très probablement ce qui explique les fortes concentrations observées en saison chaude, avec des maximums pouvant dépasser très momentanément 50 kBq/m<sup>3</sup>. Sur ce point encore, la grotte de Ramioul se distingue d'autres cavités comme la grotte de Comblain-au-Pont, par exemple, où le régime du radon est beaucoup plus modéré et dépourvu de pics temporaires.

### **Originalité de l'atmosphère de la grotte de Ramioul**

L'atmosphère de la grotte présente plusieurs particularités. La première est la diversité des origines de son dioxyde de carbone. Dans les autres grottes de Belgique, ce gaz, essentiellement issu de l'activité biologique dans le sol, est plus abondant à la saison chaude et moins en hiver ; ses variations saisonnières sont progressives. À Ramioul, le gaz d'origine biologique s'avère presque négligeable devant les émanations du puits Bernard (ou P30), émanations fortement va-

riables et reliées, entre autres, aux conditions météorologiques du moment.

Le monoxyde de carbone, qui est apparu à plusieurs reprises entre 1970 et 2006, provient plus que probablement des tirs de mine de la carrière. Certains explosifs en dégagent presque autant que du dioxyde de carbone. Il ne pouvait évidemment être détecté que très occasionnellement tant qu'il n'y avait pas d'appareil enregistreur dans la grotte. Mais, depuis 2007, il n'en a plus été signalé et, depuis l'installation du moniteur Dräger permanent, la présence de monoxyde n'a jamais été enregistrée : le danger a cessé, sans doute à cause de l'éloignement des tirs et des progrès dans le choix et l'utilisation des explosifs. Certains explosifs dégagent très peu de monoxyde, voire point, et c'est peut-être ce qui est utilisé actuellement.

Toutefois, si du monoxyde a pu être constaté jadis, du dioxyde de carbone a pu passer aussi. Ce gaz constitue couramment 6 à 20 % des gaz produits par les explosions. On a donc là une troisième source de gaz carbonique, à côté de celui qui provient des ampélites et celui de la biosphère. D'où la complexité des courbes de concentration du CO<sub>2</sub>.

Quant au radon, à quoi ses « éruptions » soudaines sont-elles liées ? On retiendra en tout cas une influence certaine de la dessiccation du sol et des fissures, qui favorise son dégagement en été, et, à Ramioul, une influence importante des mouvements de l'air dans les puits, qui provoquent ou bloquent la montée des gaz en fonction des températures et des changements de pression.

### Et sur le plan de la santé ?

Cette question n'est pas de notre compétence, mais nous pouvons toutefois émettre quelques considérations qui découlent directement des normes en vigueur.

D'après l'*American Conference of Governmental Industrial Hygienists* (A.C.G.I.H.), une personne ne doit pas rester plus de quinze minutes dans une atmosphère contenant 30 000 ppm (= 3 %) de CO<sub>2</sub>, ni huit heures par jour dans un air renfermant 5000 ppm (= 0,5 %). Actuellement, et depuis que les enregistreurs ont été installés, les très rares pics

dépassant 3 % ont toujours été très brefs. Dès le dépassement de 5000 ppm, un signal lumineux rouge interdit l'entrée de la cavité. On peut donc considérer qu'au point de vue du dioxyde de carbone, la grotte n'est plus dangereuse du tout pour les visiteurs et, grâce à l'alarme, non plus pour les travailleurs.

Le monoxyde de carbone est beaucoup plus dangereux. D'après les normes de l'A.C.G.I.H., un travailleur ne peut être exposé régulièrement pendant huit heures par jour à un air contenant plus de 50 ppm de ce gaz. À une concentration de 500 ppm, il ne faut pas rester plus d'une heure. Mais, depuis 2007, aucune apparition de CO n'a été signalée et, depuis l'installation du système de *monitoring* permanent, le monoxyde n'est jamais apparu, sans doute à cause de l'éloignement des tirs et des progrès dans le choix et l'utilisation des explosifs.

### Remerciements

C'est au professeur J.-M. Bouquegneau, pro-doyen de la faculté des sciences de l'Université de Liège, que nous sommes redevables du matériel moderne d'analyse qui nous a servi tout au long de notre travail. Nous lui en sommes profondément reconnaissants.

M. F. Foucart, directeur de l'Environnement et du Patrimoine de la société Carmeuse, et Mme M. Vandebulcke, directrice des Relations extérieures de Carmeuse, ont activement collaboré avec le Préhistosite, nous ont fourni nombre d'informations et, surtout, ont fait installer un dispositif performant de *monitoring* du dioxyde de carbone, du monoxyde de carbone et de l'oxygène dans la grotte, dispositif qui est à la source de beaucoup de nos données.

Le directeur du Préhistosite, M. F. Collin, et tous les membres du personnel, nous ont toujours accueillis cordialement et nous ont prodigué toutes facilités pour nos parcours dans la cavité ; nous sommes particulièrement redevables à M. E. Lebon, fin technicien émérite et des plus serviables, et à M<sup>lle</sup> Cécile Jungels, responsable du service scientifique, chargée de la transmission des données informatiques des appareils.

Merci au professeur W. Vanderschueren, savant compagnon de nos séances de travail à la grotte, à qui nous devons nombre d'enseigne-

ments et nombre d'idées pour l'amélioration de cette étude. Merci à M. M. Dethier qui, par sa révision du texte, est également à l'origine de plusieurs rectifications et amendements. Merci au Dr J.-P. Discry, grand connaisseur et défenseur du site, ami de toujours de J.-M. Hubart, pour ses avis éclairés.

C'est, on le voit, à de nombreuses collaborations, autant qu'à notre travail, que cette recherche doit son existence.

Mais la présentation de cette contribution est aussi due à bien des assistances. Ainsi, M. M. Philippe, photographe expert du monde souterrain, et M. R. Vandenvinne, habile technicien, ont été d'indispensables collaborateurs sur – sous – le terrain.

Les illustrations doivent leur présentation à la maîtrise et l'ingéniosité de MM. Ph. Labarbe et L. Desamoré. Enfin, le manuscrit original a été mis en œuvre par Mme M.-C. Cellier. À tous, notre profonde gratitude.

## Bibliographie

- COSYNS G., 1907. « Essai d'interprétation chimique de l'altération des schistes et des calcaires », *Bulletin de la Société belge de Géologie*, 21, Mémoires : 325-346.
- DELATTE I., 1951. « Notes relatives aux alunières du Pays de Liège », *Bull. Soc. roy. Le Vieux Liège*, 91 : 11-14.
- DELECOUR F., WEISSEN F. & EK C., 1968. « An Electrolytic Field Device for the Titration of CO<sub>2</sub> in Air », *National Speleological Society Bulletin*, 30 : 131-136.
- EK C., 1969. *Abondance du gaz carbonique dans des fissures de grottes*, in 5. *Internationaler Kongress für Speläologie, Stuttgart 1960*, 2, pp. 141-143.
- 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., DELECOUR F. & WEISSEN, F., 1968. « Teneur en CO<sub>2</sub> de l'air de quelques grottes belges. Technique employée et premiers résultats », *Annales de Spéléologie*, 23 : 243-257.
- EK C. & GEWELT M., 1985. « Carbon Dioxide in Cave Atmospheres. New Results in Belgium and Comparison with Some Other Countries », *Earth Surface Processes and Landforms*, 10 : 173-187.
- EK C. & GODISSART J., 1990. *La Merveilleuse, nouvelle grotte de Dinant*, Liège, Imprimerie Lesire, 64 p.
- EK C. & GODISSART J., 2007. *La grotte et l'abîme de Comblain-au-Pont*, Découverte de Comblain-au-Pont a.s.b.l., 88 p.
- EK C. & GODISSART J., 2009. *Severe Increase of CO<sub>2</sub> in Belgian Caves*, in *15th International Congress of Speleology Proceedings*, 3, pp. 1467-1473.
- 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 Liège, 13 p.
- FRAIPONT J., 1936. « L'industrie de l'alun à Ramioul », *Bulletin des Chercheurs de la Wallonie*, 12 : 171-190.
- GODISSART J., 1994. *Le cycle annuel des températures et du CO<sub>2</sub> dans la grotte de Fontaine de Rivière à Hamoir (Belgique)*, in *Comptes rendus du Colloque international de Karstologie de 1992 à Luxembourg*, Service géologique du Luxembourg, pp. 179-185.
- GODISSART J. & EK C., 2008. *L'inflation du CO<sub>2</sub>*, in *Journées de Spéléologie scientifique, Résumés*, Han-sur-Lesse, Belgique.
- HUBART J.-M., 1989. *Autrement dit. Essai sur la toponymie et la description de l'étage inférieur de la grotte de Ramioul*, Société spéléologique de Wallonie, 55 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 de licence en sciences géographiques, Université de Liège, 182 p.
- PIRON J., ERPICUM M., EK C., GODISSART J. & WILLEMS L., 2007. « Contribution à l'étude du climat de trois cavités souterraines belges », *Bulletin des Chercheurs de la Wallonie*, 46 : 155-169.

- QUINIF Y., 1977. « Essai d'étude synthétique des cavités karstiques de Belgique », *Revue belge de Géographie*, 101 : 115-173.
- VAN DEN BROECK E., MARTEL E.A. & RAHIR E., 1910. *Les cavernes et les rivières souterraines de la Belgique*, 2 tomes, Bruxelles, H. Lamertin, 1592 + 92 + 66 p.
- VANDERSCHUEREN H.-W., 2010. « Étude systématique de l'exhalation du radon à la sortie du puits « crevasse Henri Bernard » dans la grotte de Ramioul (Engis, Belgique) », *Bulletin des Chercheurs de la Wallonie*, hors-série n° 3 : **XXX-XXX**

Adresse des auteurs :  
Jean GODISSART  
19, rue de Cracovie  
B-4030 Liège  
jean.godissart@skynet.be  
Camille EK  
131, rue des Vennes  
B-4020 Liège  
camille.ek@ulg.ac.be