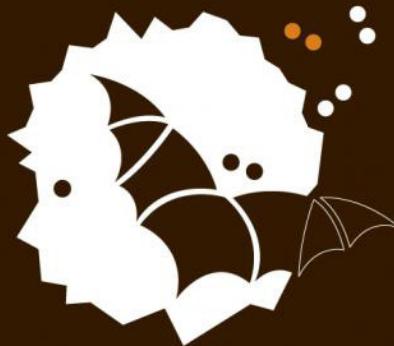


D'où vient et où va le CO₂ des grottes?

Dossier pédagogique ouvert à tous



les
découvertes
de Comblain

Environnement

SPW | Éditions

TOUT SAVOIR



Wallonie

**D'où vient
et où va le CO_2
des grottes?**

Le DIOXYDE DE CARBONE

sous terre

Sous terre

Préambule :

Depuis plus de 50 ans, la Grotte de l'Abîme, située à Comblain-au-Pont, Province de Liège, fait l'objet de nombreuses recherches sur des thèmes divers. Les observations surprenantes en matière de CO₂ en ont fait un laboratoire privilégié en la matière. La teneur en dioxyde de carbone de l'atmosphère a augmenté de 30% en un siècle. Nos mesures effectuées dans les grottes montrent des augmentations considérablement plus fortes, dépassant par endroits 100%.

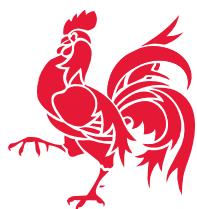
« Les grottes sont un observatoire privilégié de l'air souterrain et de son dioxyde de carbone. Ce gaz présente sous terre de fortes fluctuations saisonnières de pression partielle, avec un maximum estival marqué. La pression partielle d'été a fortement augmenté depuis le début de nos mesures (1966). Pour comprendre l'origine de cette augmentation, nous mesurons, depuis 2008, l'air du sol au-dessus de la grotte de Comblain-au-Pont » (Camille EK et Jean GODISSART 2012).

Ce phénomène interpelle. La Wallonie a commandé une étude ayant pour objectif l'analyse des rapports entre le gaz carbonique des cavités souterraines et celui du sol ainsi qu'entre le CO₂ de l'air des grottes et celui dissous dans les eaux souterraines.

La hausse des teneurs en CO₂ sous terre est importante pour l'Homme à plus d'un titre, notamment en matière de bilan carbone et en matière de santé publique. En collaboration avec la DGO3, l'ASBL *Les découvertes de Comblain*, gestionnaire de la Grotte de l'Abîme, propose de diffuser auprès du public ces informations. En 2013, une capsule vidéo a vu le jour. Elle présente l'étude et ses résultats en images.

En 2014, notre ASBL se voit confier la réalisation d'un outil pédagogique à l'attention du public scolaire mais aussi du citoyen. Suite à un long travail de recherche, de consultation et de conception, un dossier pédagogique et une animation ont vu le jour en 2015. L'accompagnement du Service de l'Inspection de l'Enseignement secondaire de la Fédération Wallonie-Bruxelles ainsi que celui du Comité Scientifique de l'accord de coopération entre la Communauté française, la Wallonie et la Région de Bruxelles-Capitale relatif à l'éducation à l'environnement, nous auront permis de cibler le niveau d'études et d'adapter les outils pédagogiques à celui-ci.

Grâce à l'outil pédagogique présenté ci-après et à l'animation qui peut être vécue sur le terrain, nous vous invitons à suivre le parcours du CO₂ dans l'air et dans l'eau, depuis ses origines atmosphériques et pédologiques, jusqu'à ses exutoires, sources et résurgences, en passant par les cavités. Les relations entre les différents milieux (air-eau-sol) sont donc prises en compte.



Wallonie



WALLONIE-BRUXELLES
ENSEIGNEMENT



Table des matières

<i>Le DIOXYDE DE CARBONE sous terre</i>	6
<i>Dossier pédagogique</i>	13
Chapitre 1. : Chimie - Le dioxyde de carbone et les grottes	14
1.1. Les déplacements d'équilibres chimiques – Principe de Le Chatelier.....	15
1.2. Les réactions de combustion.....	19
1.3. L'acidité et échelle de pH.....	20
1.4. Les réactions acide/base - Théorie de Brønsted-Lowry.....	22
1.5. Les réactions de précipitation – Les concrétions.....	23
1.6. Conclusions.....	26
Chapitre 2. : Ecologie – Les cycles des matières	28
2.1. Le cycle de la roche calcaire.....	28
2.2. Le cycle du dioxyde de carbone.....	29
2.3. Perturbation du cycle du carbone au-dessus de la grotte.....	34
2.4. Conclusions.....	39
<i>Bibliographie, webographie</i>	42

Le DIOXYDE DE CARBONE
sous terre

Table
des matières

Le DIOXYDE DE CARBONE

sous terre

Préface

Le présent ouvrage s'inscrit dans le droit fil des activités de l'A.S.B.L. « Les découvertes de Comblain ». Celle-ci introduit les élèves des écoles, mais aussi les familles, aux phénomènes de la Nature. La grotte, l'Ourthe, le sentier géologique, les carrières souterraines abritant des chauves-souris, sont autant de milieux où l'Association initie les jeunes et les moins jeunes à la géologie, la botanique, la biologie, la géographie, l'archéologie, la pêche et à bien d'autres activités.

Le gaz carbonique des cavités souterraines ne pouvait échapper à la soif de connaissance des animateurs et des participants. Ce gaz est justement l'objet d'études approfondies dans la grotte de Comblain-au-Pont. L'Association se devait donc de présenter aux amateurs une animation sur ce thème. Le présent livret est l'expression écrite de cette activité. Cette animation montrera à chacun que si le CO_2 n'est pas un gaz toxique, sa trop grande abondance en remplacement de l'oxygène peut être dangereuse. On retiendra surtout que le dioxyde de carbone est un indicateur privilégié, et plus encore un paramètre important de l'actuelle évolution du climat.

C'est en vivant l'expérience de la mesure et de l'étude du CO_2 que les participants profiteront des informations que fournit le travail de Nicolas Klingler, ouvrage qui se veut un outil spécialement utile aux enseignants, mais qui s'adresse également à tous.

Camille Ek

professeur honoraire
à l'Université de Montréal
et au Centre universitaire de Luxembourg
chargé de cours honoraire
à l'Université de Liège

Dossier pédagogique

Ce dossier s'adresse idéalement aux enseignants qui dispensent les cours de chimie et d'écologie en 5^e et/ou 6^e secondaire, tous réseaux confondus.

Il fait le lien entre certaines matières des programmes scolaires de la Fédération Wallonie-Bruxelles et la problématique de l'accumulation de CO₂ dans les grottes.

Il peut aussi apporter des réponses à toute personne curieuse d'apprendre grâce à des exemples concrets.

Mous nous sommes limités à développer ci-dessous les chapitres qui ont un lien évident avec des réalités observables, palpables, dans une grotte et les écosystèmes sus-jacents.

Ce lien avec le « terrain » facilite chez l'étudiant la compréhension, l'appropriation des concepts et modèles fondamentaux de la chimie et de l'écologie.

L'Animation

En renfort à ce support écrit, une activité de sensibilisation et d'éducation à l'environnement a vu le jour. Elle permet aux élèves de 5^e et 6^e secondaire de répéter, étape par étape, les gestes des scientifiques qui ont étudié et étudient toujours les mécanismes de transfert du CO₂ vers les grottes. Les expériences et mesures réalisées sur le terrain donnent aux étudiants la possibilité de comprendre par eux-mêmes ce phénomène biochimique insidieux.

L'objectif pédagogique principal de l'animation est donc surtout de faire vivre aux jeunes des matières de prime abord très théoriques. Le lien avec la théorie est fait par l'enseignant avec, si nécessaire, l'aide du dossier pédagogique. Le document que vous avez dans les mains permet alors, soit de préparer l'animation sur le terrain, soit d'être un support utile au développement du thème en classe.

L'animation correspond aux programmes scolaires du 3^e degré en chimie et en sciences. Les matières telles que les équilibres chimiques, les réactions acides/bases, la solubilité et les précipitations y sont expérimentées.

La respiration, le flux du CO₂ (cycle du carbone), en lien direct avec l'écosystème grotte, sont des matières abordées en interaction avec les étudiants, l'animateur et le milieu naturel.

Renseignements sur l'animation sur www.decouvertes.be.

Chapitre 1: Chimie

Le dioxyde de carbone et les grottes

Le dioxyde de carbone (CO_2) et les grottes sont intimement liés.

- Le CO_2 fait partie intégrante des molécules de carbonate de calcium qui composent nos roches calcaires.
- Combiné à l'eau, ce gaz participe activement à la dissolution de cette même roche et donne ainsi naissance à de magnifiques réseaux souterrains.
- Les gouttes d'eau perlant au plafond de la salle perdent du CO_2 permettant au calcaire dissous de cristalliser sous forme de calcite et de former de majestueuses concrétions.

Discrètement et lentement, le sous-sol jongle avec les lois de la chimie.

Bon nombre de réactions et d'équilibres peuvent être mis en évidence autour de l'écosystème «grotte». Ils s'opèrent depuis la nuit des temps tantôt dans le sol, tantôt dans l'air des cavités. Ils ont contribué et contribuent toujours à faire de notre environnement ce qu'il est actuellement. Pourtant, les dernières décennies ont vu certains

de ces phénomènes naturels s'emballer, avec des conséquences inattendues pour l'homme et pour le milieu naturel.

Ce chapitre permet d'aller plus loin dans l'analyse, de décrire et comprendre les réactions, de faire le lien avec certaines lois de la chimie observées sur le terrain et celles reprises dans le programme scolaire.

1.1. Les déplacements d'équilibres chimiques

Principe de Le Chatelier

En chimie, lorsque l'on met deux réactifs en solution dans le but d'obtenir un troisième, la réaction est rarement complète. Un équilibre entre les trois substances s'installe. Le Chatelier (1884) a étudié les facteurs qui permettent d'agir et de déplacer les équilibres :

«Si une modification est imposée à un système chimique à l'état d'équilibre dynamique, il s'ensuit une réaction chimique qui s'oppose en partie à la modification imposée ; le système évolue vers un nouvel état d'équilibre.»

Cette loi des déplacements d'équilibres s'observe abondamment dans nos écosystèmes et tout particulièrement avec le dioxyde de carbone.

1.1.1. Le gaz carbonique et l'eau

Comme pour de nombreux autres gaz

composant l'atmosphère, des échanges s'opèrent en continu avec l'eau : la pluie en traversant l'air, l'eau en s'infiltrant dans le sol, à l'interface entre l'air et les océans... Ces échanges sont régis par divers facteurs extérieurs comme les différences de concentration entre les milieux, la température et la pression.

1.1.1.1 La concentration (C) :

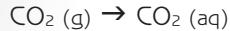
En injectant l'air que nous expirons (moyenne de 3% de CO₂) dans de l'eau de distribution, le CO₂ qu'il contient se lie à l'eau pour former de l'acide carbonique (expérience réa-lisée lors de l'animation). Nous pouvons nous imaginer facilement que si cette solution contenant de l'acide carbonique est laissée à l'air libre pendant un laps de temps suffisant, ce dioxyde de carbone aqueux repassera en phase gazeuse pour gagner l'air libre. Le phénomène est comparable à ce qui se passe dans un verre d'eau pétillante oublié au coin d'une table.

Il y a un équilibre constant entre le dioxyde de carbone compris naturellement dans l'atmosphère et celui dissous dans l'eau. Il peut être traduit par :



Ce phénomène se marque particulièrement avec les océans. Ces immenses étendues d'eau n'échappent pas au principe de Le Chatelier.

Si nous ajoutons du dioxyde de carbone à l'état gazeux dans la solution, l'équilibre va être déplacé vers la droite :



Nous augmentons donc la concentration en dioxyde de carbone aqueux.

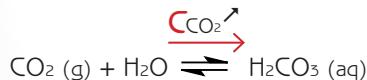
Dans **l'eau**, le CO_2 se combine pour donner naissance à de l'acide carbonique (H_2CO_3).

Un équilibre s'installe entre les trois substances : $\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{H}_2\text{CO}_3 (\text{aq})$

Dans le **sol**, l'équilibre suit la même règle.

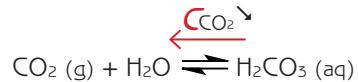
Du dioxyde de carbone est rejeté naturellement par la respiration des racines des végétaux et par les microorganismes du sol. Cet apport de dioxyde gazeux va donc augmenter la concentration en dioxyde de carbone en solution dans le sol et donc en acide carbonique.

L'équilibre est déplacé vers la droite :



Entraînée par l'eau d'infiltration (pluie), cette solution de dioxyde de carbone aqueux va se retrouver dans les vides souterrains des grottes. L'eau va s'y «dégazer». Le dioxyde de carbone dissous rejoint alors l'atmosphère de la grotte. Cette modification dans les

concentrations va provoquer un déplacement de l'équilibre vers la gauche.



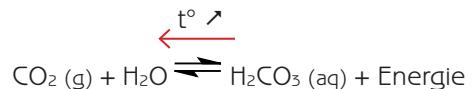
Question : On peut parfois constater une augmentation de la concentration en dioxyde de carbone dans l'atmosphère des grottes après des périodes de fortes pluies.

Ce phénomène peut-il s'expliquer chimiquement, par un déplacement d'équilibre ?

Réponse : Oui, l'apport d'eau en quantité dans le sol (infiltration de l'eau de pluie) déplace l'équilibre suivant vers la droite : $\text{CO}_2 (\text{g}) + \text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{H}_2\text{CO}_3 (\text{aq})$ et donc évacue le « CO_2 » sous forme d'acide carbonique vers les grottes.

1.1.1.2. La température (t°) :

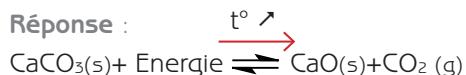
Une forte concentration en dioxyde de carbone dissous dans l'eau permet de mettre en solution le carbonate de calcium. Pour retirer ce dioxyde de carbone aqueux rapidement, il suffit de chauffer la solution. La chaleur apportée permet de déplacer l'équilibre vers la gauche sans avoir préalablement modifié les concentrations.



On peut également dire que la transformation de l'acide carbonique en gaz carbonique est endothermique. Cela signifie que cette réaction consomme des calories. À l'inverse, une réaction qui provoque un échauffement de la solution est dite exothermique.

Question : *La cuisson (fours à chaux) à haute température de la roche calcaire (CaCO₃) donne naissance à de la chaux vive (CaO). La réaction est donc endothermique. Quel est le sous-produit de la réaction (écrire la réaction chimique) ?*

Comment peut-on (artificiellement) déplacer l'équilibre en faveur du fabricant de chaux vive.



Il faut donc chauffer la roche calcaire et évacuer le dioxyde de carbone.

Question : *Pour l'utiliser comme mortier, cette chaux vive est «éteinte» avec de l'eau. On obtient ainsi de la chaux hydraulique, appelé aussi chaux éteinte = Ca(OH)₂. Cette opération est dangereuse car elle dégage beaucoup de chaleur. Ce dégagement d'énergie fait que la réaction est dite : ...*

Écrire la réaction :

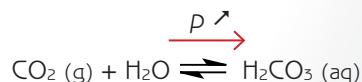
Réponse :



1.1.1.3. La pression (p) :

Lors de la visite de la grotte de l'Abîme à Comblain-au-Pont, dans la salle des Echos, nous pouvons remarquer des cloches de dissolution au plafond de la salle. Ces cavités arrondies, en forme de grosses bulles, se sont formées il y a quelques centaines de milliers d'années, lorsque la grotte se remplissait régulièrement d'eau jusqu'à son plafond. En remplissant la salle, l'eau a pris la place de l'air et l'a expulsé à travers les fissures du plafond (diaclasses) vers la surface. Dans la salle des Echos, la diaclase s'est bouchée naturellement. L'air, poussé par l'eau, s'est alors fait comprimer contre le plafond. Le dioxyde de carbone gazeux compris dans ces bulles d'air est alors passé sous sa forme dissoute (acide carbonique) et a attaqué le calcaire localement.

La pression exercée par l'eau sur les bulles d'air a déplacé l'équilibre suivant vers la droite. Ce phénomène est à comparer à ce qui se passe dans une bouteille d'eau pétillante.



Question : Dans une bouteille d'eau pétillante fermée (scellée), on n'observe pas plus de bulles de gaz visibles que dans une même bouteille remplie d'eau plate.

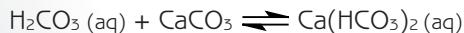
Si la bouteille d'eau pétillante ne contient pas de dioxyde de carbone, que contient-elle ?

Que faut-il faire pour obtenir du dioxyde de carbone à l'état gazeux ?

Réponse : La bouteille d'eau pétillante fermée contient de l'acide carbonique et non du CO₂. Lorsque la bouteille est ouverte, la pression dans la bouteille chute. Du CO₂ à l'état gazeux se forme alors dans la bouteille et s'évacue vers l'extérieur.

1.1.2. Le gaz carbonique, l'eau et le calcaire

Nous venons de voir au point précédent que le gaz carbonique dissous dans l'eau se retrouve sous forme d'acide carbonique dans le sol (H₂CO₃). En s'infiltrant dans le sous-sol, cette eau acide entre en contact avec la roche calcaire (CaCO₃). Il s'ensuit une réaction chimique qui tend vers l'équilibre suivant :



→ Dans le sol, comment l'équilibre va-t-il se comporter ?

L'apport continu d'acide carbonique

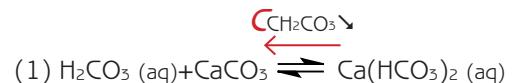
(réaction du dioxyde de carbone (respiration...) avec l'eau) fait que l'équilibre se déplace vers la droite. C'est la loi des déplacements d'équilibres suite à une **augmentation de concentration** du H₂CO₃ et à une **diminution de concentration** du Ca(HCO₃)₂. Ce dernier est en effet entraîné avec les eaux d'infiltration vers les profondeurs du sous-sol et vers les grottes.

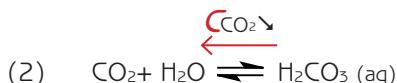
La roche calcaire est dissoute par l'acide carbonique. Il en résulte une solution de bicarbonate de calcium qui suit le parcours des eaux d'infiltration.

→ Arrivé dans les vides du milieu souterrain, l'équilibre est modifié.

L'acide carbonique rejoint l'atmosphère de la grotte sous forme de gaz carbonique. La **concentration** en acide carbonique diminue. L'équilibre se déplace vers la gauche. Il y a formation (cristallisation) de carbonate de calcium.

Les cristaux de CaCO₃ (appelés « calcite ») s'accumulent d'année en année, sous forme de coulées, chandelles, plaques, ... Ce sont les concrétions de la grotte.





Question : l'équilibre suivant :

$\text{H}_2\text{CO}_3 \text{ (aq)} + \text{CaCO}_3 \rightleftharpoons \text{Ca}(\text{HCO}_3)_2 \text{ (aq)}$
se déplace vers la droite dans le sol et dans l'autre sens dans la grotte. Il en résulte notamment un transfert de dioxyde de carbone du sol vers la grotte. À votre avis, quels sont les facteurs biotiques qui pourraient amplifier ce phénomène et ainsi augmenter, au final, la concentration en CO₂ dans la grotte?

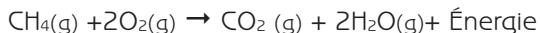
Réponse : Augmenter l'apport de CO₂ dans le sol par les micro-organismes et les racines.

1.2. Les réactions de combustion

Les réactions de combustion ne sont pas directement liées aux interactions entre le trio *calcaire/dioxyde de carbone/eau* qui nous intéressent dans ce dossier.

Les réactions de combustion des énergies fossiles sont par contre la première source de ce dioxyde de carbone en excès qui provoque un déplacement des équilibres et donc un dérèglement du cycle du carbone en lien avec le milieu souterrain.

Exemple d'une réaction de combustion pour le méthane (CH₄) :



Le charbon, le pétrole, le gaz et même le bois suivent le même schéma lors de leur combustion (combustible + dioxygène donne du dioxyde de carbone + de l'eau avec dégagement d'énergie).

Cette réaction exothermique n'est pas spontanée : il est nécessaire d'apporter une **énergie d'activation** pour démarrer la réaction en chaîne (étincelle, rayonnement, flamme).

L'oxygène est indispensable et est appelé le **comburant** et dans ce cas, le méthane est le **combustible**.

Ce trio indispensable pour une réaction de combustion est symbolisé sous forme d'un «triangle du feu» (figure 1.1.).

Les énergies dites fossiles, suite à leur combustion, libèrent dans l'atmosphère du dioxyde de carbone fossile. Ce gaz, s'ajoute à celui déjà présent dans l'atmosphère (figure 1.2.).

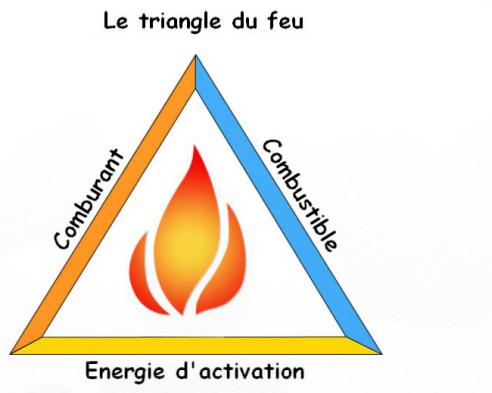


figure 1.1.

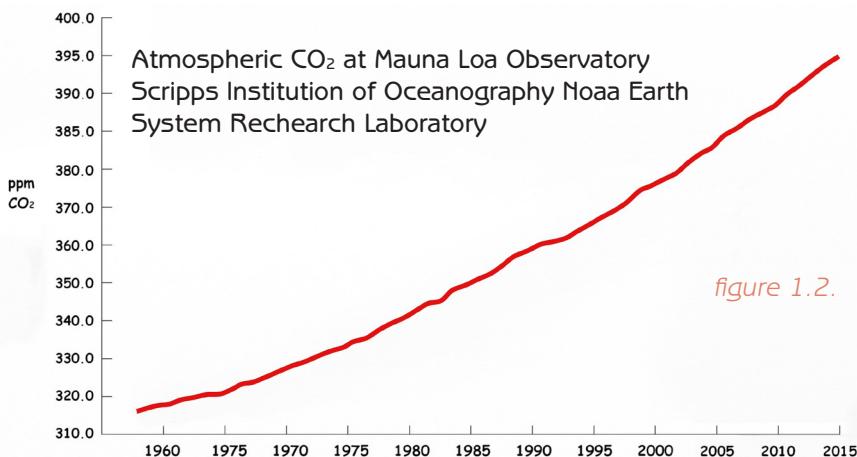
Ces molécules carbonées avaient été emprisonnées dans la croûte terrestre par divers mécanismes naturels et ce, pendant des millions d'années, rendant la vie de nos espèces actuelles possible sur terre.

Le bois, le «biogaz», les agro-carburants,... libèrent dans l'atmosphère du CO₂ plus «jeune». Une source d'énergie est dite renouvelable lorsque l'équivalent du carbone qui est rejeté est repris par la biomasse

dans les années qui suivent (*Voir chapitre 2. écologie*).

1.3. L'acidité et échelle de pH

Le pH (potentiel Hydrogène) donne une information sur le caractère acide ou basique de la solution. Cette échelle de pH a des valeurs qui vont de 0 à 14.



Un pH de 0 exprime une acidité extrême. À l'inverse, un pH de 14 exprime une basicité extrême. La neutralité est atteinte lorsque le pH est de 7.

Une solution acide libère plus ou moins des ions H⁺ (ou H₃O⁺ en présence d'eau). Une solution basique capture des ions H⁺ (ou H₃O⁺). Dans cette solution, ce sont les ions OH⁻ qui dominent.

Une eau pure (très théorique) possède un pH de 7.

Elle libère autant d'ions H⁺ qu'elle en capture :



Cette réaction d'équilibre est appelée **autoprotolyse de l'eau**.

Dans le cadre de nos interactions entre l'eau, le dioxyde de carbone et les grottes, il y a des preneurs et des donneurs de H⁺.

1.3.1. L'acide carbonique

Deux sources d'acide carbonique sont à mettre en avant dans le cadre des échanges qui nous intéressent dans ce dossier.

La plus importante trouve son origine dans l'échange entre l'eau d'infiltration et le dioxyde de carbone issus de la respiration souterraine des racines et des micro-organismes.

L'autre apparaît dans l'échange entre les eaux de pluie et le dioxyde de carbone atmosphérique.

En effet, lors de leur traversée de l'atmosphère, les gouttes de **pluie s'acidifient**. Elles rentrent en contact avec le dioxyde de carbone dans l'air et, pour rappel, une réaction d'équilibre s'installe.



Cet équilibre est à mettre en parallèle avec celui qui s'opère dans le sol. Il se forme de l'acide carbonique (H_2CO_3). Son produit ionique libère des H_3O^+



NB : Il existe bien d'autres acides naturels. Certains sont produits par les animaux et les végétaux pour se défendre et provoquer des brûlures chimiques à celui qui s'y frotte. C'est le cas de l'acide formique (HCOOH) synthétisé notamment par les fourmis et les orties.

Dans le sol, les acides humiques sont produits suite à la décomposition de la matière organique. Les acides humiques participent eux aussi à la dissolution du calcaire.

1.3.2. La roche calcaire

En agriculture biologique, l'acidité excessive d'un sol est corrigée par un épandage de calcaire en poudre (CaCO_3). Cette roche broyée réagit en tant que base et capte donc des ions H_3O^+ en excès dans le sol. Le carbonate de calcium (roche calcaire) a donc tendance à neutraliser les sols acides.



Cependant, la roche calcaire est peu soluble dans l'eau pure. Sa solubilité est améliorée dans le cadre de sa réaction acide/base avec l'acide carbonique (*voir point 1.4.*).

En agriculture, la dolomie ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$) est souvent privilégiée grâce à son apport complémentaire de magnésium, élément indispensable à la croissance des végétaux.

1.3.3. Comment mesurer l'acidité d'une solution ?

L'utilisation d'un pH-mètre électronique permet d'obtenir des chiffres précis, à la décimale près. Une autre technique,

moins onéreuse, permet d'évaluer de façon plus ou moins précise le pH d'une solution : **les indicateurs colorés**. En effet, l'homme s'est rapidement aperçu que certaines substances naturelles changent de couleur selon qu'elles sont mises en contact avec une solution acide ou basique. Du jus de chou rouge passe au violet-bleu dilué dans l'eau. Il prend un rouge plus franc cuisiné au vinaigre. Une fleur bleue (myosotis) devient rose si on la passe sur un nid de fourmis! L'acidification de l'eau par la respiration est facilement mise en évidence grâce à un indicateur coloré (expérience réalisée lors de l'animation).

1.4. Les réactions acide/base - Théorie de Brönsted-Lowry

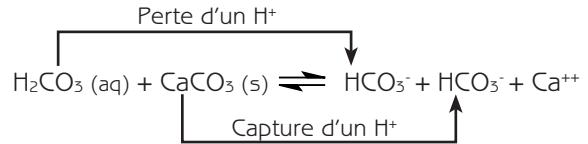
Nous avons vu dans le chapitre précédent qu'un acide est un donneur de protons H^+ et qu'une base les prend.

Sur un sous-sol calcaire, le sol a un pH supérieur à 7. La roche calcaire ($CaCO_3$) réagit comme une base. Par contre, la pluie, la respiration des racines et des micro-organismes apportent de l'acide carbonique dans le sol (H_2CO_3).

Le contact de l'acide carbonique avec la roche calcaire implique une réaction acide/base selon l'équilibre suivant :



Le H_2CO_3 est donneur de protons H^+ et le $CaCO_3$ est capteur de H^+ suivant le modèle ci-dessous :

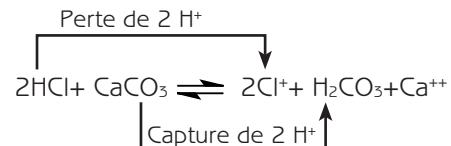


Dans le sol, l'apport continu d'acide carbonique à certaines périodes de l'année (croissance des végétaux, activité des micro-organismes) et l'évacuation par l'eau du bicarbonate de calcium ($Ca(HCO_3)_2$) très soluble déplacent cet équilibre vers la droite. Il en résulte que l'acide carbonique va dissoudre la roche calcaire et l'entraîner dans le sous-sol. Cette réaction est mise en évidence lors de l'animation.

Question :

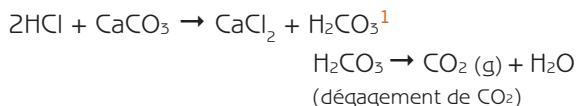
- 1- Pour identifier la nature des roches, les géologues ont dans leur panoplie de l'acide chlorhydrique (HCl). En contact avec la roche calcaire, cet acide produit une effervescence abondante (figure 1.3.).
Pouvez-vous formuler la réaction acide/base qui résulte du contact entre l'acide chlorhydrique et la roche calcaire ?

Réponse :



2- Pourquoi lors de cette expérience, l'équilibre est-il forcément déplacé vers la droite ?

Réponse : le dioxyde de carbone est rapidement retiré du milieu réactif en rejoignant l'atmosphère.



Attention : si l'expérience doit être réalisée par les étudiants, veillez à ce que l'acide soit suffisamment dilué afin d'éviter les brûlures sur la peau (ex : acide chlorhydrique à 4%).



figure 1.3.

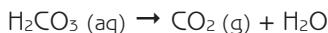
Illustration de l'effervescence produite sur la roche calcaire par l'acide chlorhydrique.

1.5. Les réactions de précipitation – Les concrétions

Deux substances chimiques différentes en solution aqueuse qui sont mises en contact l'une avec l'autre, peuvent donner naissance à un précipité (solide).

Dans un contexte karstique, la réaction acide/base qui permet de solubiliser la roche calcaire (CaCO_3) sous forme de bicarbonate de calcium ($\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$) est mise en évidence. C'est cette réaction qui s'opère au-dessus de la grotte.

L'eau d'infiltration ainsi chargée en calcaire dissous, sous l'effet de la gravité, poursuit son trajet dans le sous-sol. Arrivé dans un espace libre et plus ou moins aéré, où la concentration en CO_2 dans l'air (pression partielle) est moindre (salle d'une grotte, air libre), le CO_2 dissous (acide carbonique) va quitter la solution pour reprendre sa forme gazeuse:



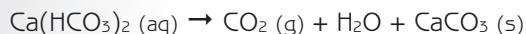
En effet, la pression partielle (concentration) en dioxyde de carbone dans l'air des grottes reste très faible par rapport à l'air confiné du sol et du sous-sol.

À cette disparition de l'acide carbonique, se produit en parallèle la réaction de précipitation suivante:



¹L'acide carbonique (H_2CO_3), produit de la réaction, se transforme instantanément en eau et en gaz carbonique, d'où l'effervescence liée à la réaction.

Les deux réactions peuvent être écrites sous un seul équilibre :

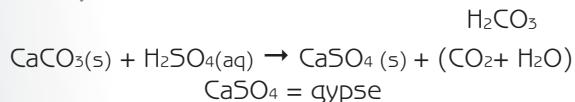


Cette réaction de précipitation peut être obtenue en laboratoire en chauffant une solution de calcaire dissous. L'augmentation de la température de la solution diminue la solubilité du CO_2 .

Question :

Dans la grotte du chat à Daluis, en France, le carbonate de calcium (CaCO_3) a été creusé par de l'acide sulfurique (H_2SO_4) issu du dégazage d'aquifères profonds. Dans cette grotte, des précipités blancs sont abondants. Identifiez la nature chimique de ces précipités.

Réponse :



Les concrétions

Comme nous venons de le montrer, le calcaire dissous va précipiter dans la grotte. Il s'en suit une accumulation de dépôts calcaires sur les parois et sur le sol de la cavité. Au fil des siècles, les précipités de calcite (cristaux de CaCO_3) prennent des proportions et des formes surprenantes. L'ensemble de ces dépôts calcaires se nomme **concrétions** (figure 1.4.).

Les gouttes d'eau d'infiltration, suivant qu'elles arrivent dans la grotte par le plafond, les parois ou au niveau du sol, vont former des concrétions d'appellations différentes.



figure 1.4.
Photo d'un ensemble de concrétions

Stalactites et stalagmites

Une goutte d'eau d'infiltration chargée en calcaire dissous pend au plafond. Suivant la réaction de précipitation présentée ci-dessus, le calcaire va former des cristaux (calcite) qui se fixent à la paroi tout autour de la goutte sous forme d'un anneau. La goutte tombe.

La goutte suivante prend le même chemin que la précédente et dépose un autre petit anneau de calcite à la suite du premier. Au fil des années, des siècles, un tube creux de calcite grandit. L'eau d'infiltration s'écoule à travers celui-ci jusqu'à son orifice. Ces concrétions fines et creuses s'appellent

aussi des **fistuleuses**. Pour l'une ou l'autre raison, le trou au bout de la fistuleuse peut se boucher. L'eau qui passait par l'intérieur de cette fistuleuse doit alors trouver un autre chemin, la forme de la concrétion va changer. Il ne s'agira plus d'une fistuleuse mais d'une **stalactite**. Les gouttes qui forment la stalactite s'écrasent sur le sol, toujours au même endroit. S'il leur reste du calcaire dissous, celui-ci va cristalliser sur et aux alentours de son point d'impact (éclaboussures). Il se forme alors une **stalagmite**. Si l'eau s'écoule sur le sol, il se forme un **plancher stalagmitique**.

La vitesse de croissance d'une stalactite est variable, notamment en fonction du débit et de la charge de l'eau en calcaire dissous. Il est admis que les concrétions grandissent en moyenne de moins de 1cm par siècle. D'une grotte à l'autre ou au sein d'une même grotte, cette vitesse de croissance reste très variable.

Les draperies

Elles se forment sur le même principe, lorsque l'eau du sous-sol s'écoule dans la grotte le long d'une paroi latérale.

Les gours (figure 1.5.)

Lorsque l'eau d'infiltration circule avec une dominance horizontale, il se crée des flaques d'eau de taille variable. Les cristaux de calcaire qui apparaissent en surface sont dirigés en périphérie et s'y accumulent (tension superficielle de l'eau). Au fil des années, il

se forme des bassins qui débordent vers d'autres bassins. Il s'agit des **gours**.



figure 1.5. Photo de gours

Des concrétions dans la cuisine !

L'eau de distribution provient souvent de captages (puits, galeries drainantes), mis en place dans le sous-sol. La majorité de ces captages se situent dans la roche calcaire. L'eau est de qualité chimique similaire à celle qui s'écoule dans les grottes. Lorsqu'une eau est chargée en calcaire dissous, elle est dite *dure*. Lorsqu'elle contient peu de calcaire (captage dans le grès, eaux des grands barrages ardennais d'Eupen et de la Gilleppe), elle est dite *douce*.

La réaction de précipitation que l'on observe dans les grottes est aussi celle qui se fait involontairement sur les résistances des machines à laver, cafetières,... au quotidien lorsque l'eau de distribution est *dure*.

1.6. Conclusions

Le CO_2 est un acteur essentiel dans de nombreuses réactions biotiques (photosynthèse, respiration, dégradation... comme abiotiques (combustion, acidification, transport de calcaire dissous...). Dans ce chapitre, nous nous sommes attardés sur son rôle de moteur de la dissolution du calcaire donc, de la genèse des grottes. Le CO_2 est aussi le moteur de la précipitation de la calcite formant de majestueuses concrétions.

Il est continuellement en interaction avec bon nombre d'autres molécules chimiques dans d'autres réactions naturelles complexes.

Nous l'avons vu dans ce chapitre, la moindre modification de sa concentration dans le milieu naturel induit des changements d'équilibres, des modifications imprévisibles dans les écosystèmes. La compréhension des réactions chimiques est ici une étape indispensable dans l'analyse des bouleversements écologiques.

Le DIOXYDE DE CARBONE

Les cycles des matières

Chapitre 2

Écologie

Chapitre 2. : Écologie

Les cycles des matières

Notre planète est régie par une multitude d'équilibres biologiques. Si des êtres vivants sont sur terre maintenant et que d'autres ont disparu, c'est notamment directement lié à des changements dans les équilibres des matières, dans la composition de l'air, dans l'évolution du climat et donc des conditions de vie.

Les écosystèmes se modifient lentement, les espèces s'adaptent et évoluent avec eux. Cette évolution est tellement lente, qu'il est impossible de s'en rendre compte à l'échelle des générations humaines.

L'un des cycles qui a un rôle capital sur les conditions de vie sur terre est le cycle du carbone. Il nous intéresse d'autant plus qu'il est intimement lié à beaucoup d'autres cycles comme celui de l'oxygène, de la matière organique, du soufre...

Le moindre dérèglement de l'un des cycles peut avoir des effets inattendus sur les autres cycles. Les écosystèmes en liens étroits avec ces phénomènes seront inévitablement perturbés. La pyramide alimentaire et l'adaptabilité des espèces peuvent s'en trouver bouleversées. Parfois, on relève des dérèglements tout à fait inattendus, insidieux. Ces changements d'origine anthropique sont beaucoup trop rapides à l'échelle de l'évolution. Les espèces

s'adaptent difficilement ou ne s'adaptent pas. La situation est très grave pour de nombreux écosystèmes. Ce n'est pas encore le cas pour l'écosystème grotte. Il est cependant difficile de prévoir les effets sur ce milieu dans les dizaines d'années à venir.

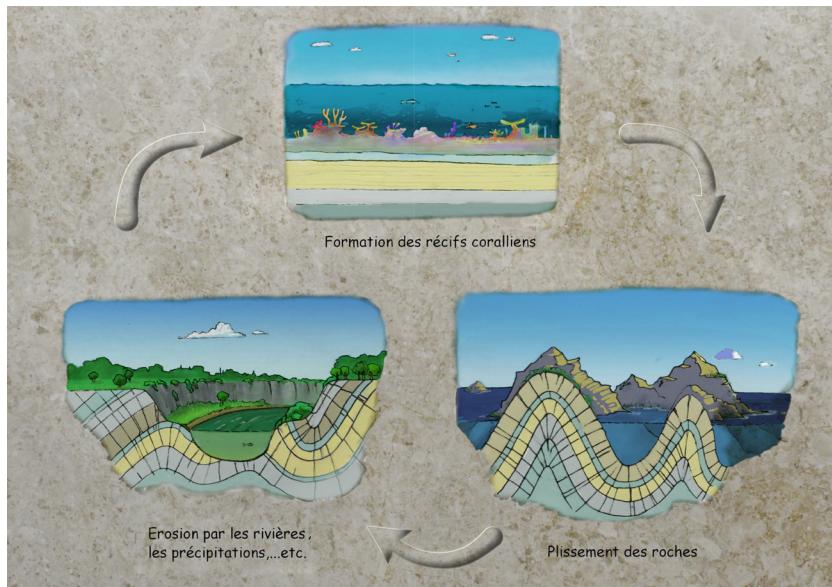
Dans les grottes, c'est le cycle de la roche calcaire qui est affecté et qui nous préoccupe particulièrement.

Figure 2.1.
Dessin du cycle
de la roche calcaire.

2.1. Le cycle de la roche calcaire

Si on simplifie, le cycle de la roche calcaire peut être résumé comme suit (figure 2.1.). Des organismes aquatiques (notamment) utilisent le calcaire dissous pour fabriquer leur coquille, leur squelette. Ils forment d'importantes colonies.

De génération en génération, ils s'accumulent dans les mers et océans. Par leur propre poids ou sous le poids d'autres sédiments de nature différente (sable par exemple), ils s'indurent et forment une roche sédimentaire détritique: **la roche calcaire (carbonate de calcium)**. Les roches calcaires d'origine sédimentaire sont souvent riches en fossiles (figure 2.2.)



Suite à des plissements (tectonique des plaques), la roche calcaire, comme d'autres roches, se retrouve à l'air libre et subit une forte érosion (pluie, rivières,...). Le calcaire qui compose ces roches se fait dissoudre par les eaux de pluie, du sol, des rivières,... Il regagne les eaux salées et est utilisé par d'autres organismes pour construire leur squelette. Ce cycle est très lent. Les molécules de calcaire dissous qui circulent dans nos grottes aujourd'hui constituaient des coquilles d'organismes marins il y a près de 350 millions d'années!



Figure 2.2.
Photo d'échantillons de roches calcaires avec fossiles.

Le gaz carbonique (CO_2) sous sa forme liée à l'eau (H_2CO_3) est un véritable transporteur de calcaire. Dans nos sols et sous-sols, il le solubilise pour former du bicarbonate de calcium ($\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$). Sous cette forme soluble, il est entraîné vers les grottes. Le dioxyde de carbone finit par retourner dans

l'atmosphère lorsque le calcaire reprend sa forme de carbonate (CaCO_3) solide dans les vides de la grotte.

(Voir point 1.5.).

2.2. Le cycle du dioxyde de carbone

Dans ce chapitre, il nous semble important de distinguer le cycle du carbone qui se produit à l'échelle d'une vie (vie d'une feuille, d'un être vivant, d'un arbre) et celui qui s'opère à une échelle géologique. Les réactions qui mettent en œuvre du dioxyde de carbone dans les grottes et dans le sous-sol devraient échapper au cycle géologique et pourtant, nous verrons que ce n'est pas le cas. Dans les grottes, nous sommes dans une des zones de friction de ces deux cycles. Les activités humaines y sont pour beaucoup.

2.2.1. Cycle court du dioxyde de carbone

Nous entendons par cycle court du carbone, les échanges qui se répètent sans cesse à l'échelle d'une vie (animale ou végétale).

2.2.1.1. Les trois principales sources d'émissions naturelles

Sans intervention humaine, trois sources naturelles de production de dioxyde de carbone sont à mettre en avant dans le cadre des mouvements de dioxyde de carbone au-dessus des grottes :

La respiration

Pour vivre, les animaux et même les végétaux (parties souterraines tout particulièrement) respirent. Ils consomment, entre autres, du dioxygène et émettent du dioxyde de carbone dans l'air et dans le sol. (Il faut bien noter que grâce à la photosynthèse, les végétaux ont un bilan O₂ largement positif). La respiration est une réaction d'oxydation qui fournit à l'organisme de l'énergie.

La décomposition

De la décomposition de la matière organique (feuilles mortes, excréments, animaux morts) découlent trois réactions principales : l'humification (formation de molécules complexes appelées *humus*), la minéralisation (transformation des molécules organiques en éléments minéraux) et la réaction d'oxydation par les micro-organismes du sol qui produit du CO₂, de l'eau, et de l'énergie. C'est cette dernière qui nous préoccupe et intervient dans le cycle du CO₂.

La combustion

De tout temps, des réactions de combustion ont pu se produire dans l'environnement, sans intervention humaine (incendies de forêt dus à la

foudre, par exemple).

La réaction de combustion émet du dioxyde de carbone dans l'atmosphère. Nous nous limiterons à la prise en compte du dioxyde de carbone émis lors de la combustion d'énergies dites renouvelables comme le bois. Les autres sources de CO₂ liées à la combustion sont essentiellement d'origine anthropique. Il en sera question dans les points suivants.

Les réactions de combustion du bois, la décomposition et la respiration (réactions d'oxydation²) peuvent être synthétisées par une seule formule chimique :



2.2.1.2. Principale absorption

La source d'absorption à mettre en avant dans le cas des mouvements du dioxyde de carbone en lien avec les grottes est l'absorption par les végétaux. C'est aussi celle qui nous intéresse à l'échelle globale.

Les grandes étendues d'eau (océans) sont actuellement qualifiées de grands capteurs de gaz carbonique et elles ont en effet un rôle clef dans le «cycle» global actuel du carbone. Pourtant, sans dérèglement des sources en CO₂ par l'homme, les océans absorbent autant de dioxyde de carbone qu'ils en émettent. Aussi bien sur

² Une réaction d'oxydation est une réaction chimique dans laquelle un composé se combine avec un ou plusieurs atomes d'oxygène.

terre que dans les océans, le cycle devrait être en équilibre. Les végétaux chlorophylliens, à l'échelle de leur vie et sans intervention humaine, émettent autant de dioxyde de carbone (décomposition, respiration,...) qu'ils en absorbent (photosynthèse). Seule une très faible fraction de ce carbone organique, s'il est privé d'oxygène, se fossilise et retourne dans la lithosphère.

La photosynthèse

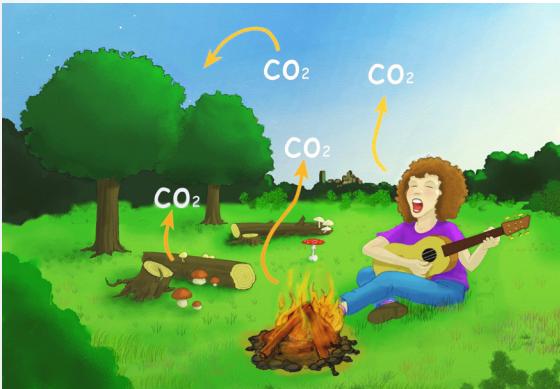
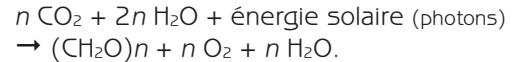


Figure 2.3.
Schéma simple des flux de CO₂

Les végétaux chlorophylliens, par un mécanisme biochimique appelé photosynthèse, vont utiliser le carbone du CO₂ de l'air (**figure 2.3.**), de l'eau et de la lumière pour fabriquer leur source d'énergie. Ils vont ainsi construire

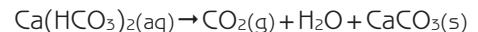
leurs tissus (feuilles, fruits, bois,...) qui sont des chaînes carbonées. La réaction biochimique de la photosynthèse peut être écrite comme suit :



2.2.1.3. Le dioxyde de carbone dans les grottes sans intervention anthropique

Pour rappel, entre le sol et les grottes, il existe un mécanisme de transfert naturel (*figure 2.4.*).

Du dioxyde de carbone est produit dans le sol (et le sous-sol) par la respiration (racines, micro-organismes,...). Il se lie à l'eau pour former de l'acide carbonique. L'acide réagit et se lie intimement à la roche pour solubiliser le calcaire (bicarbonate de calcium). Dans la grotte, en précipitant (cristallisation), le calcaire libère du CO₂. La réaction est la suivante :



Les vides souterrains drainent donc le CO₂ dissous ou libre qui s'y accumule faute d'aération.

Même dans une situation d'équilibre du cycle du carbone et sans intervention humaine, il y a donc toujours plus de dioxyde de carbone dans les grottes que dans l'air extérieur, particulièrement dans les parties

profondes loin des ouvertures vers l'air libre. Le renouvellement d'air est faible mais existe et le dioxyde de carbone finit donc par rejoindre l'air extérieur.

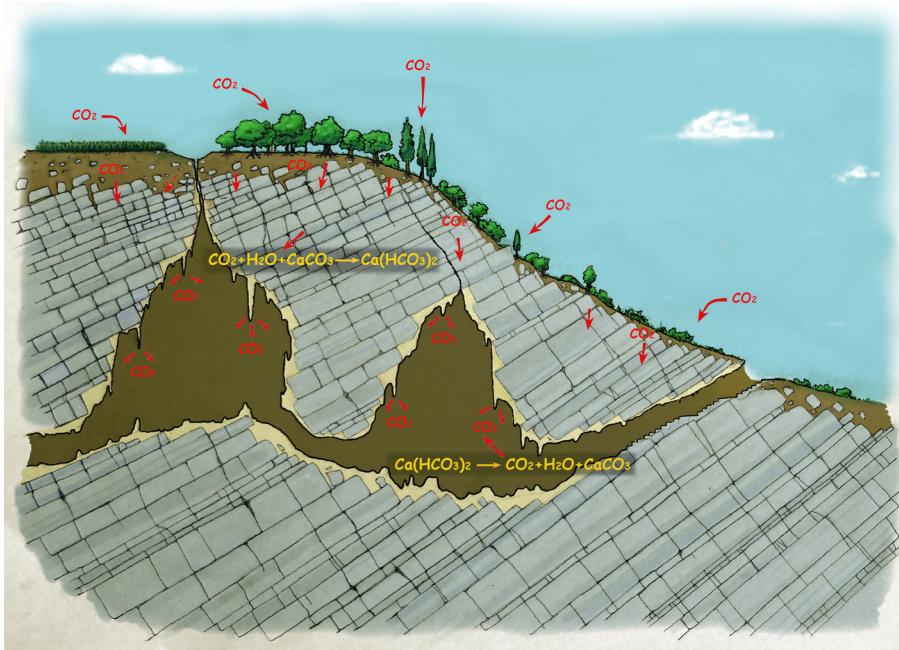


Figure 2.4.
Schéma des mouvements du dioxyde de carbone en lien avec les grottes

2.2.2. Le dioxyde de carbone à l'échelle de la terre et son stockage

Il y a quelques centaines de millions d'années, la concentration en dioxyde de carbone de l'air était très différente de celle que nous mesurons actuellement. Il est estimé qu'à la fin du précambrien, il y a 540 millions d'années, la teneur de

l'air en dioxyde de carbone était environ de 5 à 15 fois plus élevée (Pierre THOMAS - EMS-Lyon - 2005), jusqu'à 18 fois pour certains auteurs (Michel GRENON - université de Genève - 2006). Les périodes géologiques qui ont suivi ont vu le taux de dioxyde de carbone atmosphérique chuter.

En effet, le développement extraordinaire du monde végétal a permis d'extraire ce carbone atmosphérique et l'a fossilisé sous forme de charbon et de pétrole (figure 2.5.). Il y a près de 300 millions d'années, la concentration en dioxyde de carbone de l'air atteignait déjà un niveau similaire voire inférieur à celui que nous connaissons aujourd'hui.

La matière organique piège du carbone préalablement soustrait à l'atmosphère par la photosynthèse !

Un autre phénomène de stockage de dioxyde de carbone nous intéresse dans le cadre de ce dossier. Il est abiotique et met en lien direct la roche calcaire et le dioxyde de carbone : il s'agit de l'érosion des pyroxènes calciques.

Il y a près de 320 millions d'années, pendant le Carbonifère, l'importante chaîne de montagne hercynienne, composée de roche silicatée a été érodée par les pluies et les rivières. À l'époque, l'air, particulièrement riche en dioxyde de carbone a rendu ces eaux très acides. Le calcaire silicaté, grâce à l'acide carbo-

nique, s'est transformé en bicarbonate de calcium. Cette réaction de solubilisation consomme du CO₂ et a contribué ainsi au grand stockage de carbone de cette période géologique.



Les calcaires ainsi dissous sous forme carbonatée ont gagné les océans et ont été utilisés par les organismes pour construire leurs tests et leurs coquilles. Les récifs coralliens et squelettes retrouvent le cycle du calcaire présenté au point 2.1.

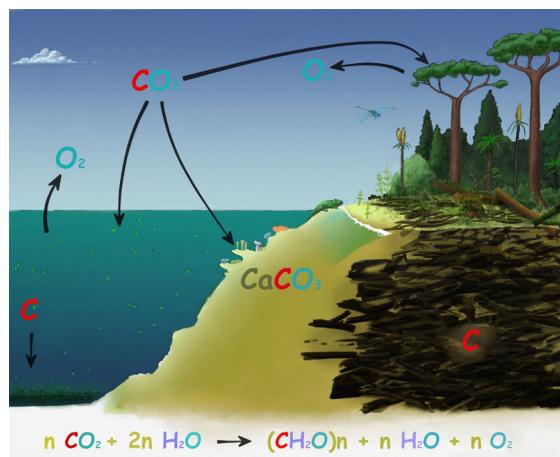


Figure 2.5. Schéma des mouvements de «stockage» du carbone au carbonifère

Il a donc fallu des millions d'années pour que, par des phénomènes biochimiques et chimiques, le dioxyde de carbone atmosphérique se fasse piéger, fossiliser dans le sous-sol.

2.3. Perturbation du cycle du carbone au-dessus de la grotte

2.3.1. Principe

Afin de satisfaire ses besoins énergétiques croissants, l'homme a trouvé dans le carbone fossilisé (charbon, pétrole, gaz,...) une ressource extraordinaire. À l'échelle de quelques générations, l'humanité est en train de réinjecter dans l'atmosphère (combustion) du carbone pour lequel il a fallu des millions d'années de stockage et d'emprisonnement dans la croûte terrestre.

De cette combustion importante et rapide de carbone fossile par l'homme, nous allons mettre en avant trois conséquences indirectes sur les conditions de développement des écosystèmes. Elles influencent particulièrement les échanges entre l'écosystème «grotte» et ceux sus-jacents.

2.3.2. Conséquences

2.3.2.1. Modification de la qualité de l'air

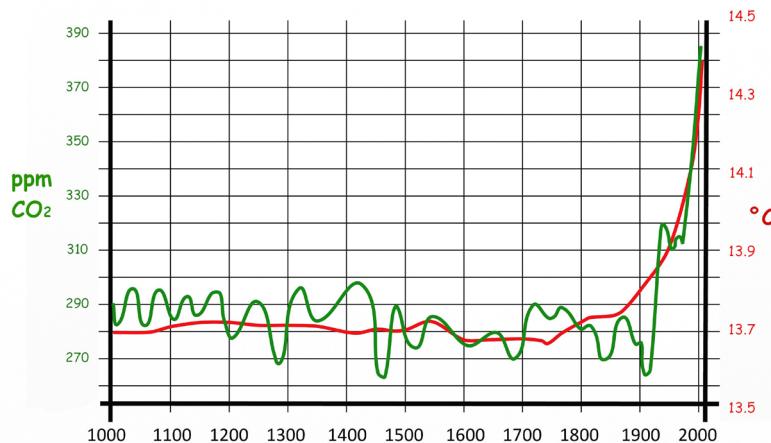
La concentration en dioxyde de carbone de l'air était de 283,4 ppm en 1839 (J.-M. Barnola -Laboratoire de glaciologie et géophysique de l'environnement, Saint-Martin-d'Hères Cedex, France et V. I. Morgan - Antarctic CRC and Australian Antarctic Division, Hobart, Tasmania, Australia - 1998).

En 2014, nous avons atteint les 400 ppm ! (figure 2.6.).

Figure 2.6.
Augmentation de la teneur en dioxyde de carbone et de la température globale.

Rapport des Nations unies «Climate change science compendium 2009».

Rapport « Climate change Science Compendium 2009 »
des Nations unies.



Les conséquences sur les biotopes naturels sont importantes, multiples et parfois inattendues!

Dans nos régions, l'une d'elles a rapidement été notée par les gestionnaires de forêt :

la rentabilité de certains peuplements forestiers a augmenté! (*Grégoire Macqueron – Futura-Sciences 2010*)

Cette conséquence inattendue est facile à comprendre : le dioxyde de carbone est un élément essentiel pour la croissance des végétaux (**voir point 2.2.1.2.**).

2.3.2.2. Augmentation de la température globale **(voir figure 2.6.)**

Ce phénomène est maintenant bien reconnu, le dioxyde de carbone fait partie des gaz à effet de serre. Son accumulation dans l'atmosphère entraîne une augmentation de la température moyenne globale.

Dans nos régions tempérées, ce dérèglement climatique a notamment un effet sur la croissance des végétaux. Certaines espèces comme le hêtre se retrouvent en marge de leur zone de répartition. Des dépérissements importants de hêtraies sont à signaler. En effet, les périodes de sécheresse de plus en plus longues et fréquentes leur sont défavorables.

Par contre, pour nos espèces plus thermophiles, ces nouvelles condi-

tions climatiques sont profitables. C'est le cas de la plupart des espèces ligneuses qui poussent sur les sols calcaires (érables, chênes, frênes,...). L'augmentation moyenne des températures et le prolongement de la saison de croissance (le printemps arrive plus tôt et l'automne plus tard) est pour l'instant favorable à la croissance des végétaux.

2.3.2.3. Acidification de l'eau de pluie et d'infiltration

Les gouttes de pluie, en traversant l'atmosphère, modifient leur nature chimique. Du dioxyde de carbone gazeux passe en phase aqueuse et réagit avec l'eau de pluie pour former de l'acide carbonique. L'augmentation croissante du taux de CO₂ dans l'air acidifie donc l'eau de pluie d'année en année.

En s'infiltrant, au contact du dioxyde de carbone du sol, l'eau poursuit son acidification sur base du même principe de déplacement d'équilibre et corrode plus activement la roche calcaire (**voir point 2.2.1.3.**).

2.3.3. Conséquences sur l'écosystème grotte

L'augmentation de la température moyenne et l'enrichissement en dioxyde de carbone de l'air ainsi que l'allongement

de la période d'activité végétative ont en effet des conséquences inattendues sur les écosystèmes situés au-dessus des grottes.

Alors que bon nombre d'espèces disparaissent, d'autres représentants du monde végétal, dopés par le dioxyde de carbone atmosphérique, voient toutes leurs fonctions vitales amplifiées. Les racines, d'autant plus actives, augmentent leurs échanges gazeux avec le sol. Dépourvues de chlorophylle, les parties souterraines des végétaux ne font pas la

photosynthèse. Leurs échanges gazeux avec le sol se limitent donc à la respiration cellulaire.

Les décomposeurs suivent cette augmentation de régime de croissance des végétaux. Les champignons, bactéries, invertébrés sont plus nombreux et respirent dans le sol.

Le dioxyde de carbone, surproduit dans le sol, va rejoindre les vides souterrains par le mécanisme de transfert vu au chapitre chimie. Il s'y accumule faute d'aération pour atteindre des records historiques.

Evolution de la concentration en CO₂ dans quelques grottes belges EK et Godissart

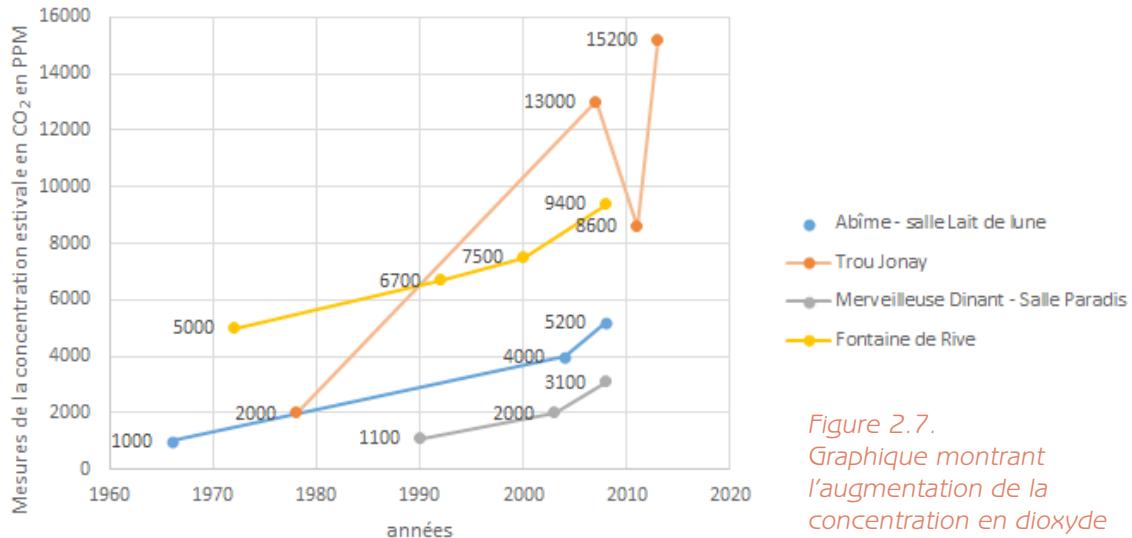


Figure 2.7.
Graphique montrant l'augmentation de la concentration en dioxyde de carbone dans quelques grottes belges (Camille Ek et Jean Godissart)

En été, dans la plupart des grottes, la concentration en dioxyde de carbone peut atteindre des valeurs élevées. Le problème d'accumulation de dioxyde de carbone dans ce milieu se fait ressentir dans de nombreuses régions du monde. Par exemple, en France, plusieurs grottes sont dangereuses et interdites au public à certaines périodes de l'année suite à des teneurs excessives en gaz carbonique. D'après le B.I.T. (Bureau International du Travail), la limite d'exposition au dioxyde de carbone durant une journée de huit heures est de 5000 ppm. En été, ce

seuil est régulièrement dépassé dans nos grottes belges (figure 2.7.). Il reste cependant sans danger vu la durée d'exposition très courte des guides et des visiteurs.

Le mécanisme de transfert du dioxyde de carbone du sol vers les grottes prend plusieurs semaines à plusieurs mois. Il est également influencé par la pluviométrie. C'est cependant suite à la période de l'année de grande activité végétative (été), avec un décalage, que les taux de dioxyde de carbone les plus élevés se font ressentir (figure 2.8.).

Evolution du CO₂ au long de l'année 2014
en deux points de la grotte-abîme de Comblain-au-Pont
EK et Godissart

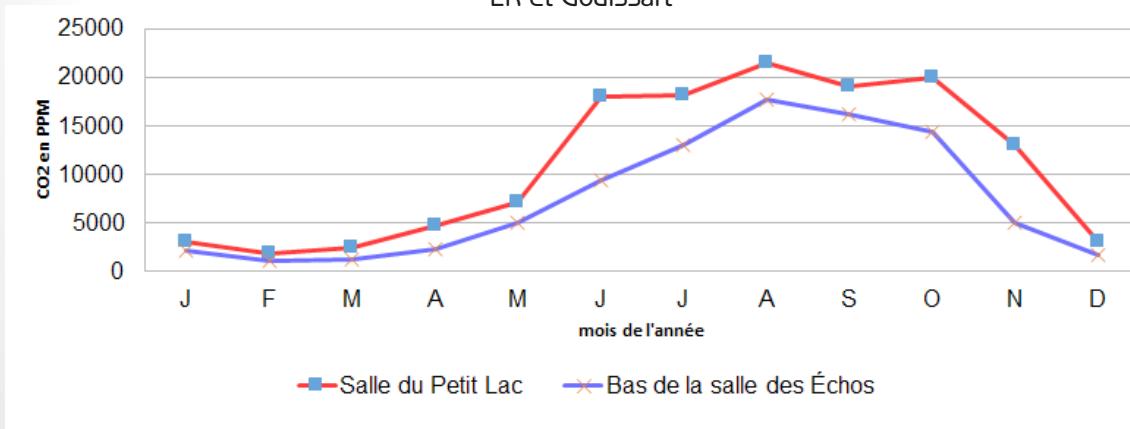


Figure 2.8.
Graphique montrant les
fluctuations saisonnières
(Camille Ek et Jean Godissart)

→ Conséquences sur la faune cavernicole

Aujourd'hui, pas ou peu d'études s'y intéressent. Des observations montrent la grande résistance des macro-invertébrés cavernicoles (insectes, araignées, vers...) à des taux de CO₂ très élevés.

«Les araignées du genre *Meta* supportent pendant une heure, sans manifester le moindre trouble, une atmosphère contenant 15 à 25 % de dioxyde de carbone... L'anesthésie provoquée par ce gaz chez les *Meta* cesse dès que les animaux sont replacés dans une atmosphère normale» (Vandel (A.), 1964 – Biospéléologie. La biologie des animaux cavernicoles. Gauthier-Villars, Paris.).

En ce qui concerne la chauve-souris, nous n'avons trouvé aucune étude pouvant établir un lien entre l'accumulation de dioxyde de carbone dans les grottes et ce petit mammifère. Nous avons juste pu observer que les chauves-souris en hibernation ne fréquentent que très peu les salles les plus riches en dioxyde de carbone, sans pouvoir faire à ce jour, un lien direct et scientifique.

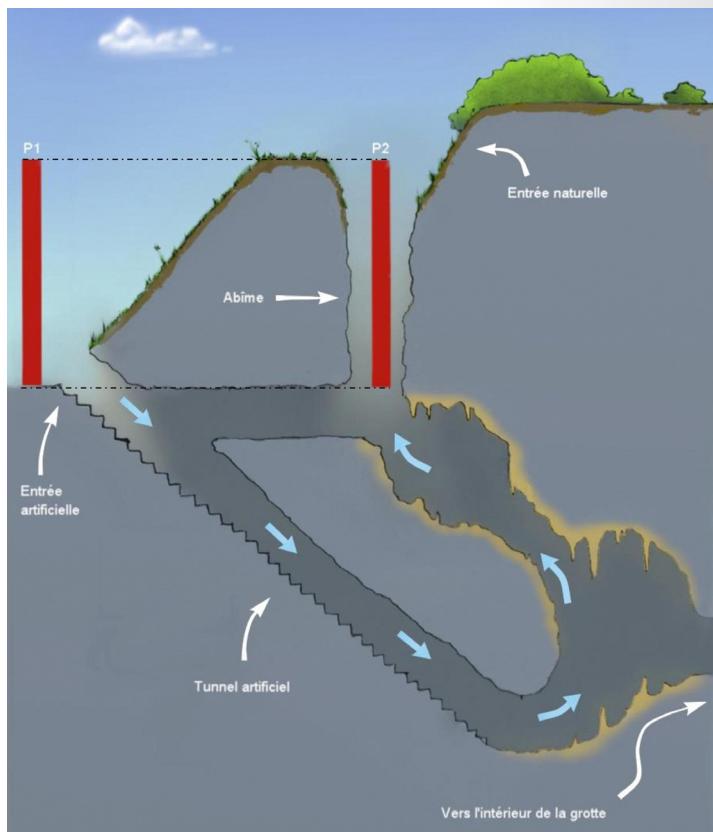


Figure 2.9. Illustration du principe de tube à vent à la grotte-abîme de Comblain.

2.3.4. Tentatives de solutions

À la Grotte de l'Abîme de Comblain, seule une partie de celle-ci montre une accumulation de dioxyde de carbone. Les premières salles, plus proches de l'entrée, profitent d'une aération dynamique naturelle appelée *Tube à vent* (figure 2.9.).

Lorsque l'air extérieur atteint une température inférieure à celle de l'air de la Grotte, l'air froid extérieur, plus lourd, s'engouffre par l'entrée artificielle. Dans la Grotte, il s'y réchauffe et devient plus léger. Il monte et s'évacue par l'«Abîme». Lorsque l'air extérieur atteint une température supérieure à celle de la Grotte, le mouvement s'arrête. L'air souterrain n'est plus renouvelé, il s'ensuit une augmentation graduelle du taux de CO₂.

Une solution pourrait être de créer artificiellement ce phénomène thermodynamique dans des grottes où le problème se pose. Des forages à partir de la surface vers les salles les plus profondes et les plus hautes pourraient être envisagés.

Il est toutefois important de réfléchir à des solutions plus durables !

L'une d'entre elles pourrait être d'enrayer ce phénomène d'accumulation de dioxyde de carbone dans les grottes et bien d'autres problèmes par la même occasion. Il est en effet plus que temps d'arrêter d'envoyer dans l'atmosphère, les réserves de carbone stockées dans le sous-sol pendant plusieurs millions d'années et ce à une vitesse surnaturelle !

2.4. Conclusions

Le mécanisme de transfert de dioxyde de carbone du sol vers les espaces libres du sous-sol (grottes) s'est emballé ces 50 dernières années. La combustion massive de carbone fossile (charbon, pétrole, gaz) et les changements climatiques rapides qui en découlent sont pointés du doigt.

Ces perturbations nettement défavorables à beaucoup d'écosystèmes et d'espèces dans le monde, stimulent au contraire le développement de nombreux représentants du monde végétal. En effet, l'augmentation de la quantité de dioxyde de carbone dans l'air (indispensable à la photosynthèse) ainsi que l'allongement de la saison de végétation et la hausse des températures moyennes sont favorables au développement de ces végétaux. Il faut cependant être conscient que les besoins en nutriments du sol grimpent en conséquence et que nos sols ne sont pas inépuisables. Il y aura donc probablement des limites à ce développement. Ces limites ne sont pas connues et sont variables d'une région pédologique à l'autre.

Pour l'instant, il est difficile de démontrer les nuisances de cette montée en puissance de la concentration en dioxyde de carbone à l'intérieur des grottes sur la faune cavernicole.

Ce que l'on sait actuellement, c'est que si le phénomène souterrain se poursuit et s'amplifie, de nombreuses grottes pourraient devoir être fermées en totalité ou en partie aux visiteurs. Dans certains cas, les exploitants

pourront mettre en place des solutions techniques (tube à vent par exemple), mais à quel prix pour la faune et pour la collectivité ?

Mais le problème global est bien plus vaste que celui rencontré dans nos grottes. Tous les jours, des espèces disparaissent, des populations humaines fuient des régions devenues hostiles à l'agriculture. De nombreuses catastrophes climatiques sont directement imputées à la combustion des énergies fossiles (pétrole, gaz « naturel » et charbon).

Chacun d'entre nous a la possibilité d'agir à son niveau. Des petits gestes au quotidien, répétés dans le temps et par un grand nombre de personnes contribuent à limiter l'émission de carbone fossile. Le passage aux énergies renouvelables pour se chauffer, s'éclairer, isoler son habitation, pratiquer le covoiturage, utiliser les transports en commun etc... ne sont pas de vains efforts. Mais ne soyons pas dupes, si le monde économique et politique n'agit pas efficacement à l'échelle mondiale en complémentarité de nos efforts, pourtant nécessaires, ceux-ci seront insuffisants pour enrayer tous ces dérèglements.

Nous sommes en droit d'espérer que des décisions soient prises à l'échelle mondiale afin d'endiguer le problème à sa source.

Enrayer la combustion du carbone fossile aurait pourtant des conséquences positives sur les écosystèmes et sur l'homme à moyen et à long terme.

À notre niveau, notre mission, à nous, scientifiques et pédagogues, reste de poursuivre le monitoring du phénomène, ainsi que d'informer un public le plus large possible de l'ampleur et des dangers liés à l'accumulation du CO₂ en milieu souterrain.

Le DIOXYDE DE CARBONE sous terre Bibliographie, Webographie

Bibliographie, webographie

BARNOLA J.-M. & MORGAN V.I.,

« Historical CO₂ Records from the Law Dome DE08, DE08-2, and D55 Ice Cores ».
<http://cdiac.ornl.gov/trends/co2/lawdome.html>.
CDIAC, 2606-1998

EK C., GODISSART J.,

2012. Projet CO₂ : rapport de l'année 2012.
Service Public de Wallonie, 38 p.

LOPEZ B.,

2009. Les processus de transfert d'eau et de dioxyde de carbone dans l'épikarst. Thèse de doctorat, Université de Bordeaux, 399 p.

GILLI E.,

2011. « Karstologie – karst, grottes et sources ».
Dunod, Paris, 256 p.

GRENON M.,

« Comment sait-on aujourd'hui que le changement climatique possède une composante anthropique? ».
http://climatic.inforef.be/conf_grenon.htm.
Université de Genève, 24-01-2006

MACQUERON G.,

« Les 10 pays qui émettent le plus de CO₂ ».
<http://www.futura-sciences.com/magazines/environnement/infos/qr/d/rechauffement-climatique-10-pays-emettent-plus-co2-1178/>.
Futura-Sciences, 13-10-2010

PIRSON P., BRIBOSIA A., MARTIN C., TADINO A., SNAUWAERT P., VAN ELSUWE R.,
2012. Chimie 5e/6e. Collection chimie-Science de base, de boeck, 192 p.

THOMAS P.,

« Les variations du taux de CO₂ dans l'atmosphère depuis 4.5 milliards d'années ».
<http://planet-terre.ens-lyon.fr/article/co2-depuis-4ga.xml>,
Lyon, 14-11-2005

VANDEL A.,

1964. Biospéléologie, la biologie des animaux cavernicoles.
Gauthier-Villars, Paris, 621p.

Rédaction :

ASBL Les Découvertes de Comblain : Nicolas Klingler.

Illustrations :

ASBL les Découvertes de Comblain : Eric Dandoy.

Photo couverture : Michel Philippe.

Remerciements :

- Apport scientifique : Camille Ek (chargé de cours honoraire à l'Université de Liège) et Jean Godissart (Union Belge de Spéléologie)
- Corrections et apports sur le fond et la forme : Ivy Meura, Catherine Robinson et Julien Goijen (ASBL *les découvertes de Comblain*) ; Vanina Dubois et Evelyne Otten (DGARNE – Service public de Wallonie) ; Dominique Renoy (CRIE d'Anlier) et Dominique Willemssens (ASBL *Réseau Idée*) ; Cyrille Tahay (régent en sciences-géographie)
- Apport pédagogique : Martine Schellings et Guy-Michel Jacques (Service général de l'Inspection de la Fédération Wallonie-Bruxelles).

Mise en page et production : **SPW | Éditions**

Service public de Wallonie - Direction de l'Édition - DGT - Alice Collard.

Date d'édition :

Décembre 2015

Editeur responsable :

ASBL Les découvertes de Comblain-au-Pont.

Place Leblanc n°7,

4170 Comblain-au-Pont.

www.decouvertes.be



Service public
de **Wallonie**



DIRECTION GÉNÉRALE OPÉRATIONNELLE
DE L'AGRICULTURE, DES RESSOURCES NATURELLES
ET DE L'ENVIRONNEMENT



WALLONIE-BRUXELLES
ENSEIGNEMENT

D'où vient et où va le CO2
des grottes