

## EDITORIAL

Cet *EcoKarst* d'avant les grandes vacances ne vous propose pas de voyages lointains, ni de visites exotiques particulières... Nous vous encourageons plutôt à découvrir par vous-mêmes ces contrées et karst étrangers durant les deux mois d'été. Ce numéro 92 est centré sur la Wallonie et il vous propose de découvrir des zones et des aspects karstiques qui sont assez peu connus et pas suffisamment abordés dans les ouvrages et les publications présentant les régions calcaires de Belgique.

Les **effondrements** récents qui se sont formés à **Stambruges** à proximité du canal de Blaton, nous rappellent que la dissolution du calcaire et les puits naturels peuvent affecter des zones où la roche carbonatée n'est pas visible mais sous couverture. Ces puits en bord du canal présentent un danger pour l'intégrité de la nappe aquifère car ils peuvent mettre les eaux souterraines en connexion directe avec celles du canal... "peu potables"

Pour ceux qui n'ont pas l'occasion de partir cet été, nous leur conseillons de se plonger dans la **monographie karstique des bassins du Burnot et de la Molinee**. Cet ouvrage qui vient de sortir de presse (publication Région wallonne/CWEPPSS) leur permettra de découvrir une région superbe et pleine d'intérêts scientifiques divers.

Enfin, si nous sortons d'un hiver particulièrement long et rude et qu'on se demande où est passé le soleil pendant l'entière du printemps, les mesures scientifiques (concentration de CO<sub>2</sub>) réalisées dans l'atmosphère de certaines grottes confirment que les conditions d'un réchauffement lié aux gaz à effet de serre sont bien réunies. Vous découvrirez les résultats détaillés du monitoring effectué à l'Abîme de Comblain ainsi qu'un ensemble d'hypothèses pour expliquer cette **concentration en CO<sub>2</sub>** qui **dans les grottes** est régulièrement 100x plus importante que dans l'atmosphère en surface!

Nous vous souhaitons à tous de bonnes vacances, une agréable lecture et nous vous encourageons à bloquer dans votre agenda dès maintenant la 1<sup>ère</sup> semaine d'octobre pour venir à la **Posterie (Courcelles)** assister à un ensemble de très intéressantes conférences et activités en faveur du karst, mises sur pied par le spéléoclub du SCAIP.

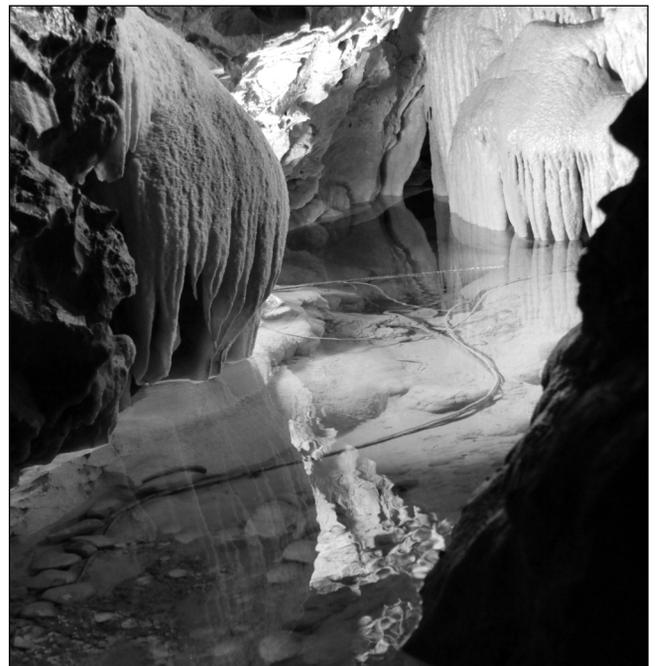
Pour la CWEPPSS  
G. MICHEL

## KARST ET CO<sub>2</sub>

### Le Transfert de CO<sub>2</sub> dans le synclinal carbonifère de Comblain-au-Pont

#### Le CO<sub>2</sub>, moteur de la dissolution des calcaires

Le dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>), dissous dans l'eau, est à l'origine de la formation des vides dans les massifs karstiques. La concentration de ce gaz dans l'air atmosphérique était en 1900 un peu inférieure à 300 parts par million (ppm). Il est, en 2013, présent à l'air libre à raison de 400 ppm. Ceci représente une augmentation de l'ordre de 25 % au cours du XX<sup>e</sup> siècle.



Salle du Petit Lac dans la grotte de Comblain, où ont été réalisées, depuis des années, de nombreuses mesures de CO<sub>2</sub>

Dans les grottes, la concentration du dioxyde de carbone atteint couramment 10 000 ppm, et, en été, nous avons déjà mesuré des teneurs de 20 000 ppm et bien davantage. Dans les sols, la teneur en CO<sub>2</sub> est généralement supérieure à 2000 mais nous avons observé jusque 80 000 ppm. Nous avons mis en évidence en 2009 que la teneur en CO<sub>2</sub> dans les grottes augmente beaucoup plus vite qu'à l'air libre (Godissart et Ek, 2009, *Ecokarst*, n° 76).

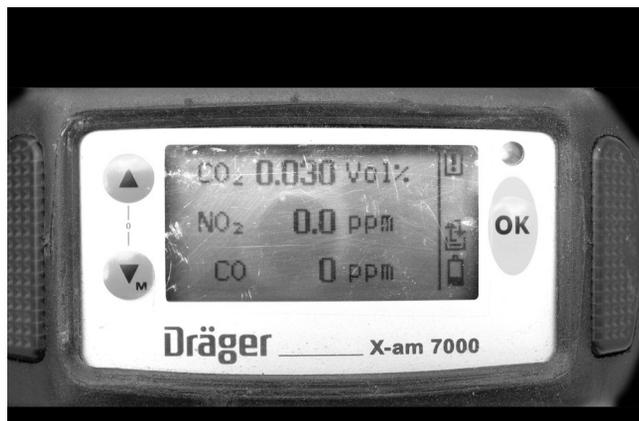
Le CO<sub>2</sub> généré dans les sols par la respiration des racines et de toute la biomasse du sol, se propage dans les fissures du calcaire et s'y dissout en partie dans les eaux, où il est capable d'attaquer la roche constituée de carbonate de calcium, et de créer ainsi des cavités. Il est donc primordial d'étudier les modalités de la production du CO<sub>2</sub> dans les sols, de son transfert dans les grottes et de son rejet par les eaux des sources et des résurgences.

C'est pour cela que la **Région wallonne**, considérant l'intérêt pour la collectivité d'une telle investigation, a institué une mission de recherche ayant pour objectif de mesurer dans une région-test les niveaux de concentration de CO<sub>2</sub> dans l'air du sol et du sous-sol. C'est une partie des résultats de la première année de cette étude que nous présentons ici, avec l'autorisation du **Service public de Wallonie (SPW)**. Le travail a porté sur le site de la grotte de Comblain-au-Pont, sur les sols surincombants et sur les eaux qui en sont issues.

### D'où vient et où va le CO<sub>2</sub> ?

Les plantes sont largement constituées de carbone. Elles tirent essentiellement leur carbone du CO<sub>2</sub> de l'air, qu'elles utilisent (assimilation chlorophyllienne) en rejetant l'oxygène dans l'air. Les parties vertes des plantes consomment donc du CO<sub>2</sub>. Mais les racines n'ont pas de chlorophylle et elles respirent : elles dégagent donc dans le sol du CO<sub>2</sub>, de même que toute la biomasse du sol. Une partie de ce CO<sub>2</sub> descend, par des fissures, dans les grottes. Il est parfois sous forme de gaz, dans l'air souterrain, parfois dissous dans l'eau. Des cavités, le CO<sub>2</sub> peut aussi passer dans les drains souterrains principaux. Mais ceux-ci, parfois, se sont déjà enrichis en dioxyde de carbone dès leur entrée sous terre ; dans ce cas, ils sont susceptibles de fournir du CO<sub>2</sub> aux grottes, au lieu d'en absorber.

Ce sont tous ces transferts qui font l'objet de l'étude commencée en 2012. D'où vient le CO<sub>2</sub> ? Où va-t-il ?



**Figure 1** Le Draeger X-am 7000. Dans la version ici présentée, l'appareil peut mesurer plusieurs gaz ; les voyants rouges clignotent en cas de dépassement de valeurs limites pré-établies.

### La mesure et l'enregistrement des valeurs

Nous avons planté des sondes en pvc dans les sols, principalement à 10 et 30 cm de profondeur, et, en un endroit à 70 cm, selon l'épaisseur du sol, afin de mesurer les gradients verticaux jusqu'au contact du bedrock. À partir de ces sondes, le CO<sub>2</sub> est mesuré avec la pompe Gastec par aspiration de l'air à travers une cellule à hydrazine.

La pompe Gastec, avec ses tubes d'hydrazine, annonce une précision de 10 % pour les très faibles valeurs (moins de 0,1 % de CO<sub>2</sub>), et de 5 % pour les valeurs plus élevées. Pour les valeurs les plus faibles (moins de 0,1 % de CO<sub>2</sub>), nous constatons une précision de lecture de l'ordre de 20 %. Par contre, pour les teneurs en CO<sub>2</sub> dépassant 1 % (c'est-à-dire 10 000 ppm), la précision de 5 % est vérifiée.

Une deuxième méthode consiste à extraire le CO<sub>2</sub> de récipients en pvc perforés, enfouis dans le sol à 30 cm de profondeur, la mesure étant effectuée par l'appareil Draeger X-am 7000 qui analyse le gaz par infrarouge (figure 1).

Enfin, dans les sols et dans les grottes, en plus des mesures ponctuelles, nous avons installé des data-loggers de deux types différents : le Vaisala et l'Omega, qui fonctionnent tous deux sur le principe de la mesure du CO<sub>2</sub> par absorption dans l'infrarouge (figure 2).

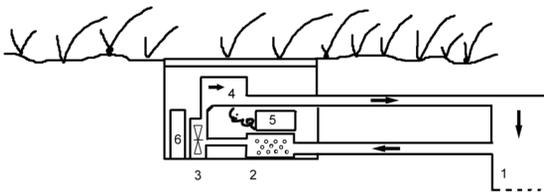
Le Vaisala MI 70 est certifié « fully calibration free ». Grâce à son moniteur gradué à 10 ppm, il a une précision de lecture excellente même aux très faibles teneurs. Les certifications du constructeur lui assignent une précision très supérieure à celle de nos autres appareils et meilleure que 1 % à partir de 1000 ppm de CO<sub>2</sub>.



**Figure 2** Le Vaisala. A gauche, la pompe. A droite, le senseur-enregistreur.

L'Omega est monté par Jean Godissart. Le capteur infrarouge de l'appareil est un module provenant de TH Industrie qui analyse la teneur en CO<sub>2</sub> jusque 40 000 ppm. Le data-logger de marque Omega possède une capacité de près de un million de données. L'enregistreur alimenté sur accus se compose d'une turbine qui envoie l'air dans une chambre où il est analysé toute les trois heures par un module infrarouge branché sur un data-logger.

Ce dispositif est d'un prix de revient relativement modique, il est facile à construire avec quelques notions d'électronique et peut remplir des fonctions de surveillance ou d'alarme dans le monitoring des zones à risques ; son autonomie est de plusieurs semaines.



**Figure 3.** Data-logger en circuit fermé (do it yourself, Omega). Installation dans le sol.

1. Récipient en pvc perforé à la base et relié à l'enregistreur par deux tubes souples.
2. Cartouche de silicagel
3. Turbine à air
4. Module électronique comprenant le régulateur de tension, le temporisateur-déclencher, la chambre de mesure et le capteur IR qui opère dans la gamme de 300 à 40 000 ppm.
5. Datalogger Omega
6. Batterie 12 volts, 7 A/h

Les enregistrements de données avec le Vaisala comme avec l'Omega se font au pas horaire ou trihoraire et nous procurent de la sorte des chroniques sur plusieurs semaines.

Dans l'air, dans le sol et dans les eaux souterraines, les températures sont mesurées au 1/10° C. Dans les sources, les principaux paramètres hydrologiques sont mesurés au moyen d'un multimètre Hach qui nous donne le pH, la conductivité, et la teneur en oxygène dissous.

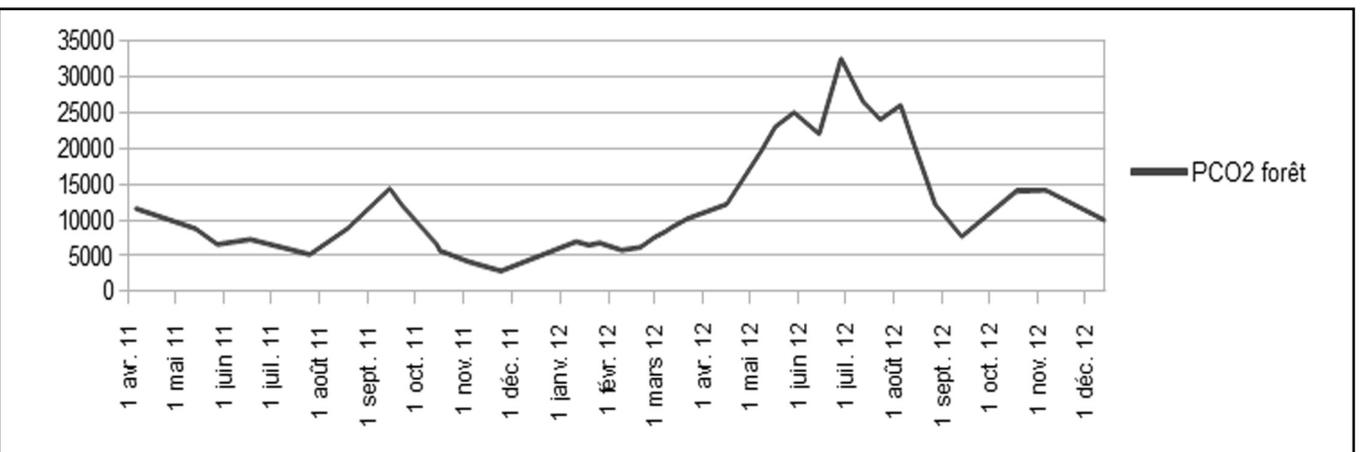
Pour la mesure des débits, nous utilisons un courantmètre Swoffer couplé à un limnimètre. Au laboratoire, nous effectuons les dosages classiques sur les ions calcium et magnésium (TAC et DHT).

Les données des sites météo tels que Phitofa et Pameseb nous servent à établir les corrélations entre nos mesures sur le terrain et les variables météorologiques telles que la température sous abri, la pluviosité, l'ensoleillement et la pression atmosphérique.

## Résultats des mesures

### Le CO<sub>2</sub> dans les sols : une variabilité extrême

Dans les trois types de sol qui surplombent la grotte de Comblain-au-Pont : le sol de la forêt, le sol de la prairie et le sol des cultures (escourgeon), les mesures sont assurées mensuellement, elles montrent un maximum qui se produit à différentes époques entre juin et septembre.



**Figure 5.** Evolution saisonnière de la pCO<sub>2</sub> dans le sol forestier. Les maximums ne se présentent pas toujours aux mêmes dates



**Figure 4** Data-logger en circuit fermé (do it yourself, Omega). Photo du senseur et du data-logger.Omega).

Les maximums atteignent et dépassent 30 000 ppm en 2012 et les minimums frôlent les 2000 ppm en janvier de la même année, soit 15 fois moins. La figure 5 montre l'évolution d'un sol forestier en 2011 et 2012, et la variation de la position des maximums dans le temps.

Le pic négatif enregistré en février 2012 correspond à une vague de froid, avec un sol gelé sur 10cm de profondeur.

Curieusement, dans les sols de la prairie et des cultures, au contact du bedrock, nous avons mesuré à différentes reprises en septembre 2012 des concentrations de 40 000 à plus de 80 000 ppm de CO<sub>2</sub>.

La production de CO<sub>2</sub> dans les sols de la forêt qui échappent aux influences anthropiques est du même ordre de grandeur que les pCO<sub>2</sub> mesurées dans les grottes. De plus, lorsque cette production dans les sols diminue, la teneur diminue également dans les grottes.

### Le CO<sub>2</sub> dans l'air de la grotte : une dynamique saisonnière importante

Dans la grotte de Comblain-au-Pont, il y a en hiver trois ou quatre fois plus de CO<sub>2</sub> que dehors, et en été trente ou quarante fois plus : dix fois plus qu'en hiver (figure 6). Ceci est surtout vrai dans la moitié distale de la grotte. Nous avons observé une situation comparable dans bien d'autres cavités : à Ste-Anne, à Esneux, à la grotte Merveilleuse à Dinant, etc.

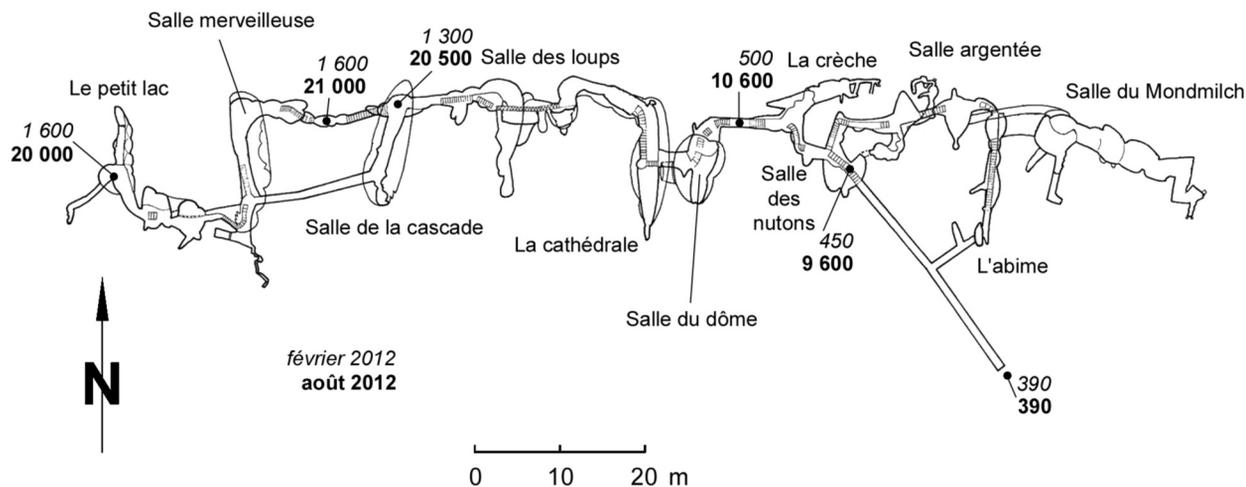


Figure 6. Les variations saisonnières du CO<sub>2</sub> de la grotte. Teneurs en février 2012 et en août 2012.

La grotte-abîme de Comblain-au-Pont possède deux orifices à des niveaux différents : l'entrée naturelle, l'abîme, est une dizaine de mètres plus haut que le tunnel artificiel par lequel entrent les visiteurs. Cette différence d'altitude crée parfois un tube à vent (figure 7). Lorsque la température extérieure descend sous 5°C, l'air de la grotte, plus chaud, sort par l'abîme, provoquant un afflux d'air froid par l'entrée inférieure. La température de la partie de la grotte soumise à ce courant d'air s'abaisse alors, de même que la teneur de l'air en CO<sub>2</sub>, qui passe parfois à moins de 1000 ppm (parts par million) comme le montre la figure 6. Mais lorsque la température extérieure repasse au-dessus de 5°C, l'air du fond de la grotte, froid, ne remonte pas : le tube à vent ne fonctionne plus et la grotte se comporte alors comme un système fermé aux influences extérieures.

La pCO<sub>2</sub> (pression partielle de CO<sub>2</sub>) augmente alors progressivement, notamment du fait de l'introduction dans la grotte d'air venu du sol par les fissures, et sans doute d'eau de percolation riche aussi en dioxyde de carbone. La pCO<sub>2</sub> peut alors atteindre et dépasser temporairement, au bout de la grotte, 20 000 ppm.

**Le CO<sub>2</sub> dans les sources : une réponse très amortie**

Dans le synclinal de Comblain-au-Pont, nous n'avons aucun accès aux eaux souterraines qui alimentent la résurgence vauclosienne du Moulin : le seul endroit où l'eau affleure au fond de la grotte est au bas du puits du GRSC, d'un accès très difficile et dangereux, et nous ignorons si la résurgence du Moulin restitue les eaux d'une vraie rivière souterraine ou si elle draine une nappe phréatique.

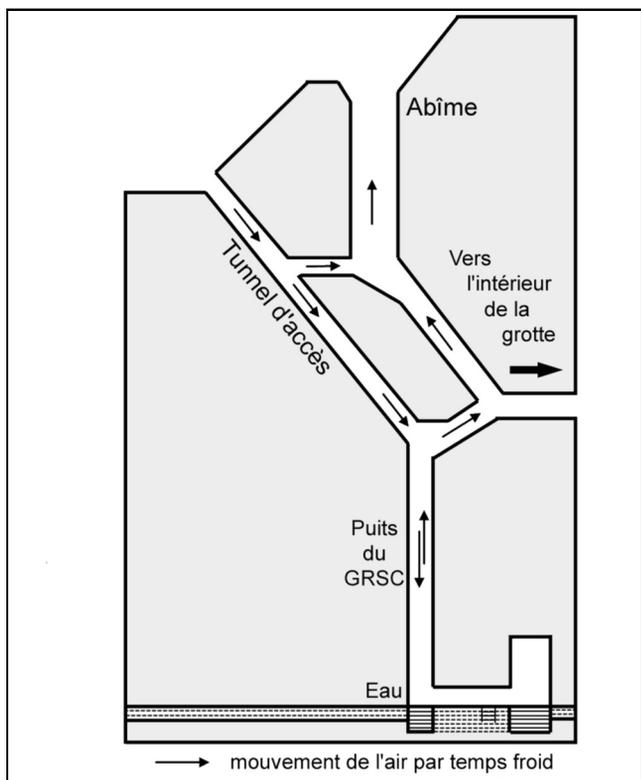


Figure 7. Le tube à vent de la grotte de Comblain. Le mouvement de l'air par temps froid dans le puits du GRSC, au pied de la salle du Mammouth

Nous pouvons cependant à partir des données physico-chimiques calculer les pCO<sub>2</sub> d'équilibre des eaux de la résurgence qui nous renseignent sur la composition de l'atmosphère en contact avec les eaux à l'intérieur du karst. La figure 8 est la courbe des pCO<sub>2</sub> calculées pour l'année 2012 à la résurgence du Moulin.

Celle-ci montre que les pressions partielles de CO<sub>2</sub> les plus élevées (> 25 000 ppm) se produisent en été et en automne, et les plus faibles (< 15 000 ppm) en hiver et au printemps. Cette courbe présente des similitudes avec celle des pCO<sub>2</sub> relevées dans le fond de la grotte de Comblain.

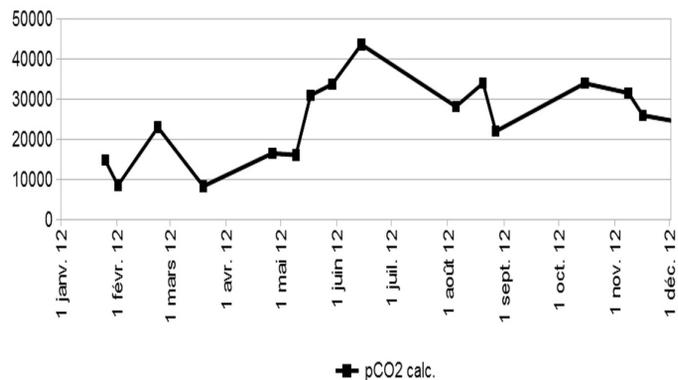


Figure 8. Les pCO<sub>2</sub> calculées des eaux de la résurgence du Moulin



**Figure 9.** La puissante résurgence du Moulin située dans le village de Comblain en bordure de l'Ourthe et qui fonctionne comme l'exutoire principal du massif calcaire.

## Conclusions et perspectives

### Une météorologie d'une grande complexité

Le système sol – cavité – drainage souterrain est d'une complexité considérable. Il est essentiellement alimenté en CO<sub>2</sub> par le CO<sub>2</sub> du sol. Une partie de celui-ci descend dans l'air ou dans l'eau, essentiellement par les fissures et les pertes des cours d'eau. Une partie du CO<sub>2</sub> quitte le système karstique par une résurgence. La fourniture de dioxyde par la biomasse du sol est d'une variabilité extrême. Les maximums sont généralement estivaux, et il en est de même en grotte, avec, le plus souvent, un à trois mois de retard. Les teneurs en grotte sont dix ou quinze fois plus fortes en été qu'en hiver. Outre ce rythme saisonnier, relié à celui de la production pédologique, on observe parfois à la grotte de Comblain des variations soudaines, de courte durée, liées à des variations de température ou de pression barométrique. Mais des variations sont aussi liées aux connexions avec le karst profond d'où peuvent émaner des bouffées de CO<sub>2</sub>.

Les drains profonds montrent dans l'eau des variations plus amorties, de l'ordre du simple au double. Elles reflètent sans doute la perpétuelle recherche d'équilibre entre le CO<sub>2</sub> gazeux issu du sol et le CO<sub>2</sub> dissous, suivant la loi de Henry. C'est ce que nous mesurons dans les sources.

Le calcul des pCO<sub>2</sub> équilibrantes nous a donné les valeurs de la pression partielle de CO<sub>2</sub> d'un air en équilibre avec les eaux souterraines à l'émergence.

Deux modes de fonctionnement apparaissent nettement : entre janvier et mai, des pCO<sub>2</sub> basses, inférieures à 25 000 ppm (15 700 en moyenne) et entre mai et décembre, des teneurs quasi doubles (30 700 en moyenne).

Nous avons déjà observé (voir courbe des pCO<sub>2</sub> calculées de 2011) cette alternance hiver-été à l'exurgence du Monceau avec le même rapport du simple au double mais avec plus de linéarité.

Dans le bassin versant de ce petit synclinal dévonien, le flux de carbone calculé à partir de la pluviosité et des débits à l'exutoire est de l'ordre de 1,5 mole de carbone par m<sup>2</sup> par an.

### Une approche systémique à perfectionner

Les transferts de CO<sub>2</sub> et leurs variations sont liés à tous les paramètres du climat. La température est en Belgique un facteur important de la croissance de la végétation. Le gel met une limite à beaucoup de phénomènes biologiques, mais aussi il imperméabilise le sol et arrête l'infiltration.

La pression barométrique intervient aussi car, par exemple, une forte chute de la pression à l'extérieur entraîne la sortie de l'air de la grotte. La pluie n'a pas seulement une action sur la végétation, mais aussi sur l'infiltration de l'eau dans la roche, qui apporte au sous-sol du CO<sub>2</sub> dissous.

Nous avons observé tous ces phénomènes et les relations entre eux. Une étude du climat et de la météorologie ne peut être que systémique. C'est fondamental. Mais les stations météorologiques les plus proches sont à plus de 10 km du site étudié. Tous les paramètres climatiques mériteraient des mesures permanentes sur place.

### Un climat qui évolue

Dans l'Ecokarst, nous avons déjà publié nos observations sur l'évolution du climat des vides karstiques que nous suivons depuis plus de quarante ans (Godissart et Ek, 2009). L'augmentation des teneurs en CO<sub>2</sub> est considérablement plus forte que celle des teneurs à l'air libre. Il faut dire aussi que la multiplication de nos mesures au cours des dix dernières années nous permet de mettre mieux le doigt sur les maximums éphémères des teneurs en dioxyde de carbone. Ceci amène peut-être à une légère exacerbation des changements observés.

### L'avenir est au data-logging

Pendant longtemps, nous avons fait à Comblain une ou deux séries de mesures par mois. Ceci nous permettait de faire une courbe annuelle en vingt-quatre points. Les appareils de mesures mis au point récemment ont gagné en facilité et autonomie. Nous pouvons enregistrer pendant quinze jours, par exemple, une mesure toutes les trois heures ou même toutes les heures. Couplés à un datalogueur ces appareils assurent des fonctions de surveillance ou d'alarme dans des zones à risques. Son autonomie est de plusieurs semaines et il pourrait fort bien prendre place dans l'attirail du spéléologue à la recherche de cavernes ou de prolongements puisqu'il est capable, par exemple, de détecter les pics de CO<sub>2</sub> en provenance de la zone profonde qui se produisent lors du passage d'un cyclone.

### Remerciements

À **Vincent Brahy**, premier attaché, et **Patrick Engels**, attaché, qui, délégués par le S.P.W., suivent de près nos travaux et assurent la tutelle du projet ;

à **Jacques Hébert**, professeur à Agro-Bio-Tech, Université de Liège, qui nous a accompagnés sur notre terrain d'étude ;

à **Découvertes de Comblain, ASBL**, qui assume l'encadrement administratif de nos travaux, et en particulier à son Directeur, Julien Goijen, et à deux membres, Nicolas Klingler et Barnabé Ek, qui nous assistent dans nos mesures hydrologiques ;

à **Philippe Labarbe**, notre conseiller en informatique et en infographie, auteur de la présentation finale de presque toutes nos figures ; et, last but not least, à **Marie-Claire Cellier**, qui assume la composition des textes de nos rapports et contributions.

*Travail réalisé sous convention RW-ULg. Origine de l'information : SPW, DGARNE. Données et informations provisoires (2012) relatives à la carte géologique de Wallonie 49/1-2, Taviers-Esneux.*

Camille EK &  
Jean GODISSART

