



Editorial

Le dernier Eco Karst de l'année rend hommage à une belle brochette de chercheurs, qu'ils soient spéléologues ou scientifiques... certains combinant ces deux qualités rares.

Actifs dans des disciplines très différentes, ils ont en commun une passion pour le milieu souterrain et ne comptent pas leurs heures passées à rassembler des observations minutieuses afin de mieux appréhender le fonctionnement, la protection et la valeur patrimoniale de cet environnement particulier.

- L'**étude anthropologique** réalisée à partir de milliers de fragments d'os extraits de la grotte des A vins s'apparente à un puzzle des plus redoutables. Leur étude permet d'en savoir un peu plus sur les hommes qui occupèrent les rives du Hoyoux il y a 5000 ans !
- 50 années de **mesures de CO2** dans quelques cavités wallonnes démontrent que ce gaz est en augmentation très rapide dans le sous-sol et pose question sur son origine et l'influence possible sur notre climat.
- Dans le domaine de l'**hydrologie**, l'observation minutieuse et répétée des débits à différents points de perte et de deux sorties d'eau à l'aval du ruisseau de l'Isbelle a permis de modéliser les écoulements de ce système et d'en résoudre l'énigme.
- La réalisation d'un **état des lieux régulier** en cas de pollution a abouti à la réhabilitation d'un grand chanoir à La Calamine. Un exemple et un encouragement pour tous les collaborateurs de la CWEPSS qui réalisent ce rude travail.

Enfin sur une note plus cwepssienne, ce numéro est aussi l'occasion de fêter la sortie de la **monographie karstique Haute-Meuse dinantaise**, de remercier les nombreuses personnes qui y ont contribué et de vous inviter à commander et découvrir cet ouvrage de référence.

Bonne lecture à tous et que 2018 vous apporte plein de chouettes projets et de nouvelles découvertes.

G. MICHEL

FAIRE PARLER DE VIEUX OS

Bilan de l'étude anthropologique de la grotte n°1 des A vins (Clavier)

Dans l'Eco Karst 101 (sept. 2015), nous évoquions les grottes des A vins, leur contenu archéologique mis au jour par une association locale et le fait que malgré une récolte assez abondante, ces vestiges préhistoriques n'avaient pas fait l'objet d'une étude scientifique approfondie.

Suite à cet article, grâce à la bonne volonté de la Commune de Clavier et aux découvreurs qui gèrent ce patrimoine archéologique dans un petit musée, nous avons pu intéresser une institution universitaire à reprendre l'étude de ces artefacts.



Craâne en vue frontale, individu plutôt masculin entre 35 et 50 ans

Deux ans plus tard, un mémoire en archéologie, centré sur le matériel osseux provenant de la plus riche de ces 3 cavités, vient d'être défendu à l'Université Libre de Bruxelles. Nous avons demandé à Charlotte Sabaux, auteur de ce travail, d'en résumer les grandes lignes.

Il s'agissait notamment de montrer comment, à partir d'un grand nombre d'ossements rassemblés et étiquetés dans des caisses par les découvreurs, on peut tenter d'en savoir plus sur l'occupation humaine des bords du Hoyoux au Néolithique.

Avec des techniques d'investigations originales, l'archéologue a réussi à faire « parler » des os de près de 5000 ans pour répondre notamment aux questions suivantes :

- La grotte est-elle une sépulture collective ou un simple « dépotoir » ?
- Quelles étaient les pratiques funéraires des hommes sur les rives du Hoyoux ?
- Combien de corps se trouvaient dans cette cavité ?
- A quand remonte l'utilisation, voire l'occupation humaine de la grotte ?
- Dans quel état se trouve le matériel osseux et que peut-on en conclure ?

Pour ce faire, un travail complexe d'analyse, de mesure et de description a été nécessaire. Bien que les inventeurs aient numéroté chaque objet trouvé et qu'ils aient travaillé le plus soigneusement possible, l'absence de coupe stratigraphique et de journal de fouille rendait les interprétations bien difficiles.

Les fouilleurs ont été associés à l'étude; leurs souvenirs ont permis de mieux appréhender le contexte dans lequel les fouilles ont été réalisées... il y a maintenant 30 ans. Comme souvent, l'étude a également soulevé de nouvelles questions qui mériteraient à leur tour des recherches complémentaires... Celles-ci se heurteront très probablement aux difficultés d'interpréter un tel gisement et à ses conditions de conservation.

Le site des Avins

Les trois grottes, distantes de moins de 30 m, sont étagées entre 17 et 5 m au-dessus de la rive droite du Hoyoux (Michel & Fanuel, 2015 : 7). Le matériel étudié provient de la cavité la plus élevée (appelée

communément grotte n°1 ou grotte archéologique des Avins).

Il s'agit d'une cavité modeste (36 m de développement), constituée d'une galerie en pente descendante.

Vu la quantité d'ossements et d'objets qui ont été sortis de cette modeste cavité, le site et son contenu archéologique méritaient certainement qu'on y porte un œil plus attentif.

Le but du travail fut d'étudier les ossements humains provenant de la grotte n°1 et de redécouvrir ce site oublié depuis trente ans. Nous avons voulu savoir si nous avions affaire à un dépotoir, comme l'hétérogénéité de la céramique le laissait supposer, ou si le site était un lieu de sépulture. Les os et tout le matériel extrait de la grotte étaient regroupés dans des caisses, sans informations sur les conditions de fouilles ni sur l'aspect du gisement lors de la découverte.

En l'absence d'un dossier de fouilles, d'une stratigraphie complète (relevant la succession des couches et occupations) et de plans ou photos relatant l'avancée des fouilles et la position des découvertes, il a fallu recourir à d'autres techniques d'investigation pour tenter de répondre à ces questions.

Les Avins I présente un ensemble assez hétérogène de céramiques, allant du Néolithique au Haut Moyen Âge, et un désordre général des os qui peut être dû à différents facteurs : les éléments extérieurs, l'Homme de façon plus au moins récente ou les Néolithiques eux-mêmes, qui avaient pour habitude de manipuler les corps et d'emporter certains restes (Toussaint 2007 : 524-525).

Un couloir latéral étroit débutant à quelques mètres du porche, plonge sur 7 m de profondeur avant de s'arrêter sur un bouchon de glaise et de blocs.

La cavité est sèche, orientée sud-est, avec peu de percolation. Ses parois laissent voir quelques formes de corrosion anciennes, indiquant la présence (fossile) d'une eau courante. Elle débute par un porche assez vaste, qui fut entièrement dégagé lors des fouilles, tous les terrains meubles ayant été évacués et passés au tamis. Très rapidement, le plafond de la galerie s'abaisse et la grotte se limite à un couloir de 2 à 2,5 m de large (Michel & Fanuel, 2015 : 10).

Les objectifs poursuivis

Les grottes des Avins sont très peu mentionnées dans la littérature ; la grotte n°1 est reprise dans certains répertoires archéologiques comme un site/sépulture néolithique, sans autre précision.

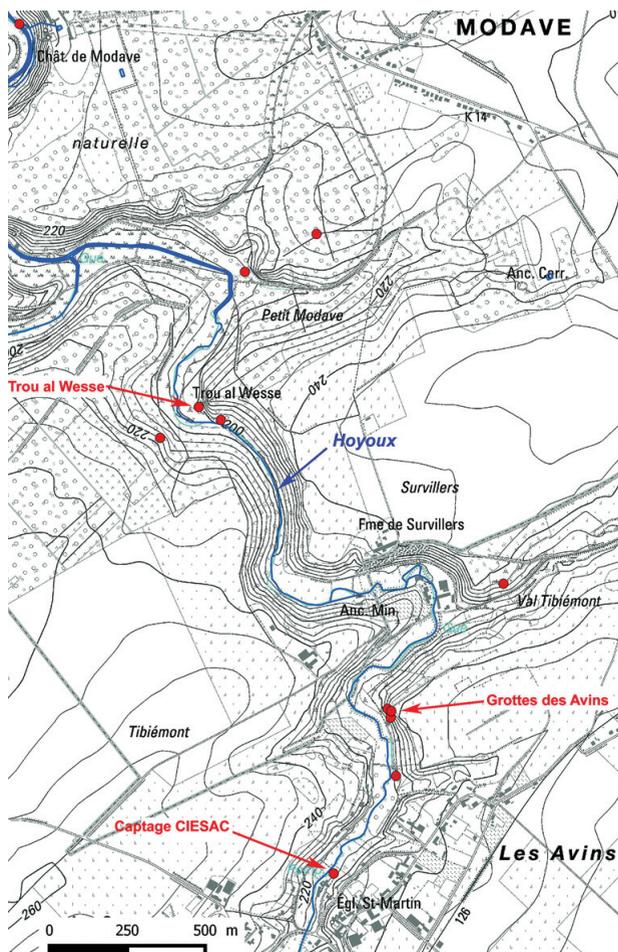


Fig.1. Localisation du site "les Avins" (commune de Clavier) en rive droite du Hoyoux à quelques km en amont de village de Modave.

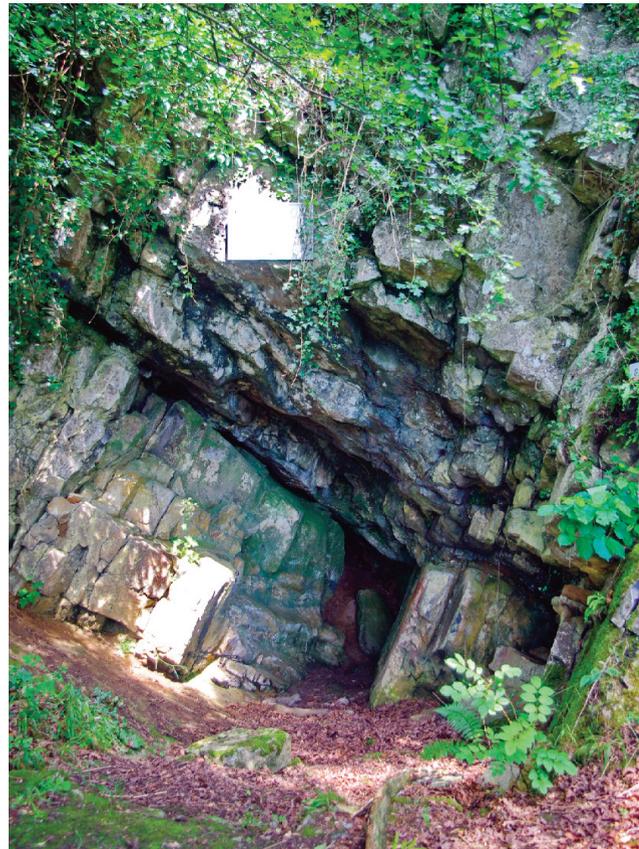
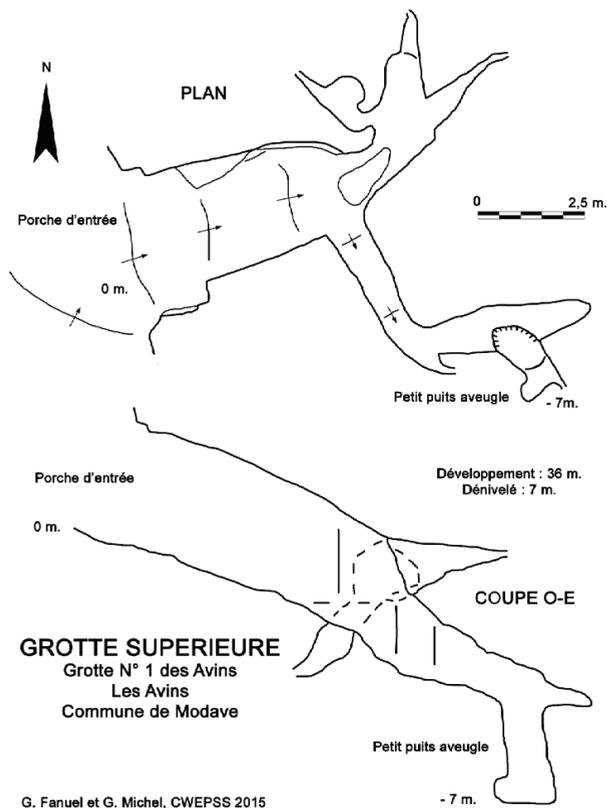


Fig. 2.a & b. Topographie de la cavité et vue du vaste porche qui fut dégagé lors des travaux de fouilles dans les années 1980.

Quelques unes des méthodes d'instigations appliquées au matériel osseux étudié

I. La taphonomie

Étant donné le contexte en grotte de la découverte, un élément intéressant à aborder était la taphonomie, discipline généralement peu exploitée. Il s'agit de toutes « les transformations subies par les organismes après leur mort et des processus régissant la conservation ou la destruction de leur restes » (Susanne & Polet, 2005 : 372).

Différents éléments, anthropiques, géologiques et biologiques (la météo, l'eau, les animaux...), participent à la formation des sites et peuvent altérer les dépôts présents dans ceux-ci.

En l'absence de stratigraphie, la taphonomie permet de mieux caractériser les os entre eux et mieux les apparier (deux ver-

tèbres appartenant à une même colonne mais ayant une couleur différente, proviennent de deux milieux différents, elles n'étaient donc pas en connexion anatomique). En voici quelques exemples,

a/ L'action de la végétation

La présence de plantes à proximité d'ossements peut laisser des marques caractéristiques appelées *root etching*. Il s'agit d'entrelacs sinueux et irréguliers à la surface de l'os, issus de l'acide carbonique produit par les racelles de certaines espèces végétales (fig. 3). La présence de ce root etching sur certains os des Avins I indiquent que ceux-ci étaient dans un environnement sédimentaire au contact de plantes / racines (et donc très proche de la surface) durant une partie de leur histoire.

b/ Traces laissées par le manganèse

Des taches noires et noires-bleues plus ou moins étendues sont présentes sur la surface de nombreux os des Avins I (fig. 4). Il s'agit dans notre cas de manganèse, un des métaux les plus abondants dans le sol. Ces taches nous informent d'un contact avec le sol (si les os étaient enterrés par exemple) et nous renseignent sur la composition du sol.

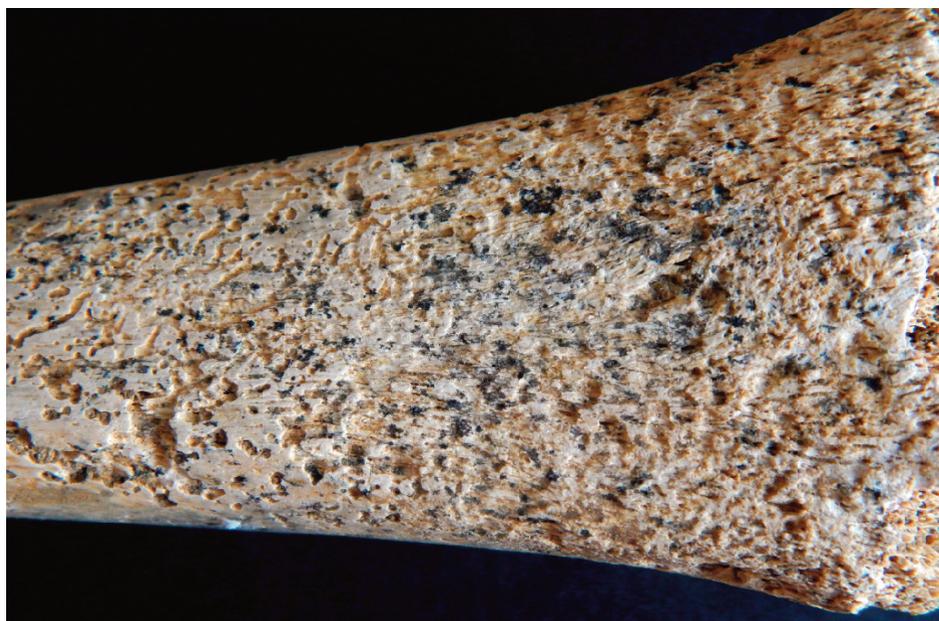


Fig. 3. Traces de root etching sur un fémur.



Fig. 4 : traces de manganèse bien visibles sur un fragment de crâne.

c/ L'action des animaux

Les animaux peuvent également altérer un dépôt osseux. Les carnivores, par exemple, peuvent engendrer une modification morphologique de l'os (en y laissant des traces) ou le déplacer. Les animaux fouisseurs, comme le blaireau ou le lapin, et les rongeurs peuvent aussi déplacer les os ou les casser (Denys & Patou-Mathys, 2014 : 54-55). Des traces de dents de rongeurs ont été observées sur certains os des Avins I (fig. 5). Les insectes et les vers de terre participent également à la migration et à l'altération des ossements (Duday, 2009 : 10).

Une étude plus poussée de taphonomie, associée à une étude géologique, pourrait permettre de reconstituer en partie la stratigraphie du site et de mieux caractériser les différentes couches, milieux et secteurs de la grotte.



Fig. 5 : traces de dents de rongeur sur une côte.

II. Les datations

Au vu, notamment, de la diversité de la céramique retrouvée aux Avins I, apparentées à quasi toutes les périodes entre le Néolithique et le Haut Moyen-Âge, des datations au carbone 14 ont été effectuées afin de déterminer l'âge des restes humains.

Cette méthode, se basant sur la proportion C12/C14 dans l'organisme, permet une datation absolue, précise et chiffrée allant jusqu'à 60 000 ans (Susanne & Polet, 2005 : 260-262).

Deux ossements présentent des dates assez similaires, appartenant au Néolithique récent 3 (4225 +/- 33 BP et 4129 +/- 34 BP). Un os quant à lui témoigne d'un individu plus ancien, remontant au Néolithique moyen (5041 +/- 35 BP). Cette date fait des Avins I l'un des rares sites de cette époque dans le Bassin mosan, période qui compte dans cette région une vingtaine de sites et des squelettes incomplets (Toussaint, et al. 2001 : 93 & 2013 : 188). Ces datations permettent de dire qu'au moins une partie des restes humains n'est pas contemporaine des fragments de céramique les plus abondants, associés à l'Âge du Fer.

III. L'étude anthropologique

Différentes méthodes ont été utilisées pour déterminer le nombre minimum d'individus dans la grotte, leur âge, leur sexe et leur stature. Leurs pathologies (maladies) et leurs variations anatomiques, appelées caractères discrets, ont également été étudiées.

Il semble qu'au moins 6 individus adultes et 15 immatures aient été présents. Ce nombre d'au moins 21 individus inhumés est intéressant, d'une part, car il dépasse les cinq à quinze inhumés généralement retrouvés dans les grottes néolithiques du Bassin mosan, et d'autre part, car le nombre d'enfants dépasse nettement les 50 % généralement évoqués pour les autres sites contemporains de la région (Cauwe et al. 2011 : 87).

Parmi ces individus, on dénombre trois jeunes adultes (18-25 ans), deux adultes d'âge moyen (25-50 ans) et un individu plus âgé (> 50 ans). L'un des individus serait plutôt masculin et deux autres seraient plutôt féminins.

Pour les immatures, on dénombre un fœtus, trois individus entre 5-6 mois et 3 ans, deux individus entre 3 ans et 7,5 ans, sept individus entre 7,5 et 15 ans et deux individus de plus de 15 ans. Parmi ceux-ci, six seraient plutôt masculins et trois plutôt féminins. Les individus de la grotte n°1 des Avins ont donc été enterrés sans distinction d'âge ou de sexe, comme c'est le cas dans les autres grottes néolithiques.

La détermination des âges et des sexes se fait sur la base de la taille et de la morphologie de certains os. Cependant comme on ne dispose d'aucune information sur les connexions anatomiques qu'il pouvait y avoir entre les ossements, nous ne pouvons déterminer le sexe que pour l'os du bassin ou le crâne sans pouvoir les associer au reste.

Au niveau de la stature, on a des individus qui correspondent pour la plupart aux mesures associées aux Néolithiques du Bassin mosan (1,55m - 1,59m) même si un des individus étudiés semble plus grand.

Au niveau des variations anatomiques, nous avons relevé des os surnuméraires (accessoires) au niveau du crâne, des incisives "en pelle" (face intérieure en forme de pelle) et des tubercules de Carabelli (variation anatomique de la molaire) au niveau des dents, indiquant sans doute un lien de parenté entre certains individus de la grotte.

Aucune ligne de Harris (traces d'arrêts de croissance au niveau du tibia) et très peu d'hypoplasie (traces de carences au niveau de l'émail dentaire) évoquent une bonne hygiène de vie, même si certains ont perdu des dents allant jusqu'à l'édentation (fig.7). De l'arthrose a également été relevée et elle est présente de façon importante sur de nombreuses vertèbres (fig. 6).

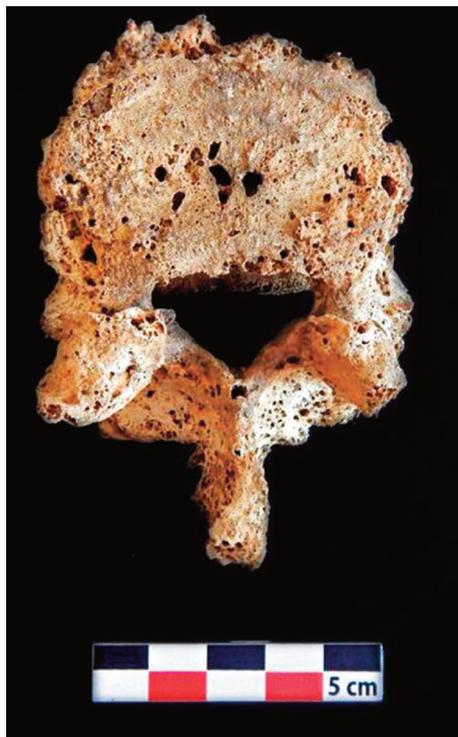


Fig. 6 : présence d'arthrose sur une vertèbre

Conclusion

La fonction du site des Avins (lieu de sépulture ou non) a été en partie déterminée grâce à l'étude de la répartition des restes humains dans la grotte, les souvenirs des fouilleurs et l'étude anthropologique. La grotte I des Avins a fait l'objet de plusieurs dépôts au Néolithique moyen et récent, et peut-être aux âges des Métaux.

La présence majoritaire d'os des mains et des pieds est un indicateur de sépultures de type primaire ; à savoir un lieu dans lequel les individus ont été déposés peu de temps après leur mort à l'état de cadavre, et non un dépotoir. En effet, lorsqu'un cadavre se décompose, les os des mains et des pieds sont les premiers à se déconnecter et, si le corps est déplacé par après, ces os ne se retrouvent pas.

Leur présence indique que la décomposition s'est déroulée à cet endroit. Le nombre faible d'os adultes, et surtout d'os longs (fémurs, tibias ...), indique une vidange de la grotte à un moment donné... Peut-être un nettoyage du site, pour y refaire de la place et accueillir d'autres corps ?

Le site des Avins I présente de nombreuses caractéristiques communes aux sépultures néolithiques du Bassin mosan. Les squelettes sont incomplets et les ossements souvent fragmentaires. Le site s'en distingue toutefois par la présence d'individus datés du Néolithique moyen et une proportion élevée d'enfants (> 50%), sans qu'on y trouve d'explication.

Ce travail a aussi montré l'importance d'une étude anthropologique au sein d'un site, l'apport non négligeable d'autres disciplines comme la taphonomie et l'intérêt de pouvoir observer les éléments en contexte, sans quoi les données sont à jamais perdues. En effet, tout déplacement de vestiges dans un site qui n'est pas répertorié peut entraîner une perte de données ou une mauvaise interprétation.

Perspectives

Une étude de l'ensemble des trois grottes des Avins permettrait de tirer des conclusions plus générales sur le site et peut-être de préciser davantage la fonction de la première grotte.

L'étude des deux autres grottes sera effectuée dans le courant de 2018, par deux mémorants de l'ULB. L'étude anthropologique mériterait être poursuivie afin de connaître le régime alimentaire de ces individus (par des méthodes biochimiques) ou de retrouver les liens de parenté supposés (par une étude ADN). Certains cas pathologiques mériteraient aussi une relecture.

Maintenant qu'ils ont été correctement inventoriés et étudiés, se pose la question de la conservation, mais également de la valorisation de ce patrimoine archéologique. Nous étudions actuellement la possibilité, en accord avec les inventeurs du site et avec la Commune de Clavier, de mieux valoriser la collection des Avins. Un réarrangement en profondeur du petit musée est à l'étude, avec une refonte des vitrines, la création de cartels, la sortie de publications vulgarisées, ainsi qu'une publicité actualisée. Un tel projet permettrait modestement de contribuer à valoriser l'histoire du superbe village des Avins... en présentant en particulier l'époque Néolithique.

Charlotte Sabaux
Licenciée en Archéologie de l'ULB



Fig. 7 : mâchoire supérieure présentant une édentation importante et une destruction osseuse. L'os s'est presque totalement reconstruit en bouchant les alvéoles des dents.

Références bibliographiques

- Beisaw, A. M. (2013), *Identifying and interpreting animal bones: a manual*, Texas A&M University Press.
- Cauwe, N., Hauzeur, A., Jadin, I., Polet, C. & Vanmontfort, B. (2011), 5200-2000 av. J.-C. Premiers agriculteurs en Belgique, Cedarc.Crubézy, 2000
- Denys, C. & Patou-Mathis, M. (2014), *Manuel de taphonomie*, Éditions Errance.
- Duday, H. (2009), *The archaeology of the dead: lectures in archaeoethanatology*, Oxbow.
- Michel, G. & Fanuel, G. (2015), « Les grottes des Avins (Clavier) - Cavités méconnues au riche passé... en quête d'avenir », *Eco Karst*, N°101, pp. 7-11.
- Susanne, C. & Polet, C. (2005), *Dictionnaire d'anthropobiologie*, De Boeck, Bruxelles.
- Toussaint, M. (2007), « Les sépultures néolithiques du Bassin mosan wallon et leurs relations avec les bassins de la Seine et du Rhin », *In Relations interrégionales au Néolithique entre Bassin parisien et Bassin rhénan. Actes du 26e colloque sur le Néolithique Luxembourg*, Vol. 8, pp. 507-549.
- Toussaint, M., Orban, R., Polet, C., Semal, P., Bocherens, H., Masy, P. & Garcia Martin, C. (2001), « Apports récents sur l'anthropologie des Mésolithiques et des Néolithiques mosans », *Anthropologica et Praehistorica*, N°112, pp. 91-105.
- Toussaint, M. (2013), « Transitions, ruptures et continuité dans les pratiques sépulcrales préhistoriques du karst mosan belge et de ses abords », *In Jaubert J., Fourment N. & Depaepe P., Transitions, ruptures et continuité en Préhistoire*, pp. 183-200.

Pour toute information supplémentaire, consultez le site <http://www.si-valleedu-hoyoux.be>

FLUX DE CO2 ET CLIMAT DANS QUELQUES GROTTES DE WALLONIE

La conférence de la COP 23 (conférence climat de l'ONU), tenue à Bonn en novembre 2017, a encore mis en avant combien les changements climatiques enregistrés lors des derniers cent ans sont exceptionnellement rapides et préoccupants. Leurs conséquences sur les conditions de vie à la surface de la terre sont majeures et il est aujourd'hui généralement convenu dans la communauté scientifique que la concentration des gaz à effet de serre dans l'atmosphère (parmi lesquels le CO₂) joue un rôle prépondérant dans le réchauffement global observé depuis le début de la révolution industrielle.

Dans la régulation de la concentration de ce gaz, le rôle des pièges à carbone que sont les forêts est important. Les échanges de CO₂ entre l'atmosphère et les océans seraient également un tampon essentiel, bien qu'encore incomplètement compris et surtout très difficiles à quantifier. Enfin, on est en droit de se demander si le milieu souterrain et en particulier la composition de « l'air des grottes » évolue de la même manière que l'atmosphère et comment fonctionnent les échanges entre ces deux milieux.

Un demi-siècle de mesures de dioxyde de carbone (CO₂) dans les grottes nous permet de tirer les enseignements suivants : le CO₂ est beaucoup plus abondant dans les milieux souterrains qu'à l'air libre. A l'air libre en effet, il y a à peu près partout et toujours (sauf pollution) 400 ppm de CO₂. Dans les grottes, il y en a dix à cinquante fois plus, parfois davantage; et surtout, sous terre, il est en voie d'augmentation plus rapide qu'en surface.

Nous nous attachons à essayer de comprendre les processus à l'origine de cette augmentation rapide ainsi que les fluctuations saisonnières dans l'air des cavités. Une fois de plus, le milieu souterrain apparaît comme un terrain de recherche intéressant... non seulement pour étudier les climats passés (via les pollens, les sédiments ou les isotopes stables fixés dans les concrétions), mais peut-être aussi pour appréhender les changements en cours dans la composition de notre atmosphère.

1. Matériel et méthodes de mesure : un problème de comparabilité

Nos premières mesures de CO₂ dans les grottes belges furent réalisées en 1966, dans un nombre relativement limité de cavités. Au cours du temps, nous nous sommes concentrés en particulier sur la Grotte de l'Abîme (Comblain), le système de Sainte-Anne (Esneux) et la Merveilleuse (Dinant).

Au cours de ces 50 années les appareils de mesures utilisés pour vérifier les concentrations de CO₂ ont également grandement évolué :

- Ø Nous avons débuté avec l'appareil à électrolyse de Koepf ;
- Ø Nous avons utilisé le procédé Gastec qui consiste à doser le CO₂ avec une ampoule remplie d'hydrazine qui se colore en mauve le long d'une échelle graduée ;
- Ø Depuis 2008, nous utilisons les appareils à faisceau infrarouge Dräger X-am 7000 et Vaisala MI 70 ; ces deux appareils mesurent le CO₂ dans la gamme 0 à 50 000 ppm (5 %). Ils permettent une mesure instantanée du CO₂, sans nécessiter de réactif, autorisant ainsi la multiplication des mesures.
- Ø Enfin, depuis 2011 ces mesures ponctuelles (mensuelles à Comblain-au-Pont) sont complétées par des enregistrements sur data logger. Avec des relevés tri horaires sur une durée d'un mois, ceux-ci permettent d'enregistrer les fluctuations horaires et journalières (voir figs 5 à 7) et de mieux comprendre les cycles du CO₂ dans l'atmosphère des grottes.



Utilisation du Vaisala MI 70 équipé d'une petite pompe à la grotte de Comblain (photo C. Ek).

A chaque changement d'appareillage, nous avons fait de nombreuses mesures en parallèle avec les deux systèmes pour nous assurer qu'en un même lieu et un même moment, les deux techniques nous fournissaient des données semblables, afin de pouvoir comparer dans le temps et sans biais d'échantillonnage, des valeurs obtenues avec des appareillages différents.

Les valeurs de CO₂ mesurées en grottes sont ensuite comparées aux données horaires de l'observatoire météorologique de Bierset (Liège) situé à 20 km au nord de la zone étudiée.

2. Résultats observés : fluctuation et évolution du CO₂ de l'air des grottes

2.a D'importantes variations saisonnières

Au cours de l'année, les fluctuations de la concentration en CO₂ dans l'atmosphère des grottes peuvent être très importantes dans certaines cavités. Il y en a nettement plus en été, comme le montre l'exemple de la grotte Sainte-Anne à Tilff (Esneux). La figure 1 montre un net maximum estival.

En outre, on y constate un étalement de ce maximum selon l'étagement dans la cavité :

- Dans l'étage supérieur de la grotte de Brialmont (partie supérieure du système karstique de Sainte-Anne), le maximum de CO₂ se marque en juillet ;
- dans les galeries inférieures de Brialmont, un double maximum s'observe en juillet et septembre ;
- dans la grotte Sainte-Anne même, partie inférieure de tout le réseau, le maximum n'apparaît qu'en septembre.

Ces trois étages sont respectivement à 10, 20 et 90 m sous la surface du sol, et ceci suggère un flux de CO₂ descendant progressivement du sol vers la profondeur.

Une différence semblable entre l'été et l'hiver s'observait à la **Merveilleuse** à Dinant en 1990: en cinq endroits de la grotte, au milieu des salles et galeries, nous mesurons en mars, des teneurs de 400 ppm, très proches donc de celle de l'atmosphère libre; en août, aux mêmes endroits, nous trouvons le double : 800 et 900 ppm (fig. 10).

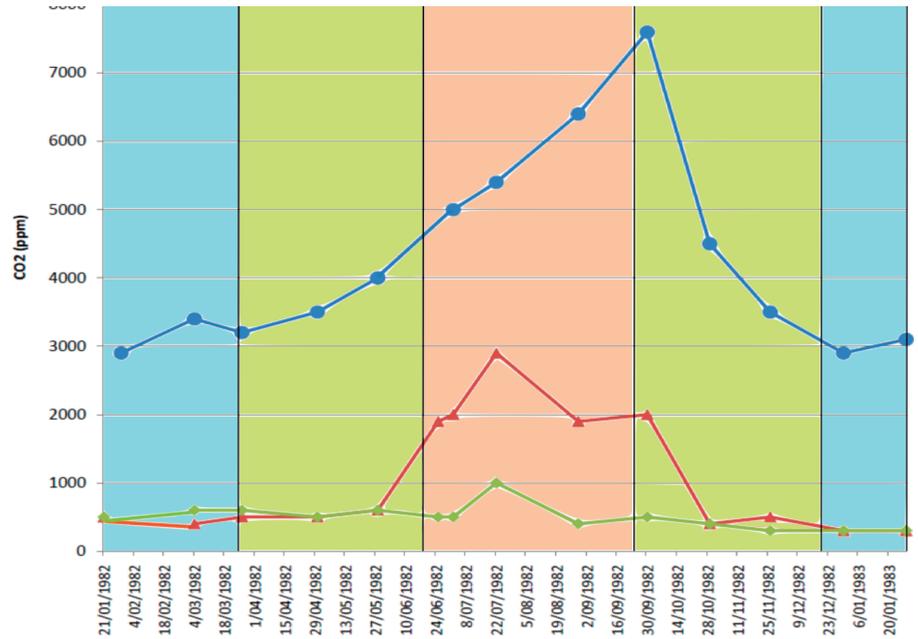


Figure 1. Évolution saisonnière du CO₂ de l'air dans les galeries des grottes de Brialmont et Sainte-Anne à Tilff (Esneux) en 1982 (modifié de Ek & Gewelt, 1985). En vert, étage supérieur de la grotte de Brialmont ; en rouge, galeries inférieures de la même ; en bleu, étage de la rivière de la grotte Sainte-Anne.

A la **grotte-abîme de Comblain-au-Pont**, nous observons la même fluctuation saisonnière: en 2012, le maximum de la teneur hivernale était de 1600 ppm; le maximum observé en été atteignait les 21.000 ppm (fig. 2). Grâce à la multiplication de nos analyses, nous avons pu vérifier que cette alternance saisonnière s'est produite selon le même schéma entre 2012 et 2017.

En 2017, la teneur hivernale maximum est de 2400 ppm en février, et le maximum d'été est de 32.000 ppm si l'on excepte un petit puits soufflant localement un air à 33.500 ppm.

La saisonnalité du rythme est donc évidente : le maximum est estival; on l'observe en août ou en septembre (Godissart & Ek, 2013).

Grotte de Comblain-au-Pont

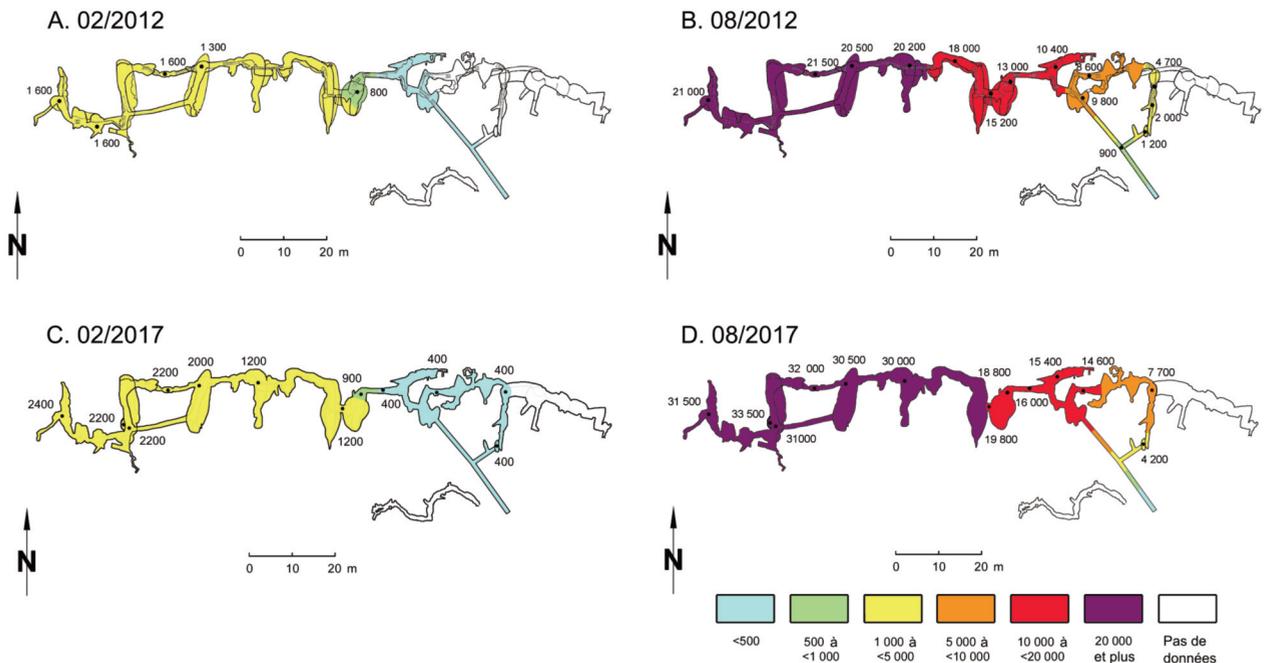


Figure 2. Les teneurs en CO₂ de l'air de la grotte de Comblain-au-Pont. A: en février 2012; B: en août 2012 ; C: en février 2017; D: en août 2017.

2.b Une tendance générale à l'augmentation

En plus des variations saisonnières très marquées et bien visibles sur les graphiques (fig. 1), on constate une tendance générale à un accroissement de la teneur estivale de l'air des grottes en CO₂.

Nous basant sur quelques mesures anciennes que nous avons faites dès 1966 (Delecour & al., 1968), nous avons montré une croissance spectaculaire du CO₂ dans les grottes durant le dernier demi-siècle (Godissart & Ek, 2009).

A la grotte-abîme de Comblain-au-Pont, la teneur de l'air en CO₂ augmente aussi. Nous avons reporté sur la figure 3 les teneurs en dioxyde de carbone de la salle du Petit Lac, salle terminale de la grotte, au fil des années 2012 à 2017. On voit que l'augmentation est irrégulière, mais que la tendance générale est néanmoins irréfutable.

2.c Les flux de CO₂ dans les grottes

Selon la morphologie des cavités, les volumes de vides, les entrées et les échanges de masses d'air qu'ils génèrent, on peut observer au cours de l'année d'importants flux de CO₂ vers certaines galeries, mais aussi en direction de l'extérieur : un peu comme si la grotte respirait... avec des phases d'inspiration et d'expiration.

Dans la **grotte Merveilleuse** à Dinant, une étroite galerie inclinée vers le nord, dans la salle du Temple de Diane, rejette un flux à forte teneur en CO₂ comme le montre la fig. 4. Dans le cas présent, le CO₂ provient d'une région inconnue du karst, sans doute confinée et probablement en contact direct avec les sols où s'élaborent les fortes teneurs en CO₂.



Salle du Petit Lac à Comblain, équipée d'un data logger pour suivre les fluctuations du CO₂.

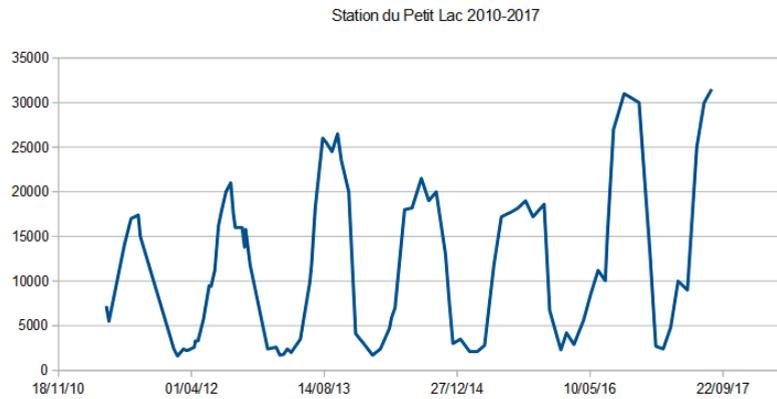


Figure 3. Variations de la pCO₂ de l'air au Petit Lac de la grotte-abîme de Comblain-au-Pont, de 2011 à 2017.

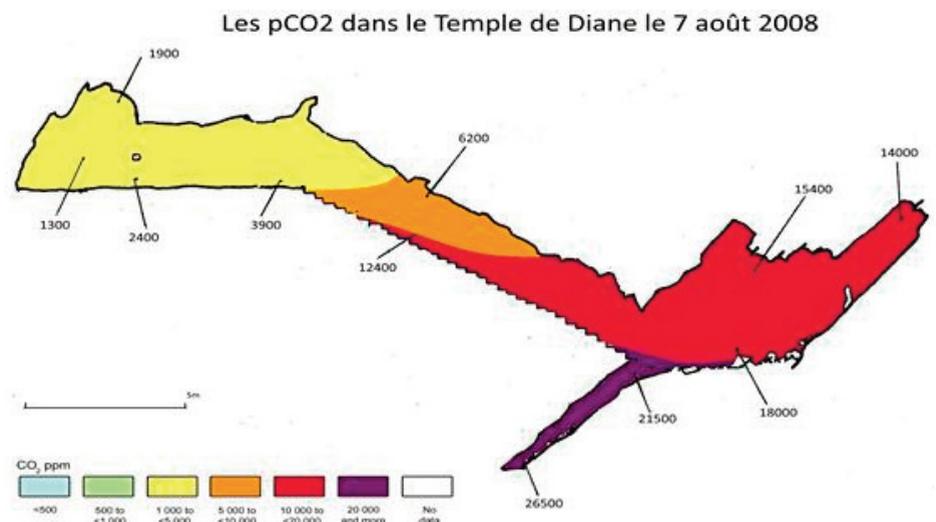


Figure 4. Le flux ascendant du CO₂ dans le Temple de Diane le 7 août 2008.

A partir de ce pertuis, il se produit une stratification du CO₂ qui, partant des valeurs de 26.500 ppm, décroît jusque 2400 ppm à son arrivée dans la galerie touristique (fig. 4, en haut à gauche).

La grotte Merveilleuse possède deux entrées distantes d'une dizaine de mètres en altitude ce qui, pour des températures extérieures de 22°C, induit un courant descendant d'air frais qui dilue fortement le CO₂ et l'entraîne vers la grande salle.

Dans la **grotte de Comblain-au-Pont**, une source de CO₂ fonctionne dans la salle Merveilleuse, non loin de l'extrémité distale de la grotte, à partir d'un puits de quelques mètres encombré de sédiments (flèche rouge n°9 sur la coupe, fig. 5).

Le data logging installé dans la salle Merveilleuse du 11 juillet au 8 août 2013 montre une augmentation régulière des pCO₂ de 20.090 à 27.810, soit 280 ppm/jour, ce qui donne la mesure de l'augmentation journalière du CO₂ en période chaude.

Le data logging du 12/06/2014 au même endroit montre les fluctuations diurnes de la pCO₂ entre 20.000 et 30.000 ppm (fig. 6).

Les variations de la pression atmosphérique peuvent également provoquer des échanges gazeux à l'intérieur du karst, comme le montre le data logging du 14/12/2012 au 10/01/2013 (fig. 7).

Dans le cas présent, la chute des pressions atmosphériques de l'ordre de 20 hPa en 24 heures provoque un appel d'air de la grotte vers l'extérieur ; ce flux sortant aspire à son tour un air confiné dans la grotte vers l'atmosphère libre de 8000 ppm qui décroît lentement pour retrouver sa valeur initiale au bout de 15 jours (fig 7 – Godissart & Ek, 2013).

Nous pensons que cette longue période de récupération à caractère exponentiel est due au fait que dans cette partie distale de la grotte, l'atmosphère est pratiquement statique et que la diffusion seule intervient.

Grotte-abîme de Comblain-au-Pont (coupe Est-Ouest)

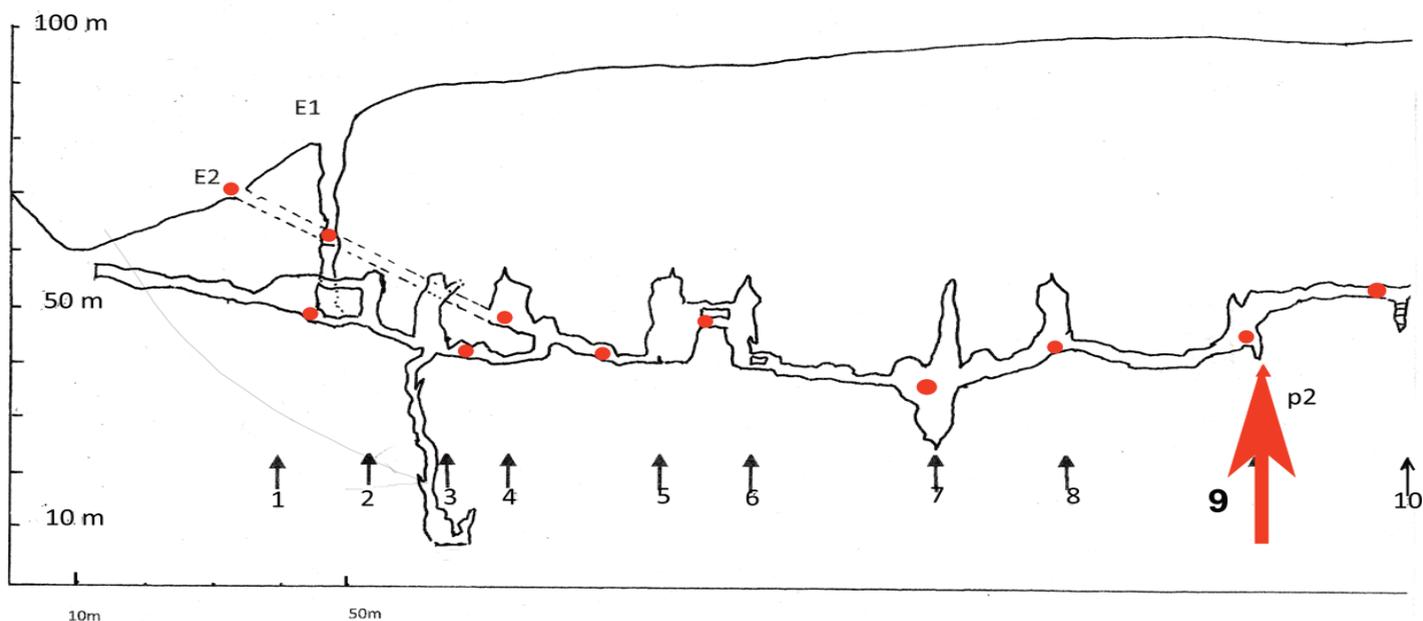


Figure 5. Coupe est-ouest de la grotte-abîme de Comblain-au-Pont. Les points rouges indiquent les stations de mesure (T° et pCO_2). Les flèches verticales correspondent aux différentes salles.

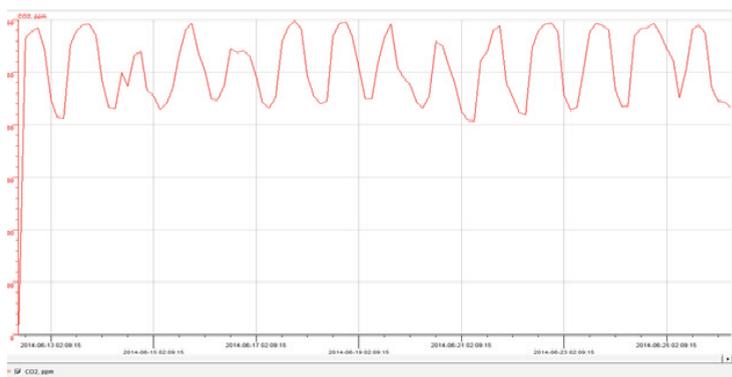


Figure 6. fluctuations journalières enregistrées sur le data logging du 12 juin 2014 placé dans le puits de la salle Merveilleuse.

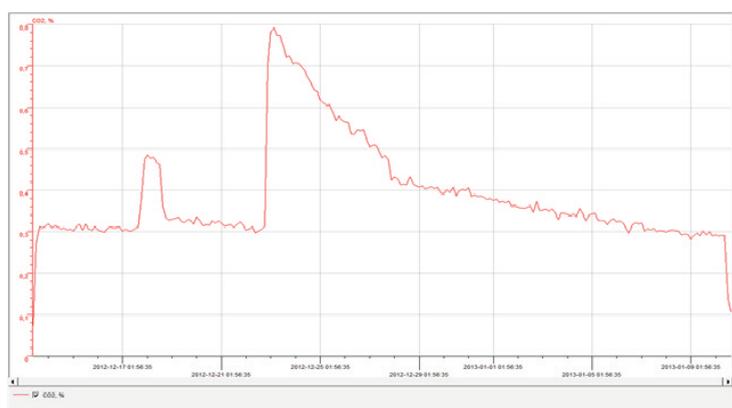


Figure 7. Les effets d'une chute de pression atmosphérique sur les échanges gazeux. Mesures réalisées entre le 10/12/2012 et le 09/01/2017 (1 mois).

3. Discussion

3.a D'où vient le CO2 des grottes?

L'origine du dioxyde de carbone que nous mesurons sous terre est complexe (Ek & Godissart, 2013). L'atmosphère libre, en surface, en comporte seulement 400 ppm ; or, nous trouvons sous terre des teneurs jusqu'à 50 fois plus élevées, parfois davantage.

Nous soupçonnons depuis longtemps que l'origine de ce gaz est à chercher dans le sol, entre la surface et les cavités souterraines (Ek, 1979; Ek & Gewelt, 1985). Mais il s'agissait d'une induction seulement tirée notamment du synchronisme du rythme du CO2 avec le rythme des saisons

3. b Les isotopes du carbone pour démontrer l'origine biologique du CO2

La composition isotopique du carbone, notée delta 13C et correspondant à la proportion des différents isotopes stables ($^{13}C/^{12}C$) du carbone dans l'atmosphère étudiée de la grotte de Comblain a été effectuée entre octobre 2012 et décembre 2013 par Sophie Verheyden.

Comparée à celle dans l'air du sol au-dessus de la grotte, les mesures démontrent que le CO2 a quasiment la même origine : il provient dans les deux cas de la respiration des plantes et des bactéries et de la décomposition de la matière organique (feuilles, branches, plantes...).

La concentration du CO2 dans l'air de la grotte et l'air du sol suivent la même dynamique saisonnière et suggèrent donc que le CO2 de la grotte provient du CO2 du sol qui descend lentement (par diffusion et/ou par dégazage de l'eau de percolation) pour arriver environ 1 mois et demi plus tard dans la grotte, vu l'épaisseur des terrains à traverser (fig 8).

Par contre, le delta 13C du CO₂ dans le sol montre un changement saisonnier alors que celui du CO₂ de la grotte reste assez constant toute l'année. Nous faisons l'hypothèse que le CO₂ dans la grotte est influencé (et homogénéisé dans sa composition isotopique) par un effet piston : le CO₂ descendant 'pousse' le CO₂ des microfissures dans la grotte, tout en se mélangeant, ce qui 'lisse' le signal saisonnier.

On peut également imaginer qu'une autre source organique vienne se mélanger à celle du sol dans la grotte (fig 9).

Récemment, des chercheurs se sont rendu compte que l'épikarst peut renfermer une quantité importante de matière organique. Le CO₂ se libère de cette masse organique bien plus tard que le CO₂ du sol, ce qui expliquerait les âges parfois élevés du CO₂ de la grotte et les retards de réponse du delta 13C dans les courbes paléoclimatiques (Wong et Breecker, 2015). La connaissance de la réserve de matière organique 'stockée' dans l'épikarst est importante mais n'est pour l'instant pas prise en compte dans les calculs de stocks mondiaux de CO₂.

Imaginons qu'un type de climat pourrait libérer d'un coup tout le CO₂ stocké dans l'épikarst sous forme de matière organique (un peu comme la libération accrue du CO₂ lié au permafrost), cela aurait une influence certaine sur le changement climatique. C'est pourquoi il est primordial d'avoir une idée de l'importance de ce 'stock'.

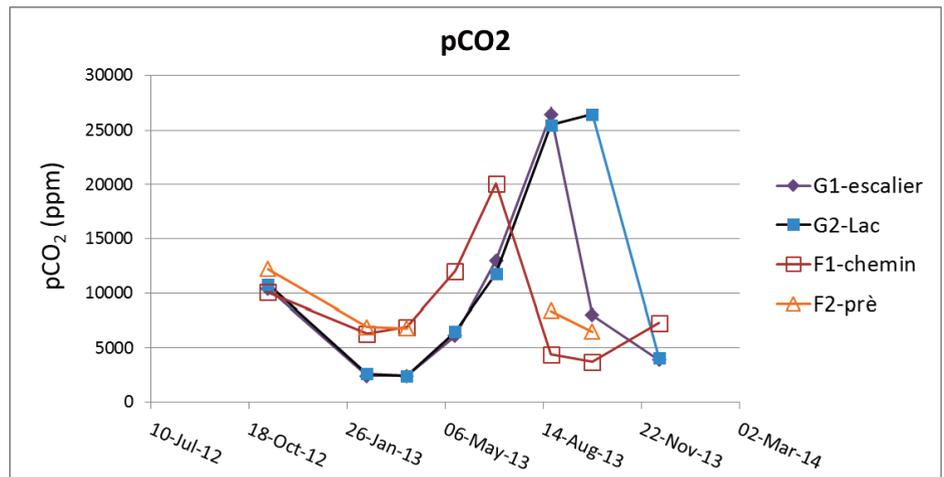


Figure 8. Evolution de la concentration en CO₂ dans le sol au-dessus de la grotte et dans la grotte de Comblain-au-Pont entre octobre 2012 et décembre 2013. La concentration de CO₂ dans l'air de la grotte a été mesurée à hauteur de l'escalier de la Salle de la Cascade et dans la Salle du Petit lac. La concentration de CO₂ dans l'air du sol a été mesurée au-dessus de la grotte dans une zone boisée de feuillus (F1-chemin) et dans un pré (F2-pré). Les courbes montrent toutes un signal saisonnier. L'augmentation de la concentration dans la grotte montre un retard de 1,5 mois par rapport à l'augmentation dans le sol.

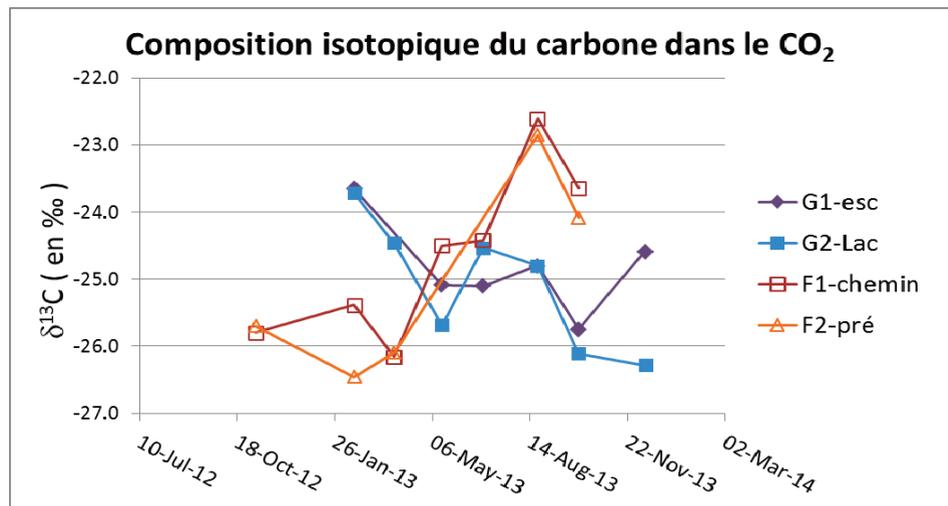


Figure 9. Evolution de la composition isotopique du carbone dans le CO₂ de l'air de la grotte et de l'air du sol au-dessus de la Grotte de Comblain-au-Pont entre octobre 2012 et décembre 2013. Là où la composition isotopique du carbone de l'air du sol montre un signal saisonnier clair, le signal saisonnier est nettement moins marqué dans l'air de la grotte.

3.c Pourquoi de si fortes variations saisonnières ?

L'activité de la biomasse, et particulièrement de la végétation, est évidemment plus forte au printemps et en été, en fonction de la durée de l'ensoleillement et de la température. La décomposition de la matière organique augmente en fonction des mêmes facteurs. Ceci explique que le maximum de teneur de l'air souterrain en CO₂ se place en été, mais généralement avec un léger retard par rapport au maximum de l'activité végétale.

Il serait intéressant de réaliser des mesures similaires de CO₂ dans des cavités de haute altitude (niveau alpestre), avec des sols dépourvus de végétation (au moins arborescente), pour voir si les fluctuations saisonnières y sont tout aussi marquées ou si le CO₂ est plus stable, comme celui de l'atmosphère.

3.d Pourquoi une augmentation des teneurs en CO₂ au fil du temps ?

La température moyenne de l'air est, en Belgique, en légère augmentation, de l'ordre de 1°C durant le 20^e siècle.

Dans les conditions actuelles et sous nos latitudes tempérées, ceci est de nature à favoriser la végétation. Le CO₂ de l'atmosphère libre augmente, lui aussi ; la teneur de l'air atmosphérique en dioxyde de carbone était de 300 ppm en 1900 et de 400 ppm en 2010. Cette hausse est également un facteur favorable à la végétation qui utilise le CO₂ pour la photosynthèse.

Ces deux paramètres entraineraient dès lors une hausse des dégagements de CO₂ dans le sol. Les parties vertes des plantes consomment le CO₂ de l'air. Mais dans le sol, sous la surface, il n'y a pas de chlorophylle, pas de photosynthèse. Au contraire, les racines dégagent du CO₂ en respirant, de même que la microflore et la microfaune et toute la biomasse du sol et son importante fonction de décomposition.

Dans le sol, la teneur en CO₂ augmente donc au fil des années ; ce gaz diffuse en partie vers le haut et l'air libre, et en partie vers le bas, notamment vers les grottes.

Conclusion et perspectives

Sur base de 50 années de mesures de CO₂ dans l'air d'un certain nombre de cavités en Belgique, on peut dire que :

- Il y a plus de CO₂ dans les grottes étudiées qu'à l'air libre ; surtout en été, ou cette concentration peut être 10 à 50 fois plus importante, voire davantage.
- La pCO₂ des grottes est en nette augmentation. Cette augmentation n'est pas linéaire mais néanmoins incontestable. Elle est beaucoup plus importante que celle qui est constatée (et richement documentée) dans l'atmosphère (Ek & Godissart, 2009).
- Dans les grottes étudiées, une relation a pu être établie entre l'augmentation estivale de la pCO₂ des grottes et celle de l'air du sol. Celle-ci la précède de quelques jours à quelques semaines, selon l'épaisseur du sol et la morphologie de la cavité influençant les flux d'air, les zones d'échanges sols/grottes et leur intensité.

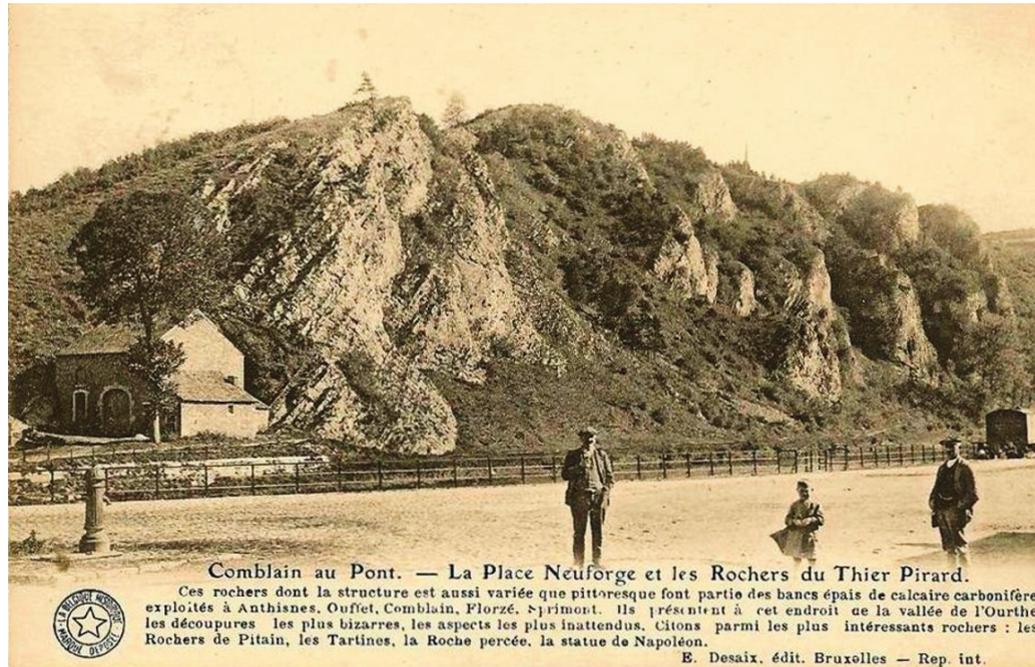
Nous pensons que l'augmentation progressive de la teneur en CO₂ de l'air souterrain est liée à l'augmentation du développement de la végétation, particulièrement de la flore arborescente. Sous nos latitudes, l'augmentation de la température ambiante, tout comme le CO₂ atmosphérique (entrant dans le processus de photosynthèse) sont favorables à la croissance végétale.

Le CO₂ en lui-même n'est pas dangereux pour l'organisme, mais sa prolifération se fait au détriment de l'oxygène dans l'air. Une augmentation notable du CO₂ dans un environnement confiné peut dès lors provoquer une sensation d'essoufflement.

C'est le cas pour certaines « cavités sauvages » (en Ardèche par exemple), où les spéléologues ont pris pour habitude de descendre avec des détecteurs de gaz pour vérifier la concentration en oxygène avant toute exploration. Il semble que ces cas soient de plus en plus fréquents et qu'ils ne concernent plus seulement les grottes dans le sud, mais également des cavités dans le Jura ou le Doubs.

Quelques cas de manque d'oxygène sont également signalés dans des cavités belges (observations à la Laide Fosse – Rochefort), mais cette situation reste ponctuelle et encore peu documentée.

L'étude du CO₂ dans l'air des grottes, entamée en Wallonie il y a plus de 50 ans, mérite certainement d'être poursuivie pour confirmer la tendance à son augmentation rapide mise en évidence jusqu'à présent, et pour en établir les causes.



Rochers du Thier Pirard en bordure de l'Ourthe, face à Comblain. Les deux photos prises sous le même angle témoignent de la croissance de la végétation entre le début du 20e siècle (photo du haut) et 2010 (photo V. de Waleffe).

Le recours plus systématique à des data loggers, permettant des enregistrements sur de plus longues périodes et plusieurs fois par jour, offre bien des avantages, tant en terme de main d'œuvre que de données récoltées. Une amélioration du système de pompe et d'alimentation électrique devrait permettre d'en augmenter l'autonomie ; pouvoir programmer un cycle sur un an de prélèvements serait évidemment l'idéal.

Actuellement, les données analysées par nos soins proviennent essentiellement de 3 réseaux karstiques, qui ont chacun leurs particularités. Si le cycle saisonnier de

fluctuation du CO₂ et la tendance générale à une augmentation sont observés dans les 3 réseaux, les concentrations maximales et la répartition des « poches de CO₂ » dans chacune de ces grottes diffère passablement. Il est évident qu'un plus grand nombre de mesures, provenant d'un nombre croissant de sites, serait riche en renseignements pour mieux appréhender l'impact possible du milieu souterrain et de « son CO₂ » (ainsi que du carbone stocké dans l'épikarst) sur les échanges et la composition de l'atmosphère.

Nous pensons que ces mesures devraient être généralisées au moins dans toutes les grottes touristiques du pays (ces cavités étant alimentées électriquement, le système de mesure pourrait être placé sur secteur et fonctionner en pleine autonomie).

Ces mesures permettraient de s'assurer que les valeurs-seuil (minimum d'oxygène) ne sont pas atteintes en période maximale de tourisme... qui correspond avec celle des pics de CO₂. Il ne faut pas négliger l'effet des visiteurs eux-mêmes (consommateurs d'oxygène et producteurs de CO₂), dans un environnement confiné comme une cavité.

Par ailleurs, la communauté spéléologique pourrait être associée pour réaliser des mesures plus ponctuelles dans une série de cavités ou de réseaux « sauvages », afin de mettre en évidence des zones à concentrations maximales où une certaine prudence serait recommandée. Les zones les plus « sensibles » pourraient à leur tour être équipées en appareils de mesure automatiques pour affiner le suivi de ces « sentinelles du CO₂ » dans le milieu souterrain de Belgique.

Camille Ek, Jean Godissart & Sophie Verheyden

Remerciements: Toute notre reconnaissance à Laurence Remacle pour son aide efficace dans la présentation de l'illustration.

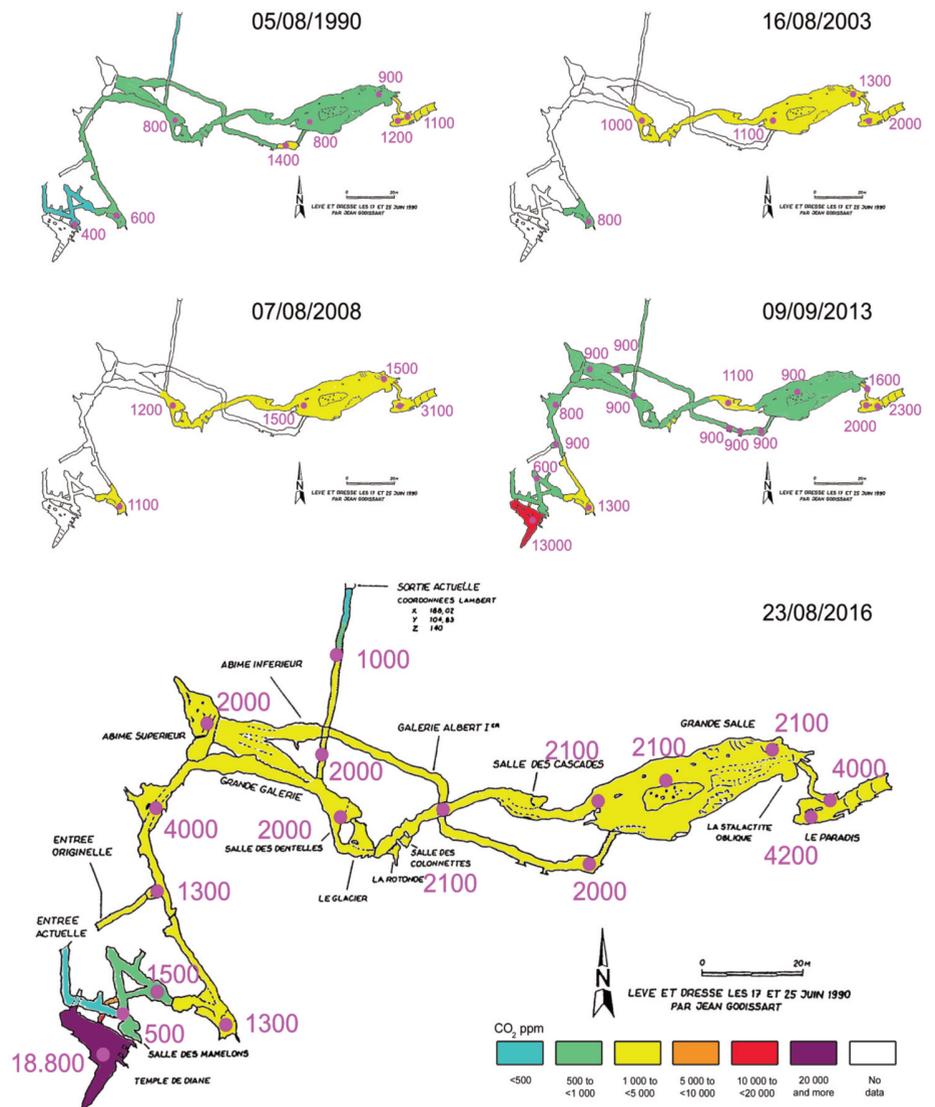


Figure 10. Le report des valeurs de CO₂ à la La Merveilleuse, à Dinant pour 5 dates de références illustre la tendance générale à une augmentation. Croissance constatée de la teneur de l'air en CO₂ mesurée en été en différents points de référence dans la cavité et sur une période de 35 ans : le 5 août 1990, le 16 août 2003, le 7 août 2008, le 9 septembre 2013 et le 23 août 2016.

Ouvrages cités

- EK C., 1979. Variations saisonnières des teneurs en CO₂ d'une grotte belge : le Trou Joney à Comblain-au-Pont. *Annales de la Société géologique de Belgique*, 102 : 71-75.
- EK C. & GEWELT M., 1985. Carbon dioxide in cave atmosphere : new results in Belgium and comparison with some other countries. *Earth Surface Processes and Landforms*, 10 : 173-187.
- EK C. & GODISSART J., 2009. Extreme Increase of CO₂ in Belgian Caves. *International Congress of Speleology Proceedings, Kerrville, Texas*, 1467-1473.
- EK C. & GODISSART J., 2013. Karst et CO₂. Le transfert de CO₂ dans le synclinal de Comblain-au-Pont. *Eco Karst*, 92:1-5.
- GODISSART J. & EK C., 2009. Crue du gaz carbonique dans l'air des grottes. *Eco Karst*, 76 : 1-4.
- GODISSART J. & EK C., 2013. Air CO₂ in Comblain-au-Pont Cave. Relationships with Soil CO₂ and Open Air Meteorology. *International Congress of Speleology Proceedings, Brno*, vol. 2, 400-405.
- WONG C. & BREECKER D.O., 2015. Advancements in the use of speleothems as climate archives. *Quaternary Science Reviews*, 127:1-18.

LE DOUBLE SYSTÈME KARSTIQUE DE L'ISBELLE (HOTTON)

ou comment prouver une hypothèse hydrogéologique par la simple observation

L'Isbelle est un ruisseau qui se jette dans l'Ourthe un peu en amont de l'agglomération de Hotton. A 2,5 km en amont de cette confluence, au sud du hameau de Mélines, le ruisseau aborde les roches calcaires de la Calestienne et y subit, de façon assez classique, des pertes dans son lit qui absorbent ses eaux au fur et à mesure de leur avancée sur le calcaire (photo 1).

Ce qui caractérise ce système karstique est la présence, à l'aval du système, de deux résurgences proches mais bien distinctes autant par leur aspect que par leurs régimes et débits respectifs.

La Résurgence de l'Isbelle est à flanc de rive gauche de celle-ci, au pied du versant et à quelques mètres de la confluence avec l'Ourthe (photo 2). Elle est intermittente, plus souvent à sec qu'active mais après d'importantes précipitations, son débit peut vite devenir important et facilement atteindre le mètre cube. La Fontaine de Thot se situe quant à elle à une centaine de mètres de la résurgence, dans la vallée de l'Ourthe, au pied de son versant en rive droite (photo 3). Elle est pérenne avec un débit moyen hors crues relativement faible allant de quelques litres à quelques dizaines de litres. Ci-après j'en parlerai respectivement comme la Résurgence et la Fontaine.

Ces deux résurgences proches et manifestement alimentées par les eaux du même ruisseau en amont posent évidemment question. Est-on en présence d'une diffluence, d'un trop-plein de l'une par rapport à l'autre ou de deux émergences distinctes ?

En son temps, Richard Grebeude qui a arpenté cette zone en tout sens, était plutôt partisan de cette dernière option (1998 & 2003), avançant même l'hypothèse d'une double circulation et donc de deux rivières souterraines distinctes.



Photo 1 : L'Isbelle à hauteur d'une de ses pertes principales

Pour étayer cette hypothèse, il se basait sur l'existence de deux failles parallèles fonctionnant comme des drains et permettant l'infiltration suivant deux axes distincts d'une partie des eaux de surface. Mais ce n'était là qu'une hypothèse puisque les failles invoquées par Richard ne figurent pas sur la carte géologique (que ce soit l'ancienne version de 1898 de Stainier, ou la nouvelle de 2003 de Dejonghe & Hance).

Première approche

En 2004 je décide d'entreprendre une étude systématique du karst de l'Isbelle pour essayer de comprendre son fonctionnement hydrogéologique. En parallèle à une prospection systématique pour dresser un inventaire exhaustif de l'ensemble des phénomènes karstiques dans ce petit bassin, j'ai fait une observation régulière du régime des eaux et du fonctionnement des différentes pertes et des deux résurgences.

J'ai ainsi pu différencier les pertes diffuses des eaux dans le lit même du ruisseau, qui sont présentes tout le long de celui-ci quasi jusqu'à la confluence avec l'Ourthe, d'une série de pertes bien marquées quasi toutes situées à l'amont du système et, pour la plupart, au pied des versants de la vallée, au contact de la roche en place. J'en ai également profité pour donner un nom à ces pertes marquées qui sont souvent citées dans la littérature mais sans jamais être précisément positionnées et encore moins nommées.

Une simple observation dans le temps montre que lorsque le débit de l'Isbelle augmente significativement, suite à de

fortes pluies par exemple, la Résurgence se met en charge relativement rapidement; à l'inverse, lorsque la décrue assèche le ruisseau, elle se tarit aussi rapidement. Dans le même temps on note aussi une montée et une descente du débit de la Fontaine mais de manière moins significative. Cette particularité est due à la courte longueur du cours aérien de l'Is-

belle, 14km, et la faible surface de son bassin versant, environ 17 km², qui en fait un système très en phase avec les conditions climatiques. Cela a pour conséquence qu'en-dessous d'un certain débit toute l'eau se fait absorber par les pertes, asséchant ainsi le lit en aval. Plus le débit diminue, plus le "front" de l'eau recule dans la vallée.



Photo 2 : la Résurgence de l'Isbelle en période de grandes eaux

Ce fonctionnement très réactif m'a fait, dans un premier temps, douter de la théorie de Richard et, comme d'autres avant moi, je penchais plutôt pour un trop-plein qui s'écoulerait par la résurgence de l'Isbelle. Toutefois, constatant qu'à chaque période de hautes eaux, le débit sortant de la Résurgence devient très vite largement supérieur à celui de la Fontaine, l'hypothèse du trop-plein ne me semblait plus tenir la route...

Les observations en surface n'apportaient donc guère de solutions à l'énigme hydrologique de l'Isbelle et soulevaient plutôt d'autres interrogations et questions.

Il aurait fallu utiliser d'autres techniques comme les traçages ou l'exploration directe des réseaux souterrains.

La solution

On aurait pu pendant longtemps en rester là, à supputer des hypothèses incertaines si deux faits importants ne s'étaient produits.

Le premier, majeur, est la **découverte de la grotte de l'Isbelle** (photo 4). Réalisée en septembre 2007 par le Spéléo Club de Belgique, elle a permis l'exploration de plus d'un kilomètre de galeries dont une rivière souterraine qui, manifestement, est bien le collecteur principal. Au-delà de la découverte spéléologique, l'exploration de ce réseau a permis de se rendre compte de la façon dont circulent les eaux sous terre.



Photo 4 : Exploration de la grotte de l'Isbelle, par les membres du SCB.

Je ne disposais pas des moyens pour réaliser un traçage et, à l'époque, le seul accès au réseau souterrain était la Résurgence. Celle-ci avait été plongée ; après le franchissement de deux siphons successifs, on accède à une galerie exondée où coule la rivière souterraine et qui se termine sur un troisième siphon, le tout s'étendant sur plus de 300 m (De Block, 1965 – Devos & Masschelein, 1983).

Ces plongées étaient certes un bel exploit spéléologique mais elles n'apportaient guère de réponses à notre problème vu qu'on est en présence d'une galerie unique sans diffluence apparente vers la Fontaine.

En effet, dans la cavité on évolue dans de longues galeries rectilignes nettement plus hautes que larges, creusées aux dépens des strates qui sont ici redressées quasi à la verticale (photo 5). Même si des déviations latérales se marquent de temps à autre à hauteur de failles ou de diaclases, l'orientation générale de la cavité est très rectiligne et suit la stratification (fig. 1). L'écoulement des eaux dans le sens de la stratification était, enfin, un nouvel indice pour résoudre l'énigme.

Le second et décisif élément qui allait me donner la clef fut une simple observation tout à fait fortuite de **perdes dans le lit du ruisseau**. Un jour de 2008, remontant la vallée de l'Isbelle en partant de la Résurgence, j'observais à celle-ci une petite quantité d'eau qui en sortait alors que le ruisseau aérien en amont était à sec. Il me fallut remonter jusqu'à la perte des Sapins (photo 6), c'est à dire quasi à l'amont du système, à 300 m de la limite des calcaires, pour retrouver l'eau de surface qui s'y perdait entièrement (fig. 1).

La quantité d'eau était faible et correspondait à vue d'œil à ce qui sortait de la Résurgence. En remontant encore le cours d'une septantaine de mètres j'arrivais à la perte du Talus (photo 7) où le débit absorbé était plus important (fig. 1).

Cette perte à la particularité de se trouver dans un lit composé d'un mélange des galets du ruisseau et des colluvions issues du talus qui la surplombe et qui a pour



Photo 3 : la Fontaine de Thot en crue, en janvier 2011, suite à la fonte des neiges.

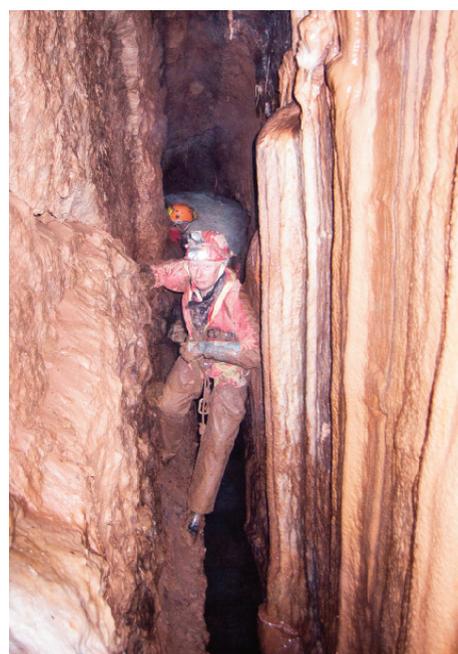


Photo 5 : Le réseau de galeries nettement plus hautes que larges dans la grotte de l'Isbelle, formées au détriment de la stratification verticale.

effet de faire "chanter" l'eau qui s'insinue à travers les cailloux... et donner l'irrésistible envie à tout spéléologue d'essayer de suivre le chemin de l'eau vers une improbable cavité souterraine !

C'est ce que je fis ce jour-là : à force de creusement et d'élargissement toute l'eau du ruisseau fut absorbée dans ce trou unique qui, malgré mes efforts, resta strictement impénétrable à l'humain que je suis.

J'avais donc complètement asséché le lit en aval ; plus une goutte ne rentrait dans la perte des Sapins, comme je pus le constater ayant rebroussé chemin.

Quelques heures plus tard, en repassant par la Résurgence de l'Isbelle, quelle ne fut pas ma surprise de constater que plus aucune eau n'en sortait, que seule subsistait une grande flaque sans courant à l'entrée de la cavité ! Cet assèchement aussi soudain semblait très étrange au vu de la quantité d'eau qui rentrait dans la perte du Talus.

Mais assez rapidement l'idée me vint que c'était peut-être moi qui avait fermé le robinet en empêchant les eaux d'atteindre la perte des Sapins et que j'avais ainsi trouvé, enfin, la solution de l'énigme recherchée depuis si longtemps. Il restait toutefois un sérieux bémol : comment expliquer ce temps de réaction et d'assèchement si rapide ?

Avec quasi 2 km entre les pertes et la Résurgence, il ne s'était passé que 3 à 4 h entre l'assèchement de la perte et mon retour à la résurgence. Or les temps de passage des eaux souterraines sur une telle distance, comme le démontrent les traçages, sont généralement beaucoup plus longs. Je restais donc sceptique quoiqu'heureux d'avoir une première explication plausible à la genèse des deux systèmes.

Le seul moyen pour vérifier cette hypothèse était de multiplier les observations et de venir voir les pertes et la résurgence le plus souvent possible et à des régimes des eaux différents.



Photo 6 : la perte des Sapins (entaillant la rive droite de l'Isbelle) en hiver - régime de hautes eaux.

Au fil des mois, je constatais que tant que les eaux du ruisseau n'allaient pas plus loin que la perte du Talus, la Résurgence était à sec, tandis qu'une fois qu'elles allaient au-delà et atteignaient la perte des Sapins, elle se mettait en charge. Chaque fois que j'ai fait ces observations, le résultat est toujours le même, sans exception.

En parallèle, je parlais de mon hypothèse à Yves Dubois, géologue, et membre à l'époque de mon club spéléo, le SCB. Il me renseigna alors la présence d'un **banc de schiste** (roche non soluble pouvant fonctionner comme une barrière hydrologique - photo. 8), qu'il avait repéré non loin des deux pertes, entre les bancs calcaires.

Cet étroit banc de schiste pourrait ainsi expliquer la différenciation des systèmes : les eaux rentrant sous terre d'un côté du banc ne peuvent plus rejoindre celles de l'autre côté, séparées par la roche imperméable.

Je disposais donc à ce moment de plusieurs éléments concordants pour étayer la thèse d'une double circulation souterraine, dont la clef résidait dans la stratification. En arrivant sur les roches calcaires, l'Isbelle les traverse de part en part, en s'y perdant progressivement de strates en strates. Les eaux des différentes pertes se rejoignent sous terre pour former un ruisseau souterrain qui passe par la grotte de l'Isbelle et résurge à la Fontaine de Thot. Au-delà d'une certaine limite, probablement due à la strate schisteuse, les pertes plus en aval se rejoignent également sous terre pour former une seconde rivière souterraine, parallèle à la première et qui elle, ressort à la Résurgence.

Il ne restait plus qu'à orchestrer tout cela ensemble. Comme un dessin vaut mieux qu'un long discours, je m'attelais à la réalisation d'une carte de la zone des pertes et de la grotte. Ayant observé sur le terrain la constance de l'orientation de la stratification, le report de celle-ci sur la carte rendit les choses très claires. Sur cette carte (fig. 1), les lignes continues indiquent le sens de la stratification et la ligne pointillée passe sur l'affleurement visible de schiste, constituant la limite théorique entre les deux systèmes.



Photo 7 : la perte du Talus bien visible aux pieds de David qui est face au talus de colluvions.



Photo 8 : En bordure du chemin forestier en rive gauche du ruisseau un peu en aval du Trou du Talus, le terrain retrouvé par l'arrachage d'une souche laisse voir des paillettes de schistes caractéristiques.

On voit ainsi que les pertes des Strates et du Talus et la grotte de l'Isbelle sont à l'Est de cette ligne, tandis que les pertes des Sapins et des Racines sont à l'Ouest.

J'avais enfin une hypothèse plausible pour expliquer l'existence du double système

karstique et ainsi donner raison à Richard. La seule différence était que ce n'est pas la fracturation (les failles), qui en serait la cause mais bien la stratification avec un étroit banc de schiste qui détermine le compartimentage des écoulements souterrains.

La confirmation

Même si elle semblait maintenant quasi certaine, cette hypothèse restait toujours théorique, résultant de l'interprétation d'observations de terrain. A nouveau, on aurait pu en rester à ce stade encore longtemps si, heureusement, une preuve concrète n'était venue la confirmer.

En 2010 je parvins, via Isabelle Bonniver et à une visite sur place avec lui, à convaincre Vincent Hallet, responsable du département de Géologie de l'Université de Namur d'effectuer une étude et des traçages dans le système karstique de l'Isbelle. Il confia alors cela comme travail de fin d'étude à un étudiant, Arnaud Sterck.

Aidé de Gaëtan Rochez, technicien du département et éminent spéléologue, ils effectuèrent en août 2010 un premier traçage à partir de la perte des Sapins, en plaçant des capteurs aux deux émergences. Après 2h à peine, le traceur fut détecté à la Résurgence et ce pendant encore 14h avec un pic de restitution après 3h. A la Fontaine, par contre, rien ne fut détecté (Sterck, 2012).

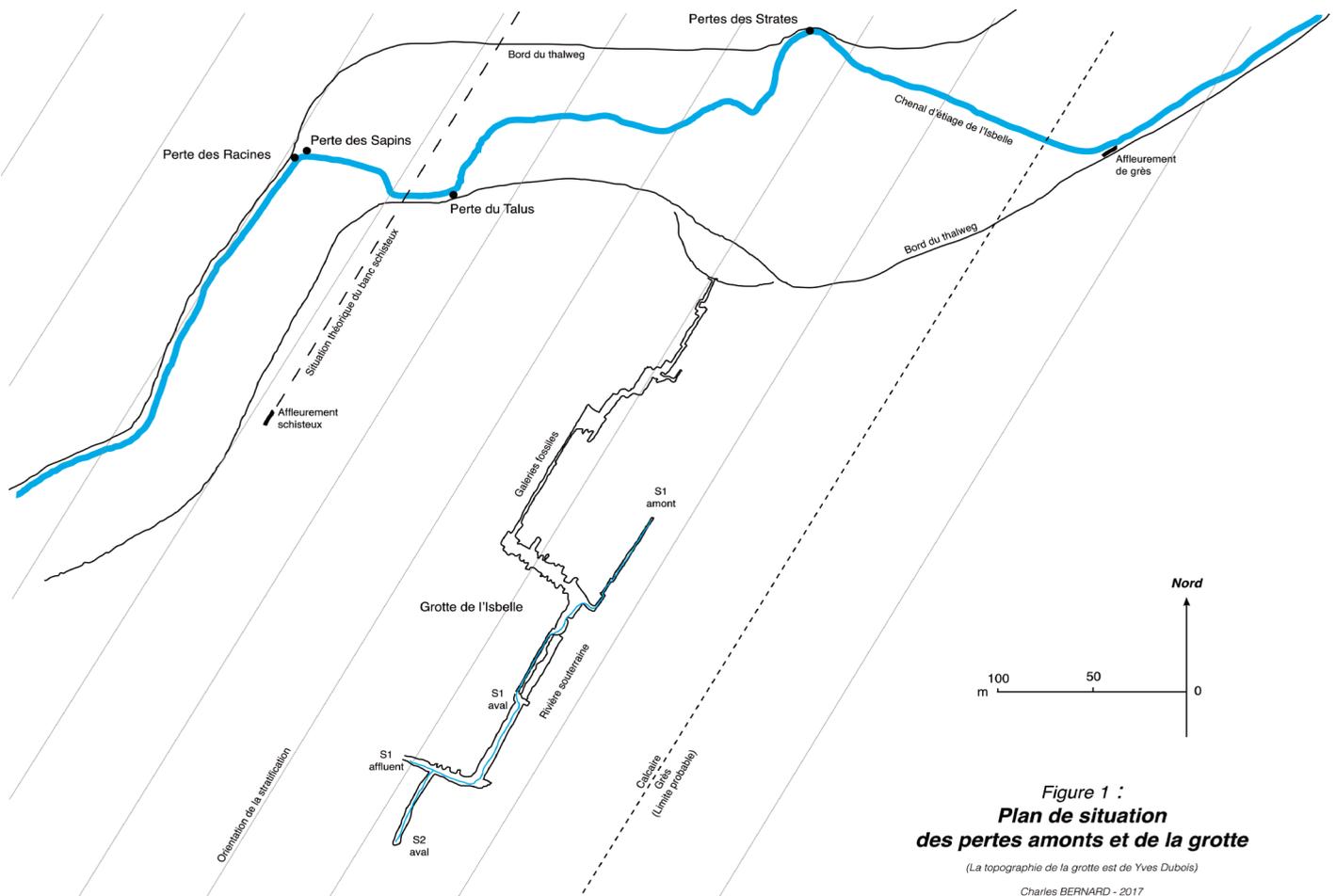


Figure 1 : Plan de situation des pertes amonts et de la grotte

(La topographie de la grotte est de Yves Dubois)

Charles BERNARD - 2017

Cette excellente nouvelle, en montrant que les eaux d'un système ne passaient pas dans l'autre, était la preuve matérielle de l'existence de deux rivières souterraines, et donc de deux systèmes karstiques distincts.

L'hypothèse devint enfin une certitude ! Au passage, ce traçage confirma le temps de transfert rapide des eaux, que j'avais observé pour la première fois deux ans plus tôt. Deux autres traçages en relation avec la Fontaine furent également effectués à l'étiage. La résurgence étant alors à sec, ils ne permirent pas d'établir d'autres corrélations entre les deux systèmes.

Conclusion

Une observation minutieuse et régulière dans le temps d'un système karstique permet de construire des hypothèses sérieuses et plausibles quant à la circulation des eaux sans devoir déployer des moyens techniques coûteux et laborieux à mettre en œuvre.

Charles BERNARD
Spéléo Club de Belgique

Perspectives d'avenir

La façon dont fonctionnent ces deux systèmes et les observations directes et indirectes ont également permis d'émettre d'autres hypothèses, par exemple concernant l'existence plus que probable de réseaux souterrains. En effet les chances sont grandes qu'il existe d'autres galeries accessibles à l'homme que celles de la grotte de l'Isbelle ou de la Résurgence. Deux exemples.

Dans la grotte, la rivière reçoit un affluent qu'on ne sait remonter que sur quelques mètres et terminant sur un siphon qu'on n'a pas encore réussi à franchir à ce jour. Mais nos observations ont montré que cet affluent est alimenté par la perte du Talus. Lorsque les eaux de l'Isbelle aérienne n'arrivent pas à cette perte, l'affluent dans la grotte ne coule pas mais dès que la perte est active, l'affluent se remet en charge. Lorsqu'on regarde la figure 1 et particulièrement la perte du Talus et le siphon S1 affluent, on peut facilement imaginer entre ces deux points une deuxième grotte de l'Isbelle parallèle à la première.

Et à quelques dizaines de mètres de là, entre la perte des Sapins et la résurgence de l'Isbelle, le spéléologue rêveur, partant du même principe, imagine également de longues et belles galeries où les eaux souterraines circulent librement en seulement 3 heures sur presque 2 km.

Il n'est donc pas rare de voir ces mêmes spéléos, plutôt armés de pelles, pioches et seaux que de cordes, mousquetons et bloqueurs, parcourir la jolie vallée de l'Isbelle en quête du Graal souterrain.

L'évolution des pertes

Dans cet article, je ne cite que quelques pertes marquées parmi la dizaine existante. Il en existe donc d'autres dont certaines ne fonctionnent que très occasionnellement, à l'occasion de grosses crues de l'Isbelle. Une de ces pertes de crue est située non loin de la perte du Talus, une douzaine de mètres en amont de celle-ci sur la berge de rive gauche du ruisseau.

Du début de mes observations en 2004 jusqu'en 2016 c'était un effondrement à même le sol, d'environ 1m de profondeur et 1 m de diamètre et qui n'était donc active que lorsque l'Isbelle, à l'occasion de très fortes crues, coulait hors de son lit mineur et envahissait son lit majeur. Mais durant l'hiver 2016-2017, une colonie de castors a construit un barrage sur le ruisseau au droit de la perte du Talus. Cela a eu pour conséquence la formation d'une retenue d'eau, d'un étang, qui a envahi les berges et ainsi alimenté en permanence cette perte de crue en en modifiant la morphologie de la surface qui à l'été 2017 était une longue ravine dans les dépôts meubles (photo 9).

Cette perte qui ne fonctionnait que très occasionnellement toutes les x années, la dernière crue remonte à 2011, s'est donc retrouvée être quasi pérenne suite à l'action des castors. Comme quoi il n'y a pas que l'homme qui modifie l'hydrogéologie...



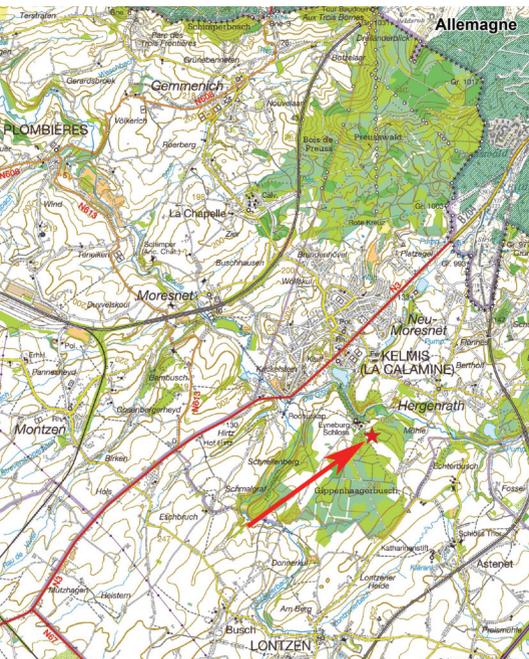
Photo 9: la perte de crue en mars 2017 recevant les eaux de trop-plein du barrage de castor que l'on devine en haut de l'image.

Bibliographie

- DE BLOCK Guy, 1965. Plongées dans la Résurgence de l'Isbelle, Hotton – Hampteau. Bulletin d'Information de l'Equipe Spéléo de Bruxelles n° 22, p. 1 à 4 + 2 topos.
- DEJONGHE Léon et HANCE Luc, 2003. Carte géologique 55/5-6, Hotton-Dochamps.
- DEVOS Stef & MASSCHELEIN Jan. 1983. Résurgence de l'Isbelle, nieuwe rezoo. Speleo Flash n°141 (v.t. 5), p. 4 & 5 + topo hors texte.
- GREBEUDE Richard, 1998. Le monde des grottes et le double système karstique de la vallée de l'Isbelle. Le Héron, revue du Groupe de Découverte (et de Défense) de l'Ourthe Moyenne, n° 70 (2), p. 32 à 36.
- GREBEUDE Richard, 2003. Le double système karstique de la vallée de l'Isbelle. Regards n°49, p. 4 à 8.
- STANIER Xavier, 1898. Carte géologique de la Belgique. N° 178, Hotton – Dochamps.
- STERCKX Arnaud, 2012. Etude hydrogéologique du système karstique de la vallée de l'Isbelle. Mémoire rédigé en vue de l'obtention du grade de Maître en sciences géologiques. Université Libre de Bruxelles, Faculté des Sciences. 106 p.

LE CHANTOIR DE EYNEBURG – LA CALAMINE

Karst sauvé d'un engouffrement sous des tonnes de fumier!



Comme association de protection du karst et grâce à son réseau de collaborateurs et de membres qui arpentent les massifs calcaires de Wallonie, la CWEPPS est en pointe lorsqu'il s'agit de mettre en lumière ou de dénoncer une pollution, un remblaiement ou la destruction d'un phénomène karstique.

Ces constatations transmises aux autorités locales et/ou régionales ne sont hélas pas toujours suivies d'effets et bon nombre de cas de pollutions restent en l'état car il n'est pas toujours simple juridiquement de trouver un responsable, de démontrer son implication et de lui imposer une réhabilitation du site. C'est donc avec une satisfaction toute particulière que nous pouvons aujourd'hui revenir sur le cas de la Chantoire d'Eyneburg. Nous avons constaté début 2017 (voir Eco Karst N° 107) que cette vaste dépression était remblayée par un énorme dépôt de fumier. 8 mois plus tard et suite à l'intervention décidée de la commune, le site a été assaini... Un exemple trop rare qui nous redonne espoir pour bien d'autres « points noirs » affectant le karst.

La situation à Eyneburg

Tout à l'est de la Belgique, à quelques kilomètres de la frontière allemande, la chantoire d'Eyneburg est nichée à la lisière d'un bois, tout près du château d'Eyneburg (Akwa : 43/2-038). Elle a été visitée et topographiée par les spéléos en 2005 (Polrot & Dumoulin, 2006). Cette petite grotte-perte s'ouvre au fond d'une doline de 8 m de profondeur et absorbe un ruisseau débitant quelques décilitres par seconde. Elle est constituée d'un porche de 3 m sur 4 m suivi de deux courtes diaclases parallèles (voir topographie ci-dessous).

Nous avons été confronté début de 2017 à un spectacle désolant : les 4/5 de la dépression de la chantoire de Eyneburg étaient remplis de fumier sur une hauteur d'au moins 6 m par rapport au porche.

Le site ainsi comblé constitue un phénomène karstique actif, une chantoire alimentée par un ruisseaulet.

L'eau du ruisseau disparaissait DANS les tas de fumier pour rejoindre ensuite la grotte.

Déjà en 2013, un petit dépôt de fumier encombrait le côté amont de la chantoire. Mais le dépôt de mars 2017 était énorme et fluait vers l'entrée de la chantoire au risque de totalement colmater celle-ci. De plus, de nombreuses traces « fraîches » laissées par les engins agricoles démontraient que les versements étaient toujours en cours.

Nous avons alerté les autorités sur l'impact négatif de cet important dépôt de fumier, sur l'environnement en général et sur les eaux souterraines en particulier. Nous déplorions plus particulièrement que celui-ci affecte un site karstique (point particulièrement vulnérable quant à l'intégrité des nappes aquifères) et qu'il aboutisse à l'engouffrement d'un des rares sites souterrains pénétrables dans cette zone (Atlas du Karst wallon n° 432-038).

Base légale pour une intervention

Rappelons que la législation wallonne concernant l'aménagement du territoire est assez claire pour les travaux entraînant un remblaiement et/ou une modification du relief du sol. Le CWATUP précise (Titre V Permis & Certificats d'urbanisme / Chap.1 – Sect.1 – Actes soumis à permis d'urbanisme) dans son article 84 : §1er, que "Nul ne peut, sans un permis d'urbanisme préalable écrit et exprès, du collège communal, du fonctionnaire délégué ou du Gouvernement..., 8° – modifier sensiblement le relief du sol".

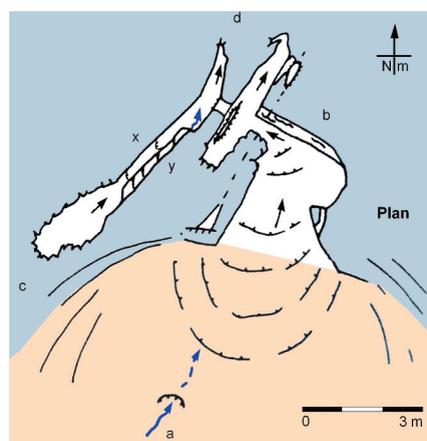
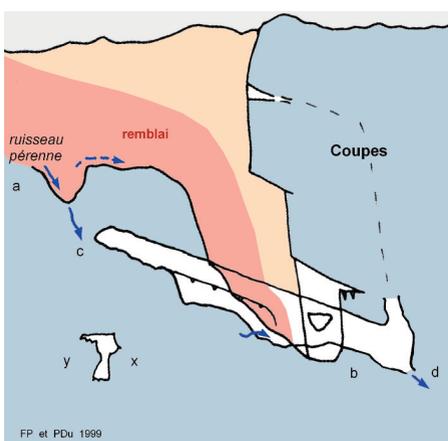
Le caractère sensible de la modification du relief est un élément de fait ; on considère comme sensible :

- une modification de plus de 50 cm (d'épaisseur) ;
- le remplacement d'une pente douce par un dénivelé abrupt d'environ 1 m ;
- fonction aussi de la surface modifiée.

Si le CWATUP a été remplacé depuis juin 2017 par le CoDT, les principes et les règles restent très similaires pour ce qui concerne la modification du relief du sol.

Une belle réactivité

Notre courrier n'est pas passé inaperçu et très vite, Monsieur Günther Havenith du Service d'Urbanisme et d'Environnement de la commune de La Calamine a pris les choses en main, mis en demeure le contrevenant qui, reconnaissant les faits, a accepté que la chantoire soit remise en l'état à ses frais. Comme nous le précise M. Havenith, l'entrepreneur contacté pour effectuer les travaux déclare avoir enlevé +/- 600 m³ de matière.



Coupe et plan de la Chantoire (F; Polrot et P. Dumoulin, 1999), laissant voir le réseau souterrain d'une quinzaine de mètres et le dôme de fumier (en saumon) qui recouvrait l'ensemble.



La grande dépression de la Chantoire d'Eyneburg avant (à gauche) et après (à droite) les travaux de dégageant et de remise en l'état.

Les volumes de fumier et de remblais divers ont été ensuite transférées pour valorisation / traitement vers une aire de compostage industrielle. Ces matières ont été enlevées jusqu'au point de contact avec le sol naturel sous-jacent (limon).

Il reste bien entendu de petites quantités de matière en état de compost avancé qu'on ne peut enlever, faute de mettre en danger l'engin et son pilote.

La chantoire est entièrement dégagée, il faudra maintenant attendre la recolonisation par la végétation pour que le site retrouve son aspect naturel.

Enseignements

Eyneburg est un exemple de "dépollution" rondement mené, qui en réalité ne fait qu'appliquer la loi. Si la CWEPPSS y a quelque peu contribué en « dénonçant » les versages de fumier, c'est le dynamisme de l'agent constatateur de la commune qui a été déterminant. Une solution négociée avec le pollueur (plutôt qu'une longue procédure judiciaire) a permis, aux frais du contrevenant, de réhabiliter le site.

Nous espérons que cet exemple en inspirera d'autres et qu'il ne soit plus l'exception mais s'applique aux actes d'incivilité qui marquent trop souvent les "trous" qu'ils soient d'origine karstique ou pas.

Bibliographie

POLROT F., et DUMOULIN P., 2006. Géomorphologie karstique entre la Hof Huset et Eyneburg (La Calamine, Nord-Est de la Wallonie), Regards n°62, bulletin d'information de la Société Spéléologique de Wallonie, Liège : 12-23.

POLROT, F. 2017. Un karst qui disparaît... Deux exemples (à ne PAS suivre) de remblaiement à La Calamine et à Lontzen. Eco Karst N°107 (mars 2017) : 12-14.

Francis Polrot
Administrateur CWEPPSS

PREHISTORIC CHALLENGE

Le Préhistomuseum vous lance un défi : mesurez-vous à l'homme préhistorique !

Cette exposition, produite en partenariat avec l'Institut royal des Sciences naturelles de Belgique, se déroule jusqu'au 29 juin 2018 au Préhistomuseum de Ramioul. Elle donne une leçon de modestie en faisant découvrir que les hommes préhistoriques avaient déjà les mêmes compétences et aptitudes que les hommes d'aujourd'hui !

Exposition hyper active (+ de 15 manipulations), elle propose aux visiteurs des défis pour évaluer les compétences partagées avec l'homme préhistorique.

Sommes-nous aussi malins qu'un homme préhistorique ?

« Comme nous, répond Fernand Collin, directeur du Préhistomuseum, il pensait, réfléchissait, prévoyait, observait et organisait. Mais sans le vouloir, nous pensons que nous sommes plus évolués que lui !

Nous avons considéré les progrès technologiques comme des indicateurs de civilisation. Pourtant, le dénuement ou la simplicité des techniques n'exclut ni l'intelligence, ni la culture, ni les senti-

ments, ni la pensée, ni même la conscience... ».

Fidèle à son habitude, le Préhistomuseum invite à passer en mode action. Pour se mesurer à l'homme de Néandertal ou de Cro-Magnon, l'exposition Prehistoric Challenge propose ainsi quelques expériences en guise de leçon de modestie. Le visiteur découvre les étonnantes capacités de l'homme et constate qu'il était aussi intelligent à la Préhistoire qu'aujourd'hui !



La confrontation démarre par une partie de Puissance 4 (photo Nelissen)

Dans la salle d'exposition, le public peut tester les outils et les techniques préhistoriques à travers différentes manipulations. Des vidéos et des objets archéologiques remarquables enrichissent les quatre thèmes abordés :

- la taille du silex illustrant l'anticipation,
- le secret de la chasse révélant la notion de stratégie,
- le traitement des peaux et de la couture nécessitant la prévision,
- l'allumage du feu symbolisant la méticulosité.

Dans les ateliers et à l'extérieur: parallèlement à l'exposition, le visiteur explore les 30 hectares du musée en relevant différents défis conçus par le Laboratoire de médiation du Préhistomuseum. Sous la houlette d'un archéologue, chaque tribu s'essaie à l'allumage du feu, à la taille du silex, à la réalisation d'une parure, au tir au propulseur.

En toute liberté, les familles peuvent encore s'amuser avec des jeux modernes (casse-tête, Puissance 4, Mikado, Mölky) qui réveilleront en elles des compétences partagées avec nos ancêtres. L'enjeu sera de taille, et le score de Cro-Magnon, difficile à égaler : il a obtenu 100 %.

Informations pratiques; Préhistomuseum, rue de la Grotte 128, 4400 Flémalle. Tél. : 04/275 49 75, info@prehisto.museum, www.prehisto.museum. Ouvert tous les jours de 10h à 17h.



LA CWEPSS

Secrétariat : av. G. Gilbert 20, 1050 Bruxelles

Tél: 02/647.54.90 - contact@cwepss.org

Siège social: Clos des Pommiers, 26. 1310 La Hulpe

Vous avez entre les mains le quatrième et... dernier numéro de l'Eco Karst pour l'année 2017... Nous espérons que vous continuez à apprécier tant son contenu que la qualité du tirage dans sa version couleur. C'est évidemment l'occasion de **renouveler votre cotisation**, afin de recevoir les 4 prochains numéros en 2018.

La **cotisation annuelle à la CWEPSS**, qui comprend l'abonnement à l'Eco Karst (4 numéros/ an) s'élève à:

- **15 Euros par membre adhérent.**
- **20 Euros** pour devenir **membre effectif** (indispensable si vous souhaitez participer à nos activités de manière plus directe et avoir le droit de vote à l'assemblée générale de l'association).

Vous avez aussi la possibilité d'**effectuer un DON** en faveur de la CWEPSS. Notre association de protection de la Nature et de l'Environnement est agréée pour les **dons exonérés d'impôt**. Une attestation fiscale vous parviendra pour **tout don annuel d'au moins 40€**.

Les montants sont à verser au compte de la CWEPSS:

- IBAN : BE68 0011 5185 9034. / BIC : GEABEBB.

Avec la mention "Don exonéré d'impôts"

Sur le site web de la CWEPSS, vous découvrirez les publications et Atlas du karst en vente.

<http://www.cwepss.org/publication.htm>

Handtekening(en) Signature(s) Unterschrift(en)		OVERSCHRIJVINGSOPDRACHT ORDRE DE VIREMENT ÜBERWEISUNGSaufTRAG	
Bij invulling met de hand, één HOOFDLETTER of cijfer in zwart (of blauw) per vakje. Si complète à la main, 1 majuscule ou une seule MINUSCULE ou un seul chiffre noir (ou bleu) par case. Beim Ausfüllen mit dem Hand ein GROSSBUCHSTABE oder Zahl in schwarze (oder blau) pro Kästchen.		Gewenste uitvoeringsdatum in de toekomst / Date d'exécution souhaitée dans le futur / Gewünschtes Ausführungsdatum in der Zukunft	
Rekening opdrachtgever (IBAN) Compte donneur d'ordre (IBAN) Konto des Auftraggebers (IBAN)		Bedrag / Montant / Betrag EUR CENT	
Naam en adres opdrachtgever Nom et adresse donneur d'ordre Name und Adresse des Auftraggebers		68806TR	
Rekening begunstigde (IBAN) Compte bénéficiaire (IBAN) Konto des Begünstigten (IBAN)		B E 6 8 0 0 1 1 5 1 8 5 9 0 3 4	
BIC begunstigde BIC bénéficiaire BIC Begünstigten		GEBABEBB	
Naam en adres begunstigde Nom et adresse bénéficiaire Name und Adresse des Begünstigten		CWEPSS ASBL CLOS DES POMMIERS 26 BE 1310 LA HULPE	
Mededeling Communication Mittellung			

N'oubliez pas de renouveler votre cotisation pour nous permettre de continuer à éditer et à vous envoyer l'Eco Karst.

Le paiement (15 € membre adhérent / 20€ membre effectif) s'effectue par virement en mentionnant votre nom, votre adresse + cotisation 2018.

