

Le karst, paradis du spéléo, fortune du plombier, cauchemar de la ménagère...

La karstologie expliquée par un nul

Karst Marx BROTHER



Figure 1 : un spéléologue sortant de spéléo.
Cliché Gwénaëlle Thépot.

Certains d'entre nous vont faire de la spéléo (figure 1) ; d'autres, plus « scientifiques », vont dans le « karst » (à tes souhaits) (figure 2)... Et en fin de compte, tout le monde se retrouve au même endroit ! Alors ce fameux « karst » des scientifiques, kézaco ? Dès qu'on leur pose cette question, les initiés balancent une série de discours ésotériques farcis de calculs et de formules, qui, il faut l'avouer, saoulent parfois plus qu'ils n'excitent. Pourtant, chacun d'entre nous connaît pour l'essentiel ce que racontent avec leurs mots à eux les « karstologues », tout simplement parce que nous avons tous deux y eux et que, dans le karst, nous nous y baladons tous... Comme monsieur Jourdain faisait de la prose sans le savoir, nous faisons souvent de la karstologie sans le savoir. Y compris, vous allez voir, à la maison, dans notre cuisine ou notre salle de bains (ah bon ?)...

Cet article propose de décrire ou de préciser, sans chichis et sans gros mots, quelques-uns des fondamentaux sur lesquels s'appuie cette mystérieuse science ; vous trouverez dans cette approche écrite par un simple spéléo, plein de notions qui vous sont familières, et certainement d'autres qui le sont moins ; les spécialistes pourront bien sûr trouver matière à discuter quelques détails, mais on va laisser les pinailleurs harceler les diptères (les mouches, quoi) en plein vol.

La question de base, c'est : pourquoi y a-t-il des trous dans le « karst » et seulement là ? Je vous propose d'aller voir sous les jupes de la montagne pour comprendre ce qui s'y passe...



Figure 2 : un karstologue sortant du karst.
Cliché Gwénaëlle Thépot.

Just call me « karst »

D'abord, où ont-ils été chercher un nom aussi imprononçable ? En Slovénie. Ah, bah oui, alors là bien sûr ! C'est le nom d'un plateau calcaire qui chevauche la frontière italo-slovène. Les Italiens l'appellent le Carso, et les Slovènes le Kras. Bon, d'accord, mais là, du coup, on ne comprend plus vraiment : Carso, Kras, quel rapport avec « karst » ?

Pour comprendre, il faut remonter en 1689, où un érudit slovène, le baron Janez Vajkard Valvasor (figure 3), publie un bouquin encyclopédique sur la faune, la flore et surtout la géographie de la Slovénie qui s'appelle à l'époque le duché de Carniole. Il y décrit les

caractéristiques particulières du Kras, truffé de grottes et de gouffres, où des rivières disparaissent sous terre. Bref, on connaît tous très bien tout ça, c'est dans ce genre de massif qu'on passe (dans le noir...) le plus clair de notre temps. Un seul hic : notre bon baron slovène écrit son bouquin... en allemand. Teufel ! Mais pourquoi en allemand ?

Eh oui : à l'époque, la Carniole, comme pratiquement toute l'Europe centrale, fait partie du Saint Empire Romain Germanique. « Romain » certes, mais seulement côté religion, car côté culture, c'est du germanique pur et dur... Dans le S.E.R.G., chez les



Figure 3 : le baron Valvasor; le bandeau est rédigé en langue germanique et le baron y est nommé « Herr Iohann Weichard Valvasor ».

gens bien, il est de bon (teu)ton d'utiliser la langue de l'Empire, et pas les langues locales et autres patois de culsterreux. Du coup, officiellement, le Kras des paysans slovènes s'appelle le Karst, et, comme plus tard Liszt germa-

nisera son prénom Férenc en Franz, bien plus musical aux impériales oreilles, Janez Vajkard Valvasor signe Johann Weichard Valvasor (figure 3). L'ajustement des noms propres à la culture dominante est une règle universelle : bien des Corses, Bretons, Occitans, Basques, Provençaux actuels de ma connaissance pourraient nous en conter là-dessus...

Lorsque les géographes de la fin du XIX^{ème}-début du XX^{ème} siècle (le grand É.-A. Martel en tête de file) décriront les caractéristiques des plateaux calcaires, la Carniole étant encore sous domination germanique, ils martèleront (©) le nom Karst jusqu'à en faire le nom générique. Mais après la première guerre mondiale, la Carniole devient en partie une province italienne (elle ne deviendra yougoslave qu'en 1945) où l'on parle officiellement italien, où le

Donc, on sait maintenant qu'un karst, par définition, ça ressemble à un plateau calcaire avec des gouffres, des grottes, des rivières souterraines. Bon, évidemment les spécialistes pourraient nous parler de « pseudo-karst », d'« hyper-karst », bref, de trucs bizarres qui ne sont pas du calcaire et qu'on peut plus ou moins qualifier de karstique en se tortillant un peu, n'empêche que le karst, c'est presque toujours du calcaire, alors laissons brouter les moutons à cinq pattes. Donc, du calcaire. Pourquoi le calcaire donne-t-il ce relief si bizarre, avec des gouffres, des grottes, des cavités partout ?

On lit souvent que les grottes et les gouffres sont le résultat de la dissolution du calcaire par l'eau de pluie.

Accrochez-vous une minute : rien n'est plus faux.

En effet, le calcaire n'est absolument pas soluble dans l'eau, pas du tout, rien de rien. Je sais, vous ne me croyez pas. La preuve ? Rien de plus simple, vous allez voir : allons dans la cuisine de maman et jouons un peu aux petits chimistes.

Prenez une bouteille de préférence incolore d'eau minérale gazeuse, neuve, peu importe la marque. Et une

autre, vide. Faites bouillir un bon litre d'eau du robinet dans une casserole, et laissez-la refroidir. Vous verrez, au fond de la casserole, il y aura probablement un petit dépôt de poussière blanche, mais non c'est pas la casserole qui était sale, on en reparlera plus tard. En attendant, remplissez la bouteille vide avec l'eau bouillie bien décantée.

Prenez maintenant un bon calcaire bien pur, et broyez-le finement (vous avez bien un marteau à spits à portée de mains ?) ; ou bien si vous avez un perfo, faites un trou dans le plus proche lapiaz, la poussière de perçage de lapiaz c'est très bien pour cette expérience. Vous tamisez, et avec un pèse-lettre (ou sinon au pif), vous prenez deux petits tas de farine de calcaire de 3 grammes chacun. Vous mettez un tas dans la bouteille d'eau bouillie, vous remuez pendant trente secondes, et vous laissez reposer. Vous débouchez la bouteille d'eau gazeuse, vous y mettez l'autre tas de farine de calcaire, vous rebouchez (en serrant bien le bouchon à vis, sinon...), vous remuez bien et vous laissez reposer.

Au bout de dix minutes, qu'est-ce qu'on voit ? Dans la bouteille d'eau

Karst s'appelle Carso, où Adelsberg s'appelle Postumia (Postojna en slovène) ; et puis, dans la France de l'après-Verdun, ce qui sonne un peu trop germanique n'est pas, mais alors pas du tout, bien vu : É.-A. Martel fulmine alors à l'Académie des sciences contre la terminologie « karst », « karstique », « karstologie », bien trop « casque à pointe » à son goût, et propose à la place les termes bien de chez nous (« Français, monsieur ! »), « causse », « caussique », « caussologie ». Trop tard, le mot avait creusé sa place... Dommage, car aujourd'hui les spéléologues parleraient aux caussologues... Et sûr que ce serait moins compliqué !

De toute façon, cela ne change pas grand-chose car Carso, Kras, karst, causse, calcaire, tout cela vient sans doute de la même racine latine « calx, calcis » qui veut dire la chaux, que l'on fabrique en grillant la pierre calcaire qu'on ramasse, comme de par hasard, sur les causses. Mais ceci est une autre histoire...

Karst et calcaire

bouillie, il y a toujours plein de farine déposée au fond, et, si vous avez broyé bien finement le calcaire, l'eau est plus ou moins laiteuse. En revanche, dans l'eau gazeuse, il ne reste au fond que les plus grosses particules de calcaire, et l'eau est pratiquement limpide. La majeure partie du calcaire a donc disparu, où est-il passé ?

Cette expérience montre que les deux eaux n'ont pas les mêmes propriétés : or, quelle est leur différence ? C'est simple : l'eau bouillie est chimiquement pure, tandis que l'eau gazeuse contient du gaz (La Palisse...). On constate donc que l'eau pure ne dissout pas le calcaire ni ne l'altère, que dalle, rien, que pouic, tandis que l'eau gazeuse, d'une manière ou d'une autre, « mange » le calcaire : par conséquent, ce qui grignote le calcaire n'est pas l'eau en elle-même, mais le gaz qu'elle contient, ou plus exactement l'association de l'eau et du gaz. Or, le gaz contenu dans les eaux gazeuses et les sodas (et la bière aussi, mais ce serait tellement dommage de gâcher !) est tout simplement du gaz carbonique. Ah ah, nous y voilà, on en entend tout le temps parler de celui-là...

Acide karst bonique

Comme on l'a vu dans notre bouteille d'eau bouillie, le calcaire n'est pas soluble dans l'eau pure ; mais il a une propriété spécifique : en présence d'un acide même faible (genre le vinaigre) son composant principal, le carbonate de calcium, est attaqué par l'acide et donne une substance généralement soluble ; cette roche qui, à voir comme ça, semble dure et solide, est littéralement « bouffée » par du simple jus de citron !

Contrairement à ce qu'on est tenté de dire (et que l'on dit souvent !), ce n'est pas une dissolution, car quand un corps se dissout, il ne change pas de formule chimique : par exemple le sel de cuisine NaCl, une fois dissous dans l'eau des nouilles, c'est toujours NaCl ; ici, le carbonate de calcium est modifié en citrate de calcium (si on a utilisé du jus de citron), acétate de calcium (si on a utilisé du vinaigre) ou « autrechosate » de calcium (si on a utilisé autre chose) : c'est une réaction

chimique. Quand notre fée du logis unique et préférée dit que le vinaigre blanc dissout le calcaire des robinets, eh bien elle parle mal... Le vinaigre *corrode* le calcaire des robinets, je sais, ça fait peur, mais c'est la vérité.

Or dans la nature, des acides, justement, il y en a plein, dont un faible mais très courant : l'acide carbonique. Pour avoir de l'acide carbonique (H_2CO_3 pour les intimes), il faut que du gaz carbonique (CO_2) se mélange avec de l'eau (H_2O) : faites l'addition, vous verrez, ça tombe juste. Ce n'est pas non plus une simple dissolution, puisque la formule chimique change : le gaz carbonique devient autre chose ; c'est donc encore une vraie réaction chimique.

Voilà donc ce qu'il y avait dans notre bouteille d'eau minérale qui mange le calcaire : de l'acide carbonique ! Or, du gaz carbonique, dans la nature, il y en a partout, surtout là où il y a des plantes et des bestioles car c'est un sous-

produit du métabolisme ; quant à l'eau, on peut dire que c'est assez courant (☺) dans la nature... Autant dire que dans des régions végétalisées et pas trop arides, on devrait pouvoir fabriquer pas mal d'acide carbonique. D'où les lapiaz, les gouffres, les grottes, bon ben salut et à bientôt... Eh, pas si vite, c'est pas tout à fait aussi simple !

Car il ne suffit pas de mettre en contact l'eau et le gaz carbonique pour que les molécules s'accouplent immédiatement avec frénésie, genre soirée mousse : en fait, l'eau peut se combiner avec une quantité de gaz carbonique très variable en fonction de la pression et de la température. Plus la température est élevée, et moins le CO_2 va pouvoir se combiner à l'eau ; en revanche, plus la pression augmente, et plus le CO_2 va se combiner. Diabre ! Ça se corse ! Mais attendez, c'est pas si compliqué que ça en a l'air, faisons encore un peu de chimie de cuisine pour comprendre ça...

Karst au logis

Lorsque l'on fait chauffer l'eau pour faire cuire les nouilles (figure 4), on observe deux stades avant l'ébullition franche :

- Dans un premier temps, des milliers de bulles minuscules se forment sur les parois de la casserole, qui se décrochent et viennent pétiller à la surface (figures 5 & 6).
- Dans un deuxième temps, sur le fond de la casserole, on voit de grosses bulles se former mais elles disparaissent avant d'atteindre la surface (figure 7). Ce n'est que lorsque toute l'eau est bien chaude que ces grosses bulles parviennent à la surface, et c'est seulement là qu'on voit la vapeur d'eau (figure 8). Et là, c'est le bon moment pour y mettre les spaghetti.

Au second stade, les grosses bulles sont des bulles de vapeur d'eau, qui ne crèvent à la surface que si la température de tout le liquide est suffisamment élevée pour que la vapeur ne se condense pas en cours de route, disons égale à $100^\circ C$ partout : c'est donc une ébullition. Tandis qu'au premier stade, l'eau ne bout pas,



Figure 4 : le dispositif expérimental destiné à mettre en évidence le dégazage provoqué par l'élévation de température ; l'huile d'olive et les noix ne sont pas des ingrédients indispensables à l'expérience. Cliché de l'auteur.

simplement l'élévation de la température provoque la libération des gaz dissous ou combinés, dont notre fameux CO_2 .

Conclusion : plus l'eau est chaude, plus le gaz part, notamment celui qui nous intéresse : le gaz carbo-

nique, CQFD. Dans l'eau bouillie, il n'y a pas de CO_2 , c'est pourquoi tout à l'heure elle était incapable de grignoter le moindre grain de calcaire. Il n'y a même carrément plus de gaz du tout : si vous la laissez refroidir et que vous y mettez votre poisson rouge, la pauvre bête ne tardera pas à mourir asphyxiée

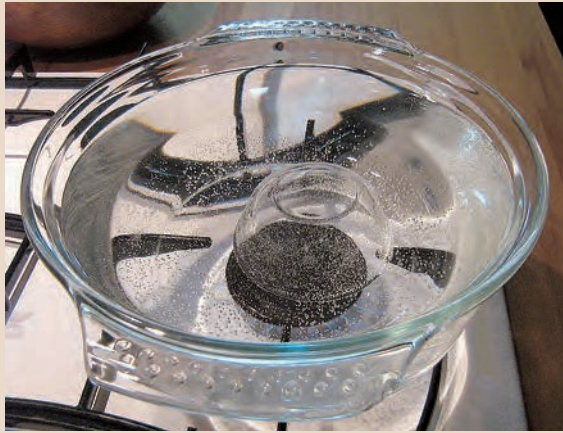


Figure 5 : phase de dégazage : dès que l'eau chauffe de quelques dizaines de degrés, les gaz dissous ou combinés dans l'eau sont libérés sous forme de myriades de petites bulles accrochées aux surfaces. Cliché de l'auteur.



Figure 6 : l'eau n'est pas encore à 100°C, mais elle a libéré pratiquement tous les gaz ; ceux qui ont été libérés sous la coupelle renversée y ont formé une bulle qui les met bien en évidence. Le volume important de la bulle est essentiellement dû au fait que, à cette température relativement élevée, les gaz sont dilatés. Cliché de l'auteur.



Figure 7 : aux alentours de la zone de chauffe, l'eau arrive à 100°C ; les premières bulles de vapeur (plus grosses que les bulles de gaz) se forment, mais elles se condensent en traversant la couche superficielle d'eau qui est à moins de 100°C et n'atteignent pas la surface qui ne présente pratiquement aucune agitation ; en revanche, dans le fond de la casserole, ça s'agite tellement que la coupelle s'est renversée. Cliché de l'auteur.



Figure 8 : la température de l'eau est de 100°C de façon homogène : les bulles de vapeur crèvent maintenant la surface. On peut mettre les pâtes. Cliché de l'auteur.

car elle ne trouvera pas la moindre molécule d'oxygène à se mettre sous les branchies. Laissez donc votre poisson rouge dans son bocal, mais en revanche, ne laissez pas les spaghetti trop cuire : c'est pas parce qu'on est des karstomachinologues qu'on doit manger de la colle.

Karst en bouteille ou karst à la pression ?

Pour l'histoire de la pression, ce n'est pas plus compliqué : prenez une eau minérale gazeuse conditionnée en bouteille plastique, neuve (peu importe la marque, et ça marche aussi avec les sodas). Palpez la bouteille : elle est dure, presque indéformable (figure 9). Ouvrez-la : d'abord on entend « pschitt » (c'est du gaz sous pression qui s'échappe), puis deux phénomènes se produisent :

- en une fraction de seconde les parois de la bouteille se couvrent de bulles, qui pétillent rapidement en surface (figure 10) ;
- la bouteille devient moins dure (il n'y a pas de figure, quand j'ai essayé de photographier ça, j'ai foutu de la flotte partout, un vrai désastre).



Figure 9 : dans un récipient pressurisé, le CO₂, combiné avec l'eau en raison de la forte pression, est stocké sous forme d'acide carbonique.



Figure 10 : dès que la pression baisse, une partie de l'acide carbonique se décompose et du CO₂ reprend sa forme gazeuse.

En fait, tant que la bouteille est fermée, le gaz qui est entre l'eau et le bouchon est sous forte pression (pschitt) : c'est ce qui rend la bouteille pressurisée si dure, et c'est surtout ce qui permet à l'eau de combiner une grande quantité de gaz. Dès qu'on ouvre le bouchon, la pression chute (la bouteille reprend sa dureté normale), et l'eau ne peut plus retenir le CO₂, qui retourne à sa forme gazeuse et bulle abondamment.

Conclusion : plus on appuie fort sur les molécules de gaz, plus elles vont avoir tendance à s'imbriquer dans celles d'eau. Cette expérience marche aussi avec d'autres liquides gazeux (figure 11), mais elle n'est pas toujours parfaitement convaincante à la première canette, naturellement il ne faut pas gâcher, et après la troisième on refait la relativité d'Einstein, ce qui n'est pas notre propos aujourd'hui.

Ce qu'il est important de garder en mémoire, c'est que, comme le mariage apparemment, la combinaison chimique entre l'eau et le gaz carbonique est réversible, ça se combine et ça se décompose : en fonction de la concentration initiale de gaz carbonique dans l'eau et l'air (faut bien qu'il y en ait au départ sinon ça va pas marcher) d'une part, et des variations de la pression et de la température d'autre part, l'eau peut décomposer son acide carbonique et libérer le gaz dans l'air, ou bien au contraire à nouveau capturer du CO₂ et refabriquer de l'acide carbonique. En fait, il s'installe une relation d'équilibre entre l'eau et l'atmosphère qui ajuste constamment la quantité d'acide carbonique dans l'eau en fonction des conditions physico-chimiques du milieu, et qui aboutit à des échanges eau-gaz : eh, les gars, avec nos bouteilles et nos casseroles, on vient de fabriquer une vraie phrase de karstologue !

Bon, voilà pour l'eau et le gaz carbonique ; et le calcaire dans tout ça ?



Figure 11 : et voici une des plus agréables façons de le prouver...

Karst cela ne tienne

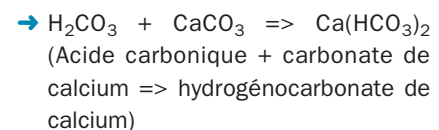
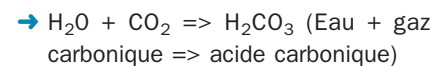
On a vu que l'eau contiendra d'autant plus d'acide carbonique que :

- la concentration en CO₂ est élevée dans l'atmosphère (ben ça, évidemment) ;
- la température est basse (cf. la casserole de nouilles) ;
- la pression est élevée (cf. la bouteille de soda ou de bière, selon vos goûts).

On a vu que le terme de dissolution ne s'applique pas correctement au calcaire, puisqu'il ne se dissout pas dans l'eau mais est en réalité corrodé par l'acide carbonique (il est vrai que la « dissolution » du calcaire est tellement passée dans le langage courant que même les karstologues l'utilisent parfois ! Ah les boulets !). En présence d'acide carbonique, le carbonate de calcium va donc réagir et former un nouveau corps chimique, qui répond au doux nom d'hydrogénocarbonate de calcium (Ptouy !), et qui, lui, est soluble.

Allez, pour le fun on se fait la formule chimique sans se prendre la tête

avec les histoires d'ions, vous allez voir, en définitive c'est aussi simple que le jeu de Meccano, il suffit de compter sur ses doigts :



Le compte est bon... Notre schéma commence à être complet : de l'eau, du gaz carbonique (le plus possible), un peu de pression, pas trop de chaleur, et notre calcaire insoluble se transforme en hydrogénocarbonate de calcium soluble qui fout le camp avec la flotte : voilà nos lapiaz, voilà nos puits, voilà nos galeries... Sur le terrain, nos 3 fameux facteurs physico-chimiques sont influencés par plein de petites causes précises et variées, on reviendra un autre jour sur ces détails pratiques très rigolos.

Il reste une karst à jouer

Pour faire le tour de la partie strictement chimique du processus, il faut préciser que, pas une messieurs-dames mais les deux, je dis bien les deux, réactions chimiques qu'on a décrites sont réversibles : contrairement au citrate ou à l'acétate de calcium, l'hydrogénocarbonate de calcium est instable (tu m'étonnes, avec un nom pareil !), il a besoin d'avoir un petit peu d'acide carbonique dans le nez pour rester en forme. Et justement, on l'a vu, l'acide carbo-

nique n'est pas stable non plus : il suffit que la quantité de CO₂ disponible dans le milieu ambiant baisse, que la pression baisse ou que la température augmente pour qu'il commence à se décomposer en gaz carbonique et en eau. Du coup, sur qui compter, je vous le demande ? Si le CO₂ se barre, moi je vois venir le truc que l'hydrogénocarbonate il va poser son hydrogénomachin-chose et retourner vite fait bien fait au carbonate de calcium insoluble comme au bon vieux temps !

Figure 12 : l'eau de notre « dispositif de bullage » refroidit, et en surface apparaît un voile de fines particules blanches : c'est le carbonate de calcium qui, sous forme d'hydrogénocarbonate, était en solution. L'ébullition a décomposé l'acide carbonique en CO_2 qui est parti avec les bulles, donc l'équilibre de la solution a été déplacé vers la précipitation du carbonate : les karstologues disent qu'elle est sursaturée à l'égard du carbonate. Dans les gours calmes des cavités peu fréquentées, vous voyez parfois de la calcite flottante : c'est, à la cause près parce que sous terre il n'y a pas d'ébullition, le même processus...
Cliché de l'auteur.



Résultat : si les facteurs de température, de pression, de concentration de CO_2 varient, l'équilibre de la solution va varier soit vers « je fabrique de l'acide carbonique qui bouffe le calcaire qu'il y a autour », soit au contraire vers « je relâche le gaz carbonique et je transforme l'hydrogénocarbonate de calcium en carbonate insoluble » (on appelle ça la précipitation) : et voilà la calcite, voilà nos stalactites, nos draperies, nos gours, nos stalagmites... On dit souvent qu'elles se forment par évaporation de l'eau, mais en réalité c'est surtout parce que de l'eau fortement hydrogénocarbonatée (on dit souvent « saturée », ça arrache moins le bec) arrive dans une galerie ventilée où il y a moins de CO_2 , et que du coup l'équilibre de la solution d'hydrogénocarbonate se déplace vers la précipitation du carbonate. Pas besoin d'évaporer l'eau pour ça. Du reste, souvent il caille dans les trous, et il y a quand même des concrétions, c'est bien la preuve.

Là encore, inutile de sortir de sa cuisine pour voir ça, pour peu que vous habitiez une région où l'eau est soit-disant « calcaire » : soi-disant, parce qu'avec ce que l'on a vu, on sait maintenant que l'eau n'est pas « calcaire », puisque le calcaire n'est pas soluble ; maintenant, à nous, on nous la fait plus, celle-là... En revanche, l'eau peut effectivement contenir de l'hydrogénocarbonate de calcium, ce dont *a priori* on se fiche royalement puisque, on le sait aussi maintenant, ce corps est soluble. Alors, pourquoi on dépense une fortune en plombiers, détartrants et autres produits anti-calcaires ? Principalement pour deux raisons.

D'abord, quand l'eau arrive chez vous, elle est sous pression, généralement entre 2 et 3 bars en aval du

compteur, c'est-à-dire plus de 2 fois la pression atmosphérique : l'acide carbonique et l'hydrogénocarbonate naissent donc dans le bonheur dans vos canalisations. Mais quand ils arrivent au robinet, soudain, c'est le drame : brutalement, à la sortie du bec, la pression chute à 1 bar (pression atmosphérique), et en plus l'air ambiant contient très peu de gaz carbonique (enfin, j'espère pour vous). L'équilibre de la solution se déplace donc, naturellement, vers la libération du CO_2 et la précipitation du carbonate : voilà pourquoi les robinets s'entartrent aussi rapidement, tout ça c'est la faute aux karstologues... Dans les mousseurs des robinets, c'est le summum puisque l'acide carbonique y est carrément brassé avec de l'air pauvre en CO_2 : dégazage et précipitation à bloc ! Démontez-les, vous verrez, c'est plein de concrétion là-dedans. Tandis que dans vos canalisations, sauf exceptions régionales, l'équilibre de la solution est assuré par la pression et il n'y a pas de dépôt. Tout un argumentaire de vente de camelots qui se casse la gueule !

Enfin, pas de dépôt, pas de dépôt... Sauf si on fait varier un autre facteur d'équilibre : la température de l'eau. Eh oui, c'est ce qui se passe dans votre cumulus, votre cafetière et votre machine à laver (et même sur le robinet d'eau chaude de votre douche qui est tout le temps tout terne et tout blanc), c'est ce qui fait les choux gras des marchands de lessive. C'est aussi ce qui s'est passé dans notre casserole, au début, quand on a fait bouillir de l'eau du robinet : vous vous souvenez le petit dépôt blanc (figure 12) ? Eh bien c'est l'hydrogénocarbonate, qui

avec la chaleur a perdu son H_2CO_3 (son acide carbonique, quoi) et qui a précipité en carbonate. Lequel est insoluble. Voilà, la boucle est bouclée : on a fait maintenant le tour du processus chimique de corrosion du calcaire et de concrétionnement, le tout sans sortir de notre cuisine et de notre salle de bains... Ah dis donc, finalement la karstologie c'est peinarde, non ?

Bon, on se résume :

pour faire de la karstification, il faut minimum une casserole de spaghetti al dente et quelques bières, on peut pas faire à moins ; on a parlé de cafetière, mais le sujet reste à développer.

Si cela vous a plu, la prochaine fois on parlera des conditions de corrosion sur le terrain, et de l'organisation du karst dans l'espace. Parce que, au même titre que la spéléo, même s'il s'agit de trous, n'est pas un sport en chambre (oui, je sais, celle-là est très moyenne...), la karstologie n'est pas qu'une cuisine même moléculaire : sur le terrain il y a aussi plein de choses intéressantes et amusantes... Alors, à bientôt sur le karst ?

Est-ce que les karstologues comprennent tout dans le karst ?

par Karst Marx BROTHER

La karstologie expliquée par un nul

Résumé de l'épisode précédent

Comprendre pourquoi les massifs calcaires se retrouvent tout bouffés de trous dans lesquels nous autres spéléologues nous aimons à nous engouffrer, ça a l'air super-compliqué comme ça au premier abord, mais dans l'épisode précédent (*Spelunca* n° 124, décembre 2011), on avait vu que les processus sont originaux, d'accord, mais qu'en réalité ils sont « vachement » courants et même qu'on les retrouve dans la vie de tous les jours :

- ✘ En cuisant une plâtrée de spaghettis, on avait vu que, si parfois il y a de l'eau dans le gaz, en tout cas y'a toujours du gaz dans l'eau... Dès que ça commence à chauffer, le gaz part (Théorème de la Casserole), mais tant qu'il fait frais, discrètement, le gaz se combine mine de rien avec l'eau.
- ✘ Cuisiner, ça donne soif, et réfléchir encore plus ; en décapsulant une cannette, on a compris que le gaz se combine d'autant plus volontiers avec l'eau qu'on lui met la pression : si la pression baisse, le gaz part (Théorème de la Binouze).

- ✘ Une « manip » rigolote avec de l'eau minérale gazeuse nous a montré que lorsque ce gaz est du gaz carbonique, cela donne un acide, l'acide carbonique (pourquoi se compliquer l'existence?), qui mange le calcaire (insoluble) en donnant un corps soluble qui s'appelle hydrogénocarbonate de calcium et c'est bien fait pour lui (Théorème de la Sampé).
- ✘ Puis, en faisant la vaisselle, on s'est aperçus que, non seulement l'acide carbonique n'est pas très stable et relâche son gaz dès que ça chauffe un peu ou que la pression baisse (Théorème de la Casserole et Théorème de la Binouze inversés), mais qu'en plus l'hydrogénocarbonate de calcium (Ptouy !) n'est pas très stable non plus et se retransforme en calcaire insoluble dès qu'il y a moins de gaz carbonique dans le bazar (Théorème du Bec de Robico), ce qui n'arrange pas la robinetterie mais assure des lendemains qui chantent aux

plombiers. Et si vous ne me croyez pas faites donc la vaisselle de temps en temps.

Sans sortir de la cuisine et surtout sans nous enfermer dans une bibliothèque, nous avons donc compris le processus chimique qui, à l'échelle du caillou, creuse des trous dans le calcaire et fabrique les concrétions. Mais à l'échelle d'un massif, d'un de ces fameux « karsts », concrètement, comment ça s'organise ce bouffage de calcaire ? Là encore, pas besoin de s'esquinter avec des expressions trop alambiquées (moi, l'alambic, c'est pas pour la karstologie que je le trouve le plus intéressant...), vous allez voir, les premiers qui ont compris tout ça n'étaient pas beaucoup mieux renseignés que nous au départ, ils sont tout simplement allés sur le terrain et ont observé, puis réfléchi... Avant de mettre tout ça dans des bouquins qui à force sont devenus de plus en plus compliqués, parce que c'est plus ou moins toujours comme ça, la Science !

Y'a karst regarder...

On dit souvent que l'un des premiers qui, à la fin du XIX^e siècle, ait vraiment compris quelque chose au karst n'est autre que notre grand Édouard-Alfred Martel. Cocorico, donc. Dans le détail, il a été sur le terrain, ouvert ses yeux, cogité... Et aussi pas mal discuté avec son ami Jovan Cvijić, géographe austro-serbe qui justement publiera en 1893, au tout début de la carrière spéléologique de Martel, un bouquin nommé comme de par hasard « Das Karstphänomen ». Les idées naissent rarement d'un seul homme, et Martel partagera, et pour tout dire, reprendra, beaucoup de ses idées.

Et du coup, de ses termes : c'est pas pour rien que vous entendez parler de « ponors », « ouvala », « poljé » : pas bien franchouillard, tout ça, plutôt typé Balkans, non ? En tout cas, ce qui est sûr c'est que celui qui en a parlé le plus et le plus fort, c'est Martel, au point que sa théorie est au cœur du modèle mondialement admis. Enfin, celui en tout cas qu'on vous apprend dans tout stage digne de ce nom et que vous trouvez dans tout bon manuel disponible pour une somme modique chez votre libraire habituel.

Édouard-Alfred naît en 1859 près de Paris. On n'est qu'au tout début de la

révolution industrielle, les congés payés ne seront inventés que trois quarts de siècle plus tard ; rares sont ceux qui ont les moyens et la liberté de voyager, et à l'époque se rendre à l'étranger (ne serait-ce qu'en Europe) est carrément une aventure : pas de GPS, pas d'autoroutes, et même carrément pas de bagnoles... Or la famille Martel, aisée, fait ce que seuls les riches pouvaient faire à l'époque : du tourisme ! Les Martel possèdent même une maison de campagne dans les Causses où le jeune Édouard-Alfred traîne ses godillots avec ses cousins Gabriel et Marcel Gaupillat,

fascinés comme tous les gamins (et comme vous et moi, on n'a pas dû grandir dans nos têtes) par les grottes, les gouffres et les avens qui y baillent.

Un beau jour de 1879, la p'tite famille va visiter une province alors autrichienne, la Carniole. Les Martel y parcoururent le plateau du Karst (aujourd'hui

« Kras » en slovène), truffé de ces curiosités naturelles dont raffolent les touristes de l'époque, toujours plus ou moins frottés de culture, comme par exemple la rivière Pivka qui s'engouffre dans les gigantesques grottes d'Adelsberg (aujourd'hui Postojna) et disparaît dans le noir ; ou encore la Reka, qui, une dizaine de kilomètres après sa source, s'engouffre sous terre dans la grotte de Sankt Kanzian (aujourd'hui Škocjan) et, après un cours souterrain d'une quarantaine de kilomètres jalonné sur le plateau

de gouffres et de dolines, revoit le jour et donne naissance à la rivière Timava (aujourd'hui Timavo, en italien). De ces rivières souterraines, grottes, gouffres, le Karst en est farci !

Édouard-Alfred a vingt ans, et même s'il est prévu qu'il fasse avocat comme papa, il est passionné de géographie : il est frappé par les ressemblances entre les paysages qu'il voit sur le Karst et ceux qu'il connaît depuis tout gamin sur les Causses. On peut même dire que ces rivières qui disparaissent sous le Karst, coulent sous terre et ressortent des kilomètres plus loin le marqueront intellectuellement à vie : du coup, ce n'est sûrement pas un hasard si, neuf ans plus tard, en 1888, la première véritable expédition souterraine de Martel, considérée comme fondatrice de la spéléologie moderne, est la traversée du cours souterrain de la rivière le Bonheur, qui comme la Reka (enfin, en plus court quand même...) s'enfonce sous terre sur le causse de Camprieu et ressort à la grotte de Bramabiau. Ce concept de perte-résurgence, qu'il appellera « percée hydrogéologique » s'ancrera dans l'esprit de Martel et donnera naissance à sa conception du creusement des grottes et des gouffres, causé selon lui par des pertes (actuelles ou anciennes) de cours d'eau de surface et la circulation de rivières souterraines (photographies 1, 2 et 3).

À partir de la traversée de Bramabiau, il va multiplier les explorations et les publications avec l'ambition évidente de se tailler une reconnaissance scientifique ; à son grand regret, il ne sera jamais membre de l'Académie des sciences, où ses idées bien arrêtées et sa façon plutôt rugueuse de les défendre ne lui ont pas valu que des amis... En tout cas la quantité colossale de communications qu'il y fera imposera aux scientifiques le modèle du Karst, avec ses gouffres, ses pertes, ses rivières souterraines, ses sources, comme LE modèle général de creusement dans les massifs calcaires, sur lequel s'appuieront la quasi-totalité des géomorphologues scientifiquement corrects pendant près d'un siècle.

Alors bon, le karst de Martel et de ses héritiers, comment ça marche ? Essayons de voir ça comme je le vois, avec le regard du simple spéléologue de terrain (qui est finalement celui des premiers karstologues), et avec les mots des karstologues les plus utiles au spéléologue de terrain.



1. Selon Martel, le karst, c'est simple, ça commence comme ça : une perte en surface... (plateau de Tsanfleuron, Valais suisse). Cliché de l'auteur.



2. Puis ça continue comme ça... (Coulomp souterrain, Alpes-de-Haute-Provence. Cliché J.-Y. Bigot.



3. ...Puis ça se termine comme ça. (grotte du Pontet, Doubs. Cliché J.-Y. Bigot.

Il y a de l'eau dans le karst...

C'est simple : le modèle que Martel et ses successeurs ont construit sur ses observations dans le Karst et dans les Causses se résume en un mot : drainage. Le karst martélien fonctionne à la base comme un drainage normal, de surface : il pleut, ça forme des petits ruisseaux, qui forment de grandes rivières. Sauf que dans le karst, c'est en trois dimensions parce que le calcaire est une passoire... Voyons ça de plus près.

La pluie tombe sur un massif. Bon, normal. Sur ce massif, y'a des sols, des herbes, des arbustes, des arbres, bon, ça aussi c'est banal (photographie 4). On dit que les plantes produisent de l'oxygène, le poumon de la planète, etc. C'est bien ce qu'on dit, hein ? Ben accrochez-vous : c'est FAUX ! Pas QUE de l'oxygène, du gaz carbonique aussi, et même beaucoup de gaz carbonique !

Dans le métabolisme végétal, l'oxygène est un sous-produit de la photosynthèse, c'est-à-dire du processus par lequel la plante, en utilisant comme énergie la lumière, transforme du gaz carbonique et de l'eau en hydrates de carbone (en matière vivante, quoi) : dans le gaz carbonique CO_2 et l'eau H_2O , il y a de l'oxygène, et même bien plus qu'il n'en faut, donc le surplus est rejeté dans l'atmosphère. Bon, d'accord, c'est ça la photosynthèse. Mais parallèlement à ça, les plantes ont AUSSI une respiration, qui comme la nôtre consomme de l'oxygène et rejette du gaz carbonique. Comme disait Maurice de Talleyrand-Périgord, « Ça va sans dire, mais ça va encore mieux en le disant ! »...

Cela veut donc dire que tant qu'il y a de la lumière il y a photosynthèse, et comme ce processus est plus productif que la respiration, la plante absorbe plus de gaz carbonique qu'elle n'en rejette, et surtout produit plus d'oxygène que de gaz carbonique ; mais pas de lumière, pas de photosynthèse : donc la nuit, pas d'oxygène, et surtout, dans le système racinaire, encore moins de lumière, ni la nuit ni le jour, donc zéro pour la production d'oxygène, rien que du bon gros gaz carbonique... Or, le système racinaire c'est pas rien ! On ne le voit pas parce que c'est planqué dans le sol mais ça représente parfois plus de la moitié de la masse totale de la plante (photographie 5) ! En plus, la plante, dans le sol, elle n'y est pas toute seule : il y a des tas de bactéries et de champignons, dont



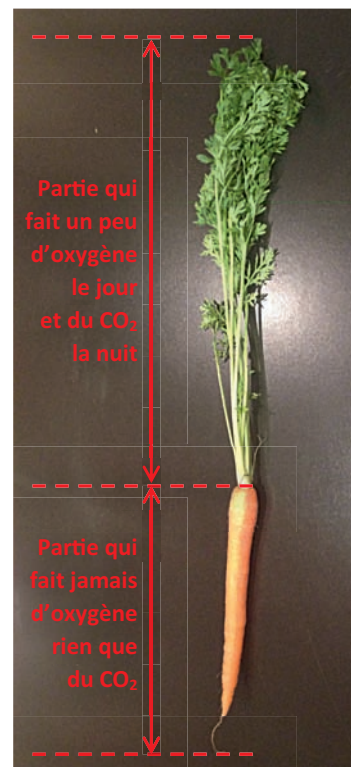
4. Une usine à bouffer le calcaire (karst dans les Monts Hybléens, Sicile), mais quand t'en as vu un tu les as tous vus. Cliché de l'auteur.

beaucoup d'ailleurs contribuent à son métabolisme en lui apportant par exemple des nitrates ; et tout ce beau monde, évidemment, respire...

Ben oui, respire, car il y a bel et bien de l'air dans le sol, diffus entre les particules solides et nécessaires aux bactéries et champignons qui y participent à ce véritable écosystème souterrain. Il y en a même beaucoup ! Pour connaître la quantité d'air qu'il y a sans qu'on le sache dans un sol, vous pouvez faire une petite « manip » très simple chez vous (dès que maman aura le dos tourné, parce que c'est pas sûr que ça lui plaise) : prenez une balance de cuisine, et posez dessus un récipient avec une quantité que vous pouvez mesurer d'une terre de votre choix (dans la photographie 6, c'est 900 cm^3 de terre de mon jardin). Tarez votre balance, et versez de l'eau jusqu'à ce que votre terre soit saturée : lisez le poids de l'eau que vous avez versée (dans mon exemple, il a fallu 370 grammes , c'est-à-dire 370 cm^3) et faites la division, vous aurez le pourcentage de vides, donc de gaz dans votre sol. Dans mon exemple, on voit que la terre de mon jardin contient... 40% de gaz ! Et encore, elle était mouillée, il avait plu. On comprend maintenant pourquoi les plantes poussent mieux sur un sol travaillé : en « aérant » le sol comme disent les jardiniers, on apporte tout simplement de l'air à toutes ces bactéries et ces champignons, et on leur permet de foisonner et d'apporter plein de nutriments à la plante... Une terre non cultivée en contient un peu moins, mais l'ordre de grandeur est le même, et soyez

certain que dès qu'il y a des plantes sur le sol, c'est que sous le sol il y a du gaz et des bactéries.

Du coup, au-dessus du sol, oui, certes, on respire l'oxygène à pleins poumons, mais dans le sol, c'est bien gazé : alors que le pourcentage de CO_2 considéré comme normal dans l'atmosphère n'est que de $0,038 \%$, dans le sol on relève couramment des taux qui vont flirter allègrement avec les 10% ! Vous imaginez la soupe carbonique lorsque l'eau de pluie traverse le sol et se mélange à ce gaz-là (théorème de la Casserole)...



Partie qui fait un peu d'oxygène le jour et du CO_2 la nuit

Partie qui fait jamais d'oxygène rien que du CO_2

5. Biologie de cuisine : un générateur photosynthétique différentiel ; en haut du cliché, plus d'oxygène que de CO_2 , en bas, plus de CO_2 que d'oxygène. Cliché de l'auteur.



a.



b.



c.

6. Karstologie de cuisine : pour connaître la quantité d'air qu'il y a sans qu'on le sache dans un sol, on pèse un volume connu de terre (a), on la sature d'eau (b), on soustrait (c) et on sait combien il y avait de place entre les particules de terre. Les conjoints ne comprenant pas toujours l'intérêt de la Science, l'auteur décline toute responsabilité concernant les conflits conjugaux pouvant découler de cette expérimentation. Clichés de l'auteur.

En plus, lorsque l'eau s'infiltré dans le sol, elle fait « piston », et dans les interstices où elle se trouve en contact avec le gaz, la pression augmente : du coup, le CO₂ sous pression se combine encore plus volontiers avec elle (Théorème de la Binouze). Et comme dans le sol il fait toujours un peu frais, c'est encore mieux (Théorème de la Casserole).

Donc on se résume : lorsqu'il pleut sur un sol un tant soit peu végétalisé, l'eau qui traverse le sol se combine avec d'autant plus de gaz carbonique qu'il y a de biomasse, et devient donc acide ; vous comprenez maintenant UNE des raisons pour lesquelles on dit de certains terrains riches en matière organique, comme la terre de bruyère, qu'ils

sont « acides » ! Vous voyez, même au jardin on fait de la karstologie sans le savoir !

Donc l'eau de pluie traverse le sol, s'acidifie au passage et arrive sur la couche rocheuse sous-jacente. À une échelle plus grande que le simple bloc, la roche est toujours un peu fissurée, fracturée, il suffit de la regarder quand elle est à nu pour le voir. Si la roche est un granit, un gneiss, une argile, un schiste... Bref à peu près n'importe quoi sauf du calcaire, un peu d'eau va s'infiltrer dans les discontinuités et les remplir, à la limite y circuler très lentement, mais sans avoir d'action significative ; l'essentiel des circulations va se faire au-dessus de la couche rocheuse et va créer un drainage

« normal », de surface : des petits ruisseaux, puis de grandes rivières... En revanche, dans un calcaire, l'eau qui va s'infiltrer dans les fissures, acide, va en corroder les parois (Théorème de la Sampé) et du coup les élargir ; et plus la fissure sera large, plus l'eau va s'y infiltrer, et plus elle va s'y infiltrer et plus elle va corroder... Et ainsi de suite. C'est ce que les scientifiques, qui, pour discuter entre eux adorent mettre leurs mots à eux sur des choses qui se comprennent aussi très bien sans ça, appellent une *rétroaction positive*.

Donc l'eau qui tombe sur le calcaire s'y infiltre et élargit les fissures pour faire des vides. Mais jusqu'où cela s'arrêtera-t-il ?

Karst sur table !

Naturellement, tant que l'eau acide trouvera des fissures où elle pourra circuler, elle y circulera, et tant que ce sera dans du calcaire elle les élargira. Or, ce qui fait bouger l'eau, c'est son propre poids, c'est la gravité. Donc, comme la pomme de Newton, direction le centre de la Terre ! Bon, évidemment, elle va s'arrêter avant, mais tant que rien ne l'arrêtera elle aura tendance à s'enfoncer verticalement en élargissant les discontinuités sur son parcours.

En même temps il va se produire verticalement ce qui se produit à peu près horizontalement dans un drainage de surface : les ruisselets font des ruisseaux, qui font des rivières... Les petites infiltrations vont se rassembler, former des écoulements plus importants qui vont élargir encore plus les vides : voilà pourquoi, comme nous l'avons tous vu en spéléologie, la surface des karsts est souvent persillée de fissures ou de



7. Le drainage d'un karst est, dans un premier temps, vertical... (grotte de Sakany, Ariège). Cliché J.-Y. Bigot.

conduits pour la plupart plus ou moins impénétrables, mais quelques mètres ou quelques dizaines de mètres plus bas nous arrivons souvent à ce que nous appelons dans notre langage de terrain « la zone des puits », où on a beaucoup plus de place mais où ça descend sec... Les karstologues, eux, parlent d'*épikarst* pour la tranche plus ou moins impénétrable, et disent volontiers *endokarst* pour la zone des puits ; le tout, ils appellent ça la *zone de transfert vertical*, ce qui est assez explicite si on sait comment ça marche. En tout cas, c'est pour ça qu'on peut dire que le karst fonctionne comme un drainage de surface, mais en trois dimensions au lieu de deux : il y a la verticale en plus.

Alors qu'est-ce qui peut arrêter l'eau de s'enfoncer verticalement (photographie 7) ? Il peut y avoir deux raisons : soit elle bute sur une couche non calcaire, soit en dessous toutes les fissures sont déjà pleines d'eau et elle ne peut plus s'enfoncer. Dans ce cas, on parle de *niveau de base*.

Si elle bute sur une couche non calcaire, donc relativement imperméable ou en tout cas pas spécialement impressionnée par l'acide carbonique, l'eau va s'écouler à la base du calcaire et sur la surface de cette couche qu'elle ne peut pas traverser, en « cherchant » dans les fissures (qu'elle élargira naturellement) un cheminement jusqu'à une sortie à l'air libre. Cette sortie existe parce que la masse rocheuse est, de près ou de loin, environnée de vallées périphériques qui drainent toutes les circulations souterraines sous forme de sources.

Il arrive aussi que l'eau ne bute pas sur une couche imperméable, mais qu'elle arrive simplement à un niveau au-dessous duquel tous les vides du calcaire sont déjà pleins d'eau, une eau qui



8. ...Puis horizontal (grotte de Sakany, Ariège). Cliché J.-Y. Bigot. Ce collecteur-là est quasiment fossile, voir la photographie 2 pour un collecteur actif...

n'arrive ni à circuler ni à s'enfoncer parce qu'elle n'a pas trouvé de sortie vers une vallée périphérique : tout simplement parce qu'on est au-dessous du niveau des vallées périphériques ; Martel s'est battu contre ce concept auquel il a toujours refusé de croire, mais plus tard les karstologues l'admettront et parleront de *zone noyée* ou *phréatique*.

Dans les deux cas de toute façon, puisqu'à proximité du niveau de base les écoulements ne peuvent plus s'enfoncer, ils suivent alors des cheminements essentiellement horizontaux : c'est là qu'on trouve nos belles rivières souterraines, ou ce que parfois nous appelons des drains ou des collecteurs (photographie 8). Sans trop se compliquer l'existence (et la nôtre), les karstologues parlent de *zone de transfert horizontal* ; certains parlent aussi parfois de zone épinoyée, sous prétexte que, comme les

pluies sont irrégulières, il y a sous terre des variations importantes de débit (par exemple les crues, qui excitent beaucoup les karstologues au bureau, mais qu'eux et nous on n'aime pas trop quand on est sous terre), et que donc le niveau de l'eau varie dans la masse calcaire : du coup, au gré du niveau d'eau qui varie, les écoulements se baladent façon yo-yo, et les creusements suivent souvent des profils en montagnes russes.

Enfin, comme le karst a une longue histoire et qu'il a connu les vallées quand elles étaient toutes petites, avant qu'elles ne s'encaissent, on a souvent plusieurs cheminements horizontaux vers des émergences successives plus ou moins superposées, dont seule la plus basse (et donc dans le cas pas trop tordu la plus récente) est active. On parle de *réseaux fossiles étagés*.

Sous terre, ékarstille les yeux...

Une fois de plus, toutes ces connaissances ne ressortent que de l'observation, du bon sens et de la réflexion ; pas besoin au départ de mesures de labo et de formules compliquées, il faut juste lire ce qu'on observe sous terre à la lumière d'un canevas assez simple : les processus chimiques de base et leurs causes, les processus mécaniques de base et leurs causes, tels que nous les avons vus. Mais le modèle de Martel et Cvijić, simple et global, s'est petit à petit compliqué lorsque les karstologues sont passés du

fonctionnement général au fonctionnement de détail. Vu de près, beaucoup de facteurs secondaires se superposent et s'enchevêtrent :

■ le temps, d'abord : le karst a une histoire, et non seulement elle est longue, mais elle est aussi parfois compliquée ; lorsqu'on l'observe, on ne le voit que dans son état à l'instant *t*. Or sur le temps long, les climats varient considérablement, ce qui implique d'énormes changements dans les régimes d'écoulement : de ce fait, des

parties de réseaux peuvent passer de phases très actives avec une érosion intense des conduits à des phases beaucoup moins actives, voire plus du tout actives. Le niveau de base est censé descendre avec l'encaissement des vallées, mais pour différentes raisons (notamment les variations du niveau marin qui sont parfois énormes) il arrive qu'il soit remonté, obligeant les drainages à s'adapter. Pire, sur l'échelle géologique des temps, même les montagnes bougent... Du coup les

cavités peuvent carrément se retrouver dans des conditions topographiques totalement différentes de celles où elles se sont formées, et même déconnectées des autres parties du réseau d'origine ;

- la chimie du karst elle-même : lorsque les écoulements diminuent, les processus de dégazage et de précipitation du carbonate (Théorème du bec du Robico) peuvent devenir prépondérants sur l'érosion et tendre à colmater les conduits ; les jolies concrétions qu'on aime tant, ben c'est juste le karst qui cicatrise ! ;

- la minéralogie, après : le calcaire n'est pas pur, il contient toujours une fraction qui n'est pas corrodée, essentiellement de l'argile. Cette argile est transportée mécaniquement par l'eau et forme une grande partie de ce qu'on appelle les « remplissages », avec éventuellement toutes les saloperies que les eaux de surface peuvent emporter sous terre : sables, galets, graviers, grenouilles... ;

- la mécanique des fluides ensuite : la fissuration suit la mécanique des solides, mais dès que les infiltrations plus ou moins diffuses se sont suffisamment rassemblées pour former des écoulements compétents, l'érosion suit la mécanique des fluides et donne aux conduits des géométries qui dérivent de la fissuration d'origine, comme les méandres par exemple ;

- et quand la mécanique des fluides rentre en compétition avec des remplissages, c'est pire : les remplissages, ben ça remplit, forcément, ça s'accumule dans certains points des conduits ; en surface, il peut y avoir autant de sédiments qu'on veut, l'eau a toujours de la place pour passer dessus, mais sous terre les conduits ont des limites finies, et les remplissages les colmatent plus ou moins par endroits au point parfois de contraindre les écoulements à se fauiler là où ils peuvent. Comme les sédiments se déposent forcément en bas des conduits, pour se creuser un chemin l'eau va devoir éroder vers le

haut, à la voûte ou sur les côtés (photographie 9) : du coup, contrairement à tout ce qu'on peut voir en surface, sous terre lorsqu'il y a des remplissages l'érosion ne se fait pas vers le bas mais plutôt vers le haut. Cela donne des formes spécifiques au karst : chenaux de voûte lorsque le conduit est quasi-comblé, lapiaz de voûtes ou de parois, banquettes-limites lorsque le conduit n'est qu'à moitié plein de remplissages et que du coup le bas du conduit est protégé de l'érosion... Le géologue Philippe Renault, le premier (ou pratiquement, il y a toujours des gens qui ont vu avant mais ne l'ont pas dit assez fort) qui a décrit ce processus, l'a traité de *paragénétique*, ne me demandez pas pourquoi, par opposition à *syngénétique* lorsque l'érosion du conduit se fait sans la protection des remplissages : dans ce cas, on a d'autres formes, plus conventionnelles, plus conformes à ce qu'on voit en surface, qui résultent d'une érosion vers le bas (comme les formes d'incision, galeries en trou de serrure, etc.) ou à la limite sur toute la section du conduit lorsqu'il est totalement ennoyé (ce qu'on appelait dans le passé les conduites forcées, mais c'est plus à la mode).

Tout ça donne un modèle très simple dans les grandes lignes martéliennes et dans les processus à l'origine du creusement, mais rendu complexe lorsqu'on va dans le détail par des impondérables dont les effets se superposent, et c'est en étudiant ces impondérables que les karstologues révèlent cette complexité de détail. Mais après tout, s'ils en sont maintenant à pinailler sur les impondérables, c'est bien qu'ils maîtrisent le sujet, non ? Finalement, les grottes et les gouffres, c'est de l'eau qui tombe sur du calcaire, qui se creuse son chemin à travers grâce à la chimie de l'acide carbonique, et qui ressort en bas dans les vallées, point barre, c'est bien ça ?

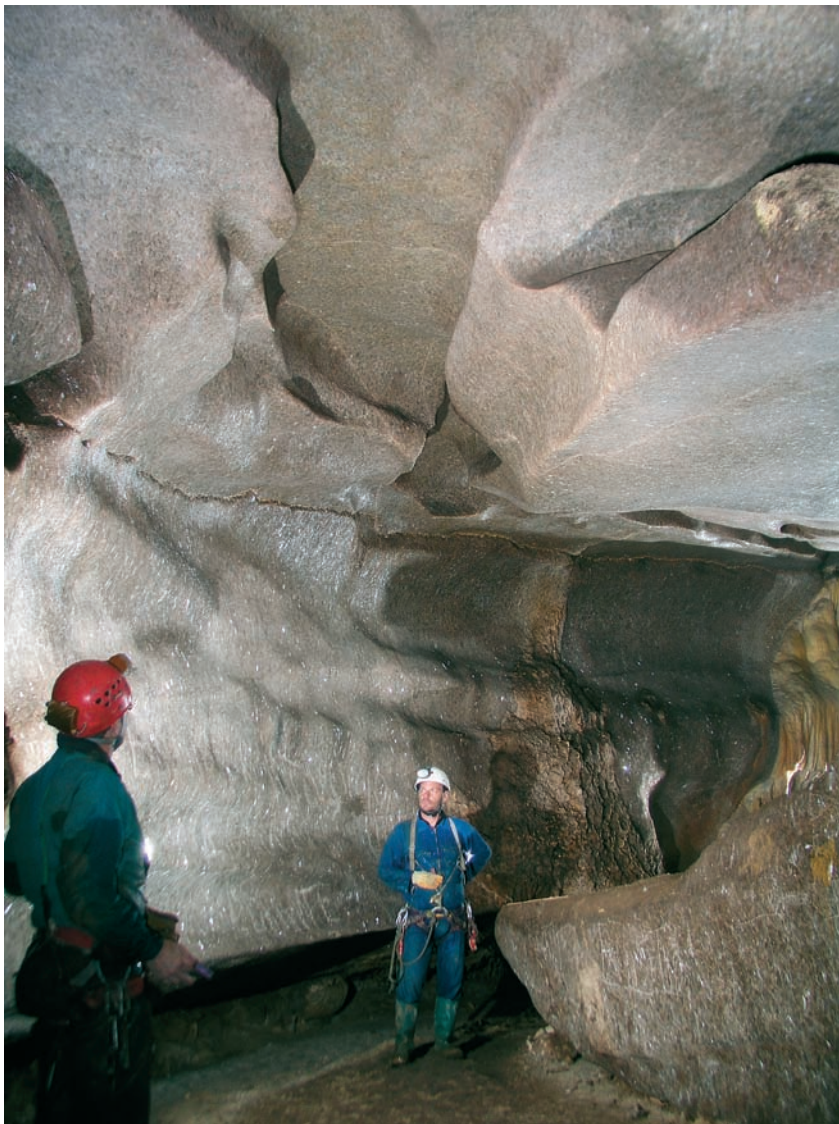
Oui, souvent on voit bien que c'est ça. En tout cas chez nous, dans nos beaux karsts alpins, dans nos causses, ça marche bien. Mais...

Mais alors, pourquoi il y a aussi des grottes dans des zones arides ?

Et après tout, pourquoi il n'y aurait qu'une seule manière de faire des trous dans du calcaire ?

En fait, est-ce qu'on est sûr que c'est TOUJOURS ça, le karst ?

Karst Marx Brother reviendra bientôt pour tenter de répondre à cette épineuse question.



9. Belles formes de paragénèse : les méandres de plafond (grotte de Santa Ninfa, province de Trapani, Sicile. Cliché J.-Y. Bigot. Bon, les puristes diront que c'est une grotte dans le gypse, mais le processus de paragénèse est exactement le même que dans le calcaire.

Attention, un karst peut en cacher un autre...

La karstologie expliquée par un nul,
par Karst Marx Brother

RÉSUMÉ DES ÉPISODES PRÉCÉDENTS

Eh oui, revoilà Karst Marx Brother, le démêleur de pelotes karstologiques ! Il y a quelque temps, dans les *Spelunca* n° 124 (décembre 2011) et 133 (mars 2014), on avait expliqué que, depuis Martel et Cvijić, tout le monde savait bien que les grottes et les gouffres c'était juste de l'eau qui tombe sur du calcaire, qui se fraye son chemin à travers en creusant des puits par la magie du gaz carbonique, et pis qui ressort en bas dans les vallées via de grandes galeries où les rivières souterraines s'écoulent vers des ré-exurgences dites, comme par hasard, karstiques. Eh bon, il suffit de regarder nos beaux karsts alpins et nos causses pour voir que c'est bien ça.

Oui, c'est vrai, chez nous ça marche apparemment très bien, mais... Mais alors, pourquoi il y a aussi des grottes dans des zones arides ? Dans ces déserts-là, où elle est la pluie ? Et les plantes pour fabriquer le gaz carbonique, où elles sont ? Là, faut bien admettre que ça marche plus très bien notre affaire... Mais au fait... Pourquoi il n'y aurait qu'une seule manière de faire des trous dans du calcaire ? Est-ce qu'en fin de compte on est vraiment sûrs que le karst c'est TOUJOURS de la pluie qui s'infiltré à travers le calcaire ?

Parole de savant, parole d'évangile ?

Pour « tchatcher » entre potes, les karstologues résumant souvent avec un seul mot à eux des choses pas si compliquées que ça quand on les explique avec une vraie phrase sujet-verbe-complément, et du coup ça ne les rend pas toujours faciles à suivre quand ils parlent leur langage de karstologues ; eh ben y'a pas qu'eux, les philosophes aussi sont balèzes à ce jeu-là : ceux qui s'occupent de la branche de la philo qui étudie comment ça fonctionne la connaissance scientifique (déjà, au départ, chercheurs de p'tites bêtes en plein vol, les mecs !), l'*épistémologie*, appellent ce qu'on a vu dans les deux premiers articles un *paradigme*. En gros, un paradigme c'est l'ensemble des théories sur une question donnée qui, à un moment donné, sont considérées comme prouvées et certaines.

Tiens, par exemple, au XVI^e siècle, ce qui était certain et prouvé c'est que

la Terre est au centre de l'univers, et que donc le Soleil tourne autour de la Terre. Galilée – et avant lui Copernic – qui affirmaient que la Terre tournait autour du Soleil étaient forcément des crétins, des illuminés ou des drogués. Pareil, au XVIII^e siècle, des poivrots affirmaient qu'ils avaient vu des météorites tomber du ciel, alors que tout le monde savait bien que les météorites sont des cailloux frappés par la foudre. Lavoisier, un des plus grands esprits de son temps, cloua sans problème le bec à ces imbéciles en énonçant une démonstration d'une logique imparable : « Les météorites ne peuvent pas tomber du ciel parce qu'il n'y a pas de pierres dans le ciel. ». Bon, ben ça, c'est fait.

Le problème des paradigmes, c'est qu'ils sont aussi souvent démontés que démontrés. Celui du karst de Martel et Cvijić a commencé à prendre des gnons, sans trop que ça se voie, il y a une quarantaine d'années.

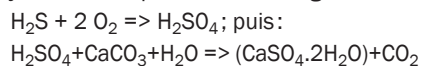
Le modèle se prend une karst à la crème...

En 1971, un Américain qui préparait tranquille son doctorat de géologie, Stephen Egemeier, avait choisi comme terrain de thèse la grotte de Lower Kane Cave, dans le Wyoming. Oh, pas bien grande cette grotte (330 m de développement), mais plutôt originale : elle est traversée par une petite rivière souterraine ; enfin, plus exactement de l'eau y sort de fissures dans le sol, une eau pas ordinaire, plutôt chaude (21 °C) et qui pue l'enfer (elle dégage de l'hydrogène sulfuré, un gaz toxique

qui sent les œufs pourris ou la fosse septique qui marche pas bien). Et puis aussi, alors que dans l'environnement géologique de Lower Kane Cave il n'y a pas un « pet » de gypse, bizarrement dans la grotte il y en a, des tonnes, par endroits sur plus de 4 m d'épaisseur ! Le gypse est un minéral hypersoluble (2 grammes par litre d'eau !) et du coup plutôt rare en spéléo parce que habituellement lessivé vite fait bien fait par l'humidité et les infiltrations : dans Lower Kane Cave, déjà qu'il n'a

géologiquement rien à faire ici, le gypse aurait été dissous bien avant le calcaire si la grotte s'était formée comme dans le modèle « normal » par les infiltrations d'eau de pluie, donc il ne serait plus là. Logique. Egemeier se grattait la tête et ne voulait pas trop planter son doctorat, mais la seule explication qui lui restait, c'est que ce gypse, sulfate de calcium, n'était pas là au départ mais s'était formé à la suite de la corrosion du calcaire non pas par l'acide carbonique comme d'hab', mais par de l'acide sulfurique, 'achement plus corrosif, produit par l'oxydation de l'hydrogène sulfuré dans l'air de la grotte, vous allez

voir, la formule se comprend très bien juste en comptant sur ses doigts :



Déjà, c'était gonflé de remettre en cause le modèle de la corrosion carbonique; mais en plus Egemeier démontra que l'eau de la grotte ne venait pas du tout de l'infiltration des pluies sur le massif de Big Horn dans lequel se développe la grotte, mais de celles tombées sur un autre massif assez lointain (les *Absaroka Mountains*): cette eau s'infiltrait jusqu'à une grande profondeur où elle trouve l'hydrogène sulfuré dont elle était gavée,

puis elle remonte en surface, loin de la zone d'alimentation, par un mécanisme de vases communicants: ça s'appelle une *source artésienne*. Lorsqu'il soutint sa thèse, personne ne put attaquer sa démonstration globale parce que tout était carré, nickel, argumenté, prouvé... Lower Kane Cave avait été creusée par de l'acide sulfurique fourni par de l'eau sulfureuse qui venait d'en bas, point barre. Les épistémologistes parlent d'une *tautologie* (Ptouy!) quand quelque chose est toujours vrai, eh ben avec ce contre-exemple, la tautologie du karst venait de tomber.

...Et le karst tend l'autre joue!

C'est marrant, mais dans l'histoire du savoir on voit souvent les grandes idées naître à plusieurs endroits quasiment en même temps: au même moment, à quelques milliers de kilomètres de là, au Nouveau-Mexique, des scientifiques qui travaillaient dans le système de Carlsbad Cavern se grattaient la tête eux aussi devant les montagnes de gypse qui s'y trouvent (photographie 1). Eux aussi se disaient que si la grotte avait été creusée par les infiltrations d'eau de pluie, il ne pourrait pas y avoir autant de gypse ici. D'ailleurs, de la pluie, bon, Carlsbad c'est dans le désert du Chihuahua et il y tombe un tout petit 250 mm par an... Pas vraiment de quoi creuser une maudite tanne, alors que Carlsbad ça commence par une salle de 80 m de hauteur sur autant de large et 300 m de longueur... Et ça continue sur des kilomètres comme ça. Il aurait fallu l'eau de la Durance pour creuser ça, pas trois pipis de chauves-souris au milieu des cactus...

Il y a bien un aquifère sous le désert du Chihuahua, mais assez profond. En dessous, tiens, y'a du gypse (la « *Castile formation* »), comme ça se trouve... Et encore au-dessous, à quelques milliers de mètres sous la grotte, il y a des grès grassement pétrolifères (la « *Bell canyon formation* »), d'ailleurs exploités pas très loin de là (photographie 2). Tous les réservoirs pétrolifères ont tendance à larguer du gaz, essentiellement du méthane, mais aussi de l'hydrogène sulfuré: tiens, tiens...

Et puis dans une autre grotte du coin, Parks Ranch Cave, une perte-résurgence qui se développe entièrement dans un niveau de gypse de la *Castile formation*, nos chercheurs se sont aperçus que dans les flaques d'eau il y avait plein de bactéries



Photographie 1: Big Room, dans Carlsbad Cavern (Monts Guadalupe, Nouveau-Mexique) ; les banquettes épaisses qu'on voit au fond de la grande niche sont des dépôts de gypse massif, épais de deux à trois mètres, qui n'ont rien à faire dans une grotte « normale ». Cliché J.-Y. Bigot.



Photographie 2: Au piedmont des Monts Guadalupe (Nouveau-Mexique), à une quinzaine de kilomètres de Carlsbad Cavern... Notez que le climat du coin n'a vraiment pas grand-chose à voir avec le Vercors ni même avec les Causses... Cliché J.-Y. Bigot.

bizarres, qui se nourrissaient de matière organique et de gypse en larguant un max d'hydrogène sulfuré... Re-tiens, tiens... Peu à peu, nos karstologues furent amenés à conclure que Carlsbad Cavern s'était creusée non pas bêtement avec l'eau des pluies du massif, mais avec une eau

remontée des profondeurs et largement gavée d'un hydrogène sulfuré massivement fabriqué dans les couches profondes par des bactéries spécifiques, juste avec du gypse et du méthane. Avec ce deuxième exemple, le creusement des grottes par des remontées d'eaux

profondes et non pas par les infiltrations directes d'eau de surface, basé sur la corrosion par la chimie de l'acide sulfurique et non pas de l'acide carbonique, devenait un modèle de spéléogénèse à part entière, totalement distinct et différent du modèle martélien.

Y'a karst bien regarder pour bien voir!

Carlsbad et Lower Kane Caves, au début, ont été vues comme des sortes de « monstres karstologiques » exceptionnels et isolés, et le modèle de creusement, qualifié d'*hypogène* (du grec *upo* qui veut dire par-dessous, et *genos* qui signifie origine) par opposition à la corrosion « normale », dite *épigène* (du grec *epi*, qui, vous allez pas le croire, veut dire par-dessus), a d'abord été accueilli dans la communauté scientifique avec scepticisme, puis a été admis du bout des lèvres comme un phénomène marginal. Mais peu à peu on s'est aperçu que des grottes comme ça, avec de l'eau qui pue les œufs pourris et souvent plus ou moins chaude, en réalité on en connaissait un peu partout, et même souvent depuis l'antiquité où l'on s'y soignait, comme par exemple la grotte des Serpents à Aix-les-Bains (que d'ailleurs l'illustre Martel lui-même avait visitée en son temps... L'avait bien vu que c'était de l'eau hydrothermale, Martel, puisqu'elle en sort à une quarantaine de degrés, mais bon, les certitudes, surtout scientifiques, ont la peau dure, alors jusqu'au début des années 2000 la grotte des Serpents, ben... Rien, quoi, c'était une grotte qui pue, point barre!).

Du coup, on a commencé à regarder d'un autre œil plein de grottes qu'on ne comprenait pas trop auparavant, dont la topographie semblait bien un peu bizarre par rapport à la logique du modèle drainant « normal », le classique transfert vertical-transfert horizontal, ou bien qui recelaient des minéraux qui n'ont *a priori* pas grand-chose à faire dans du karst (des

concrétions d'oxyde de fer, des sulfures comme la galène ou la baryte...): soudain, ces grottes qui ne ressemblaient à rien prenaient un sens et collaient dans le modèle hypogène. On ne l'avait tout simplement pas compris avant, et pourtant, parfois, il n'y avait pas à aller chercher bien loin pour trouver la source sulfureuse à l'origine du creusement de la grotte,



Photographies 3 et 3 bis : galerie caractéristique de spéléogénèse sulfurique dans la grotte du Chat (Daluis, Alpes-Maritimes), et son clone parfait dans la grotte d'Acqua Fitusa (San Giovanni Gemini, Sicile). Une même morphologie parce qu'un même processus : l'oxydation en acide sulfurique de l'hydrogène sulfuré libéré par l'eau artésienne qui remonte des profondeurs par une fissure (« feeder ») se produit juste au-dessus de la surface de l'eau, où il rencontre l'oxygène de l'air. Du coup, c'est à ce niveau que se produit le maximum de corrosion, alors que sous la surface de l'eau il n'y a pratiquement pas d'oxydation, donc peu d'acide sulfurique et donc pas de corrosion. Le résultat, c'est que la galerie s'élargit au niveau de la surface de l'eau, alors que juste en dessous de la surface de l'eau le plancher ne se corrode pas : ce qui donne au plancher une horizontalité quasiment parfaite avec la fissure en évidence au milieu, et à la galerie un profil triangulaire caractéristique. Clichés J.-Y. Bigot.



Photographie 4 :
Le « glacier de gypse » de Glacier Bay, dans Lechuguilla Cave (Monts Guadalupe, Nouveau-Mexique) ; à cet endroit, les énormes dépôts de gypse provoqué par la corrosion du calcaire pur et dur par les remontées d'hydrogène sulfuré forment une « coulée » de plusieurs dizaines de mètres d'épaisseur, avec des « séracs » et des « moulins » creusés par les gouttes d'eau de condensation.
Cliché Lukas Plan.

comme dans le cas de la grotte du Chat dans les Alpes-Maritimes, ou de la grotte d'Acqua Fitusa (littéralement « l'eau qui pue ») à San Giovanni Gemini, province d'Agrigente en Sicile (photographies 3 et 3 bis) : il n'y avait aucune raison pour qu'un unique processus soit capable de creuser des galeries dans le calcaire, encore fallait-il accepter de remettre en cause les certitudes du modèle karstologiquement correct.

Tiens, il y en a une aussi qui est brillamment entrée dans le modèle hypogène sulfurique et que vous connaissez tous de nom : Lechuguilla... Eh oui ! La grotte réputée comme l'une des plus belles du monde n'a rien à voir avec ce qu'on vous a appris sur la formation « normale » des grottes... (photographies 4 et 5).

Plus récemment, les quelques karstologues qui se sont penchés sur cette autre manière de créer des grottes ont même compris que, parfois, les eaux qui traversent le calcaire de bas en haut et non de haut en bas, *artésiennes* donc, n'ont pas forcément besoin de relâcher de l'hydrogène sulfuré pour bouffer le calcaire : sans chercher les complications géologiques, à grande profondeur, il y a plein de bon gros gaz carbonique, et rien qu'à cent mètres sous une source artésienne, la pression hydrostatique est dix fois celle de la pression atmosphérique : du coup, en bas, les eaux se chargent pire qu'une « binouze », et quand elles remontent c'est comme quand

on décapsule une cannette... CO₂ à gogo ! C'est pour ça que certaines eaux minérales sont naturellement gazeuses, et du coup acides, et du coup aident bien à digérer le haricot de mouton de mémé. Et aussi à digérer le bon vieux calcaire, et c'est comme ça que selon certains karstologues se serait par exemple formée la grotte de l'Adaouste, dans les Bouches-du-Rhône. Il y avait donc en réalité non pas un modèle de spéléogénèse différent du modèle

martélien, mais deux : un modèle hypogène qui fonctionne avec la chimie de l'acide sulfurique, et un autre qui fonctionne avec la chimie de l'acide carbonique.

Mais après tout, au fond ou en surface, faire des trous dans le calcaire, c'est toujours une histoire d'eau. Mouais... Hum... Toujours ?

Suite au prochain numéro...



Photographie 5 : Chandelier Ballroom (Lechuguilla Cave, Nouveau-Mexique) ; cette salle, avec ses énormes concrétions de sélénite (c'est juste du gypse recristallisé en très gros cristaux), est emblématique de Lech. Cliché Lukas Plan.

Le karst: y'a de l'eau dans le gaz!

La karstologie expliquée par un nul, par Karst Marx Brother

RÉSUMÉ DES ÉPISODES PRÉCÉDENTS

Dans les *Spelunca* n°124 (décembre 2011) et 133 (mars 2014), on avait vu que, depuis Martel et Cvijić, tout le monde pensait que les grottes et les gouffres c'est forcément au départ la pluie qui tombe sur du calcaire; par la magie de la chimie de l'acide carbonique, elle se fraye son chemin à travers en creusant des puits; et puis elle ressort en bas dans les vallées via de grandes galeries où les rivières souterraines s'écoulent vers les résurgences, du coup « karstiques ».

Puis dans le n°145 (mars 2017) on avait vu que, des fois, l'eau qui creuse les trous ne descend pas du ciel: elle REMONTE des profondeurs géologiques à travers le calcaire, et même que dans ces cas-là la magie peut être sulfurique plutôt que carbonique. Ça pue un peu comme magie, l'hydrogène sulfuré, mais c'est encore plus efficace. C'est ce qu'on appelle la spéléogenèse hypogène.

Mais bon, au bout du compte, au fond ou en surface, faire des trous dans le calcaire, c'est toujours une histoire d'eau, qui monte ou qui descend, non ?

Toujours ?

Ben non... C'est contrariant, je sais, mais il y a aussi des grottes qui se creusent sans eau.

Mais où est donc l'eau dans le karst ?

Qui se creusent sans eau, ou plus exactement sans eau visible, car il y a une eau invisible qui nous baigne tous: celle qui est tout simplement dans l'air ambiant, vous savez, ce qu'on appelle l'*humidité* (photographie 1). Et s'il y a bien un endroit où il fait humide sur terre, c'est sous terre! Regardez les parois de nos grottes, même celles qu'on dit « sèches »: si elles étaient vraiment si sèches que ça, nos combis ne seraient pas aussi crades... Même s'il ne pleut pas, même si ça ne ruisselle pas, c'est toujours plus ou moins mouillé de partout. Mais d'où elle vient, alors, cette flotte-là ?

Elle vient de dehors, évidemment. Et si ce qui l'amène sous terre, c'est pas la pluie, alors c'est forcément ce sacré « courant d'air » que nous autres spéléologues on est tout le temps en train de traquer... Et l'air, Dieu sait si ça circule dans le karst!

D'abord les grottes « respirent » au gré des variations de pression atmosphérique;

et puis dès qu'on a plusieurs ouvertures étagées (même minuscules, des fissures ça suffit) des courants d'air s'établissent entre les entrées basses et les entrées hautes. Et même si elles sont à la même altitude, il suffit qu'une prenne un peu le vent ou bien soit un peu mieux exposée au soleil pour que des pompes s'amorcent... Bon, l'air circule, d'accord, mais alors il y aurait donc de l'eau dans l'air ?

Ben oui. La quantité d'eau transportée par l'air n'est pas directement perceptible (sauf le jour où on se la prend sur la tronche sous forme d'épisode cévenol), et, pour cette raison, sa charge humide est souvent ignorée ou tenue pour négligeable, mais bon, vous savez, la TVA non plus on la voit pas... Et pourtant elle est là et bien là! Pour voir cette eau cachée, il suffit de refroidir l'air puisque, pour une pression atmosphérique et une humidité données, il y a une température au-dessous de laquelle cette eau masquée se condense: les thermodynamiciens appellent ça la *point de rosée* (photographie 2).

Des ingénieurs ont cherché depuis des lustres à capter cette eau masquée, ressource précieuse dans les zones arides; beaucoup de systèmes de collecte de l'eau atmosphérique par condensation naturelle, sans ventilation forcée et sans aucune source de froid technique, ont été essayés. En 1905, le Russe Friedrich Zibold édifie à Théodosia (Ukraine) un gros condenseur atmosphérique en pierres de 20 m de diamètre et de 6 m de haut, qui aurait produit jusqu'à 360 litres d'eau par jour! En 1929, à Montpellier, Léon Chaptal (pas le Chaptal qui a inventé de mettre du sucre dans le jus de raisin pour alcooliser le pinard,



Photographie 1: L'humidité de l'air se condense spontanément sur une paroi froide. Et il faut reconnaître que plus il fait chaud et meilleur c'est. Purée, qu'est-ce que j'aime la science, moi... Cliché de l'auteur.



Photographie 2 : Nuée débordant une crête, puis disparaissant immédiatement. Ce phénomène fréquent en montagne permet de «voir» le point de rosée : côté adret, le vent fait monter l'air de la vallée le long du versant ; en prenant de l'altitude, l'air se refroidit (en gros 1°C tous les 150 m), le point de rosée est franchi et l'humidité se condense en nuage ; l'air (donc le nuage) passe la crête, redescend et se réchauffe, le point de rosée est franchi dans l'autre sens et la vapeur disparaît. L'humidité ne varie pas, mais tantôt sous forme de brouillard et tantôt sous forme gazeuse, tu me vois, tu me vois plus. C'est aussi comme ça que se produit l'« effet de Foehn ». Cliché de l'auteur.



Photographie 3 : Le puits aérien d'Émile Knapen (Trans-en-Provence, Var). Cliché de l'auteur.



Photographie 4 : La paroi du puits aérien de Knapen est ventilée mais elle est épaisse de plus de deux mètres et le rayonnement solaire ne pénètre pratiquement pas la structure, ce qui était censé garantir au système une stabilité thermique suffisante. Cliché de l'auteur.



Photographie 5 : Le condenseur du système, un noyau maçonné de 6 m de diamètre qui a une grande inertie thermique du fait de sa masse, était équipé d'ailettes en ardoise sur lesquelles l'humidité de l'air se condensait. Surmonté d'une ventilation haute, le puits aérien fonctionnait exactement comme ces cavités que nous appelons « tube à vent ». Cliché de l'auteur.

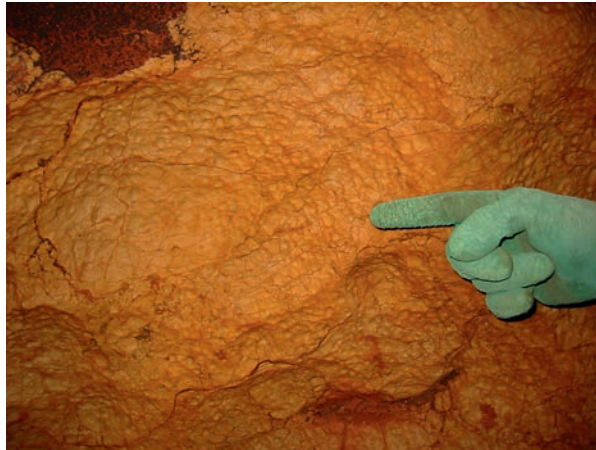
un autre Chaptal qui est resté à l'eau) en construit un plus petit sur le même principe, une pyramide de pierres de 3 m de haut qui, au cours de l'été 1930, aurait produit 88 litres d'eau. Dans la foulée, l'année suivante, un belge, Achille Knapen, bâtit à Trans-en-Provence (Var) un prototype de « puits aérien » plus élaboré, une sorte de tour ventilée de 12 m de diamètre sur 13 de haut qui existe toujours (photographies 3, 4 et 5). Au final, comme la condensation est provoquée par un gros changement de température de l'air, l'élégant « proto » de Knappen, trop ventilé et qui manque d'inertie thermique, dont du coup la température intérieure reste influencée par l'extérieur, marche moins bien que celui de Zibold pourtant hyper-basique : juste un gros tas de cailloux avec de l'air qui passe dedans. Oui, c'est ça : exactement comme un bon vieux massif karstifié !

Pour en revenir, donc, au karst, chacun d'entre nous sait que sous terre la température est très stable, et que l'été il y fait bien plus froid que dehors : si de l'air rentre dans une cavité et pour peu que la différence de température soit suffisante, elle va se comporter comme un condenseur de Zibold. Et si ces condenseurs, tas de cailloux tout rachitiques comparés à un vrai massif de montagnes, restituent carrément des litres d'eau de condensation par jour, imaginez ce qu'il peut en être dans des réseaux karstiques qui aspirent goulûment l'air extérieur... Ah, là on comprend mieux maintenant pourquoi c'est toujours mouillé sous terre, non ?

Phénomène pittoresque mais anecdotique ? Ratiocination de karstologue aviné ? Ben non... Bien sûr, au bilan hydrologique et sur une échelle de temps annuelle, la majeure partie des volumes d'eau restitués par le karst provient généralement de l'infiltration plus ou moins directe des précipitations, mais la condensation en fournit des quantités qui sont loin d'être négligeables : certains chercheurs [DUBLYANSKY V. & DUBLYANSKY Y. (1998) : The problem of condensation in karst studies.- *Journal of Caves and Karst Studies*, 60 (1), p.3-17] ont même démontré que, dans certains massifs en zone ou en saison relativement « sèche » (au sens météorologique et non aérologique du terme), ces condensats fournissent carrément une bonne partie des écoulements restitués par le karst. Par exemple, en Provence, région très aride l'été c'est bien connu, sept volumes d'eau dans un de pastis. Mais là je crois que je m'égarer...

Tu crois vraiment que la spéléogénèse, si c'est pas « que d'eau ! » alors c'est que dalle ?

Si l'eau de pluie est capable de se combiner avec du gaz carbonique et de bouffer le calcaire, cette eau condensée à l'intérieur du karst joue forcément elle aussi un rôle dans la spéléogénèse : vu que la circulation d'air y assure un apport permanent de CO₂, pourquoi diantre ce film d'eau de condensation ne serait pas lui aussi capable de s'acidifier ? Du coup, comme la rouille qui rongerait les grilles oubliées dans les prisons s'il n'y venait personne et qui, en tout cas, attaque bel et bien la ferraille des vieux maillons rapides laissés en fixe (ah, ça, sous terre, vous l'avez vu aussi bien que moi, hein ?), ce « film acide » sur la paroi corrode le carbonate (photographie 6). Puis, comme la circulation d'air assure AUSSI un apport constant en humidité, le film d'eau, constamment alimenté par la condensation, s'égoutte ou flue lentement vers le bas des parois en entraînant le carbonate en solution et finit par s'évacuer par ruissellement et infiltration, en exportant donc de la matière. D'où, donc, bouffage de paroi et agrandissement de trou. Spéléogénèse, quoi.



Photographie 6 : Portion de plafond où le calcaire encaissant a été corrodé par des gouttelettes de condensation, formant ainsi des micro-cupules, un exemple dans la grotte du Revest, Alpes-Maritimes. Cliché de l'auteur.

Bien sûr, dans nos cavités alpines actives, les processus « habituels » liés aux infiltrations et aux ruissellements sont prépondérants et masquent beaucoup de choses, mais n'avez-vous jamais remarqué dans certaines grottes bien sages, peu actives ou carrément fossiles, que les parois étaient pâteuses, comme pourries, sur quelques millimètres ? Ben voilà, on peut toujours appeler ça une *altération* sans trop se poser de questions si on veut,

mais il faut quand même bien qu'il y ait un processus physico-chimique derrière ce mot : et ce processus c'est tout simplement la corrosion par le film humide...

Ce processus aujourd'hui identifié dans de nombreuses cavités a été nommé *condensation-corrosion*. Du point de vue physico-chimique, ça marche donc comme avec les infiltrations d'eau de pluie, mais en plus lent.

Quoique...

Tant va le calcaire à l'eau (de condensation) qu'à la fin il se karst

En plus lent, ouais... Quoique : d'abord, la pluie c'est de temps en temps, alors que la condensation c'est à peu près tout le temps ; il y en a peut-être moins, mais il y en a plus longtemps. La Fontaine aurait sûrement fait une fable là-dessus, avec un truc qui va très vite mais s'arrête tout le temps *versus* un truc qui va lentement mais s'arrête jamais.

Et ça, c'est dans des conditions, disons, banales. Mais comment ça se passe si, en plus, il y a dans la cavité quelque chose qui produit de la chaleur, ou de la vapeur d'eau, ou du CO₂ ou autre gaz qui ne demande qu'à devenir corrosif ? Vous ne voyez pas quoi t'est-ce ? Non ? Il y a pourtant plusieurs choses qui peuvent donner de sacrés coups de pouce à la corrosion par la condensation.

La première, on en a parlé dans le *Spelunca* n° 145 : ce sont les remontées d'eaux profondes (*spéléogénèse hypogène*). Dans ce modèle de fonctionnement, les apports extérieurs d'humidité et de



Photographie 7 : La vasque du siphon terminal de la grotte des Serpents (Aix-les-Bains) dégaze H₂S et CO₂. Le pingouin qui s'ingénie à collecter les bulles de gaz sous la surface avec un entonnoir et un flacon ne risque pas la pneumonie vu que l'eau est à 41 °C : l'air est saturé d'humidité comme dans un hammam, du coup voûte et parois relativement froides sont partout dégoulinantes de condensation et corrodées en gypse pâteux. Cliché Philippe Audra.

Photographie 8 : Accumulation de guano dans une grotte à chiroptères des Alpes-de-Haute-Provence. Le halo au-dessus de la masse met en évidence la vapeur d'eau dégagée par la chaleur de la fermentation, mais ce qu'on ne voit pas, c'est les gaz qui s'en échappent aussi, notamment le CO₂.
Cliché Jean-Yves Bigot.



Photographie 9 ci-dessous : L'abisso dei Cocci (province de Trapani, Sicile), cavité totalement sèche à l'exception d'un petit réseau proche de la surface où il y a quelques gours, héberge jusque dans la zone du fond (-300 m) d'importantes colonies de chauves-souris. Les dépôts de guano sont considérables et leur fermentation fait que plus on descend, plus la concentration de CO₂ s'élève et plus la température augmente (elle passe de 22 °C dans les zones supérieures à plus de 25 °C vers -200 m). Parois et voûtes sont partout décapées et altérées. Les altérites claires qui en tombent recouvrent au pied des parois les sols bruns organiques : on voit qu'actuellement l'eau ne circule ni ne ruisselle, ni sur les planchers ni sur les parois, le seul processus à l'œuvre étant la condensation-corrosion Cliché Jean-Yves Bigot.



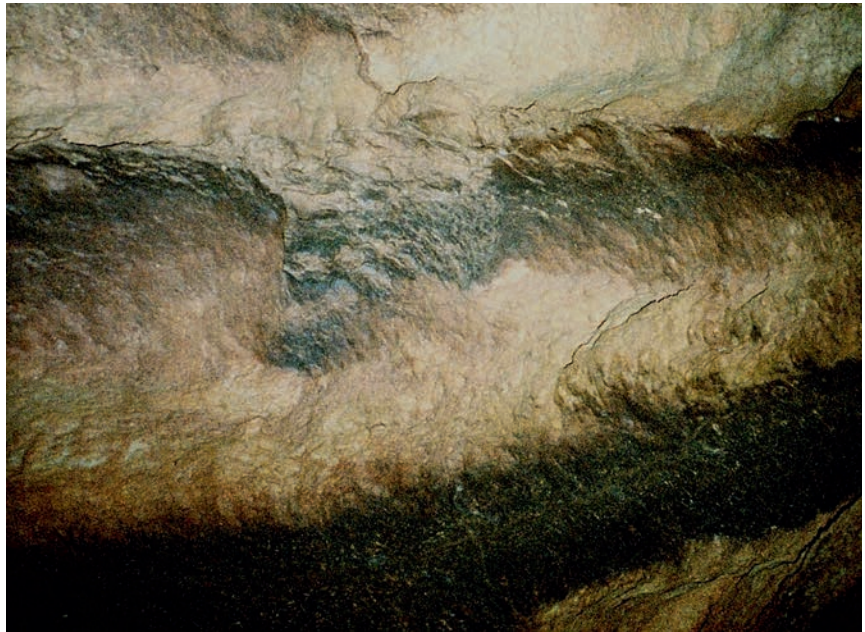
gaz carbonique c'est *peanuts* par rapport à ce qu'amènent les eaux profondes, souvent relativement chaudes et saturées de gaz carbonique ou d'hydrogène sulfuré. Au-dessus de la surface de l'eau, l'air chauffe, s'humidifie à bloc, se gave de CO₂ ou d'H₂S... Du coup, lorsque les volutes de convection lèchent les parois relativement fraîches, ça condense comme dans ta cuisine quand tu enlèves la soupape de ta cocotte-minute. Sauf que là c'est pas de la céramique, c'est du calcaire, et lui, il fait pas le malin devant le film humide acidifié à mort : comme aurait dit Blier dans un « *Les Tontons Rongeurs* » qu'il aurait bien pu nous laisser : « Je vais le travailler en féro-cité, moi, le faire marcher à coups de gaz ! » (photographie 7).

Mais il y a aussi d'autres choses, bien plus banales, qui peuvent créer de la chaleur et du CO₂ dans une grotte même « normale » (ou pas). Par exemple, ce qu'on trouve souvent sous terre, qui chauffe et fait du gaz, c'est tout simplement... le guano. Un bon gros tas de fumier de chauves-souris qui fermente bien comme il faut (photographie 8), v'la qui dégage du lourd ! Et tout ce qu'il faut : chaleur (même si c'est plus discret que dans le tas de fumier de la ferme du coin), et gaz, entre autres carbonique. Du coup, la condensation-corrosion est souvent particulièrement intense dans les grottes à chiroptères (photographies 9 et 10). Et puis même sans « chiros », il y a sous terre de l'activité biologique insoupçonnée qui active la corrosion sur film de condensation : n'avez-vous jamais vu ces espèces d'enduits noirâtres plus ou moins gluants que les spéléo-romantiques appellent la « poussière du temps » ? Eh bien les chercheurs mettent ça sous un microscope et comptent les points bactériens : le film d'eau permet en fait le développement de colonies bactériennes qui prospèrent sur

Photographie 10 : Dans une grotte en zone désertique, stalagmite corrodée en coupoles latérales dans lesquelles on voit bien les lamines recoupées par le front de corrosion ; si elle avait été érodée par une rivière souterraine (dont on ne voit aucun indice dans la grotte), elle aurait été profilée à sa base et dans la direction du courant, alors qu'elle a été « épluchée » dans toutes les directions et à toutes les hauteurs, donc nécessairement par l'air. Le moteur de cette condensation-corrosion, ce sont les dépôts de guano de plusieurs mètres d'épaisseur dont certains datent d'un demi-million d'années (Slaughter Canyon Cave, Nouveau-Mexique).
Cliché de l'auteur.



les calcaires altérés, produisent du CO₂ et des acides organiques, participant ainsi à l'altération du calcaire. Cela forme ce que les karstologues américains appellent un *microbial mat*, et dans les cas les plus gras un *spéléosol* (photographie 11). La définition d'un sol, c'est ce qu'il reste quand une roche a été altérée, décomposée, et mélangée avec de la matière organique... Du reliquat de calcaire digéré mélangé à de la masse bactérienne : assez intestinal comme spéléogénèse et pas spécialement photogénique, n'empêche que discrètement et méthodiquement les bactéries, qui vivent grâce à l'eau de condensation, décomposent la roche et contribuent donc ainsi au creusement des vides dans le karst, bien plus qu'on ne le pense. Une fois de plus, on a tendance à penser que ce qu'on ne voit pas ne compte pas, mais il faut aussi regarder de près pour bien voir...



Photographie 11 : Spéléosols sur la face supérieure de banquettes paragéométriques (voir *Spelunca* n°133), communs dans les grottes fossiles (ici, grotte des Garamagnes à Callian, Var). Ceux-là sont épais, colorés, bien visibles, mais les bactéries c'est pas toujours aussi tape-à-l'œil. Cliché de l'auteur.

Karst ta gueule à la récré...

Dans la zone *vadose* (là où il y a de l'air dans les trous, c'est-à-dire au-dessus du niveau de base et de la zone noyée dont on a parlé dans *Spelunca* n°133), la condensation-corrosion et la corrosion par les infiltrations acides, processus assez proches du point de vue physico-chimique, ne le sont pas du tout du point de vue des morphologies : les formes créées n'ont pas du tout la même tronche.

Les ruissellements, qui obéissent à la gravité comme on l'a vu dans les épisodes précédents, suivent toujours les lignes de plus grande pente : ils vont donc corroder et éroder des surfaces très limitées, celles qui sont « mouillées » par l'écoulement, et créer des formes d'incision comme les cannelures, rigoles, chenaux, méandres, qu'on connaît bien sous terre dans les cavités alpines plus ou moins actives.

La condensation-corrosion, elle, n'obéit quasiment pas à la gravité puisque son carburant à elle, ce sont les courants d'air et les convections : elle peut donc affecter à peu près toutes les surfaces exposées à l'air, horizontales, verticales, déversées, à l'endroit ou à l'envers...

En fait, comme les courants d'air et les circulations d'eau dans la zone noyée sont tous les deux des écoulements fluides *monophasiques* (Ouille ! Mon oreille gauche... Pas de panique, ça veut juste dire un seul fluide, du gaz ou du liquide mais pas les deux en même temps) et à peu près *isotropes* (Aie ! Mon

oreille droite... Ça veut juste dire que les propriétés mécaniques sont identiques dans toutes les directions), les formes générées par la condensation-corrosion ont tendance à avoir la même gueule que celles du karst en zone noyée (photographie 12) : des beaux tubes bien ronds, des formes toutes douces bien polies, des coupoles... Avec quelques spécificités tout de même : comme ça condense (et donc ça corrode)

beaucoup aux endroits où des convections convectent tout le temps, à la longue ça creuse pile poil là, dans la paroi ou sur les plafonds, un « moulage en creux » des volutes d'air en forme de grandes coupoles, mais du coup bizarrement orientées dans un peu n'importe quel sens. Ces coupoles anarchiques font d'ailleurs de très bons indices du processus (photographies 13 et 14).



Photographie 12 : Une des innombrables morphologies pseudo-phréatiques dans Lechuguilla. On dirait tout à fait des formes noyées, mais ça fait six millions d'années que la tranche où se développe la grotte est en zone aérée ; en fait, les boyaux d'origine ont été élargis par les circulations d'air sulfureux chargeant d'acide sulfurique les films de condensation, de sorte qu'ils se sont élargis dans toutes les directions, exactement comme une vraie galerie en « conduite forcée ». On distingue au bas des parois des croûtes de gypse, produit par la corrosion sulfurique du calcaire et entraîné par les condensats. À un ion près, c'est le même processus dans la condensation-corrosion carbonique. Cliché Jean-Yves Bigot.



Photographie 13: Ce puits de l'Abisso dell'Eremita (Province de Trapani, Sicile) ne présente aucune forme (cannelure, incision, méandre) liée au creusement par un écoulement d'eau comme dans le karst « classique ». Il a en fait été élargi à partir d'un petit conduit initial par la condensation-corrosion: les volutes d'air chaud et humide ont creusé de larges coupoles d'orientation aléatoire, qui ont corrodé uniformément et sans différenciation tous les éléments d'un encaissant pourtant très hétérogène (c'est une brèche, et c'est joli). Cliché Jean-Yves Bigot.

Photographie 14: Cette galerie de l'Abisso dei Cocci (Province de Trapani, Sicile) n'est qu'une coalescence de très grandes coupoles, creusées à partir d'un conduit phréatique initial de petites dimensions par des convections d'air chaud et humide montant du fond. Cliché Jean-Yves Bigot.



Condensation-corrosion-désobstruction

Sur le temps long (et Dieu sait si l'éternité c'est long, surtout vers la fin), la condensation-corrosion peut donc retoucher profondément les conduits, effacer les indices de leur formation initiale (par exemple les coups de gouge), émuusser les grandes formes de paroi, en créer de nouvelles plus spécifiques, et à la longue donner à une cavité une allure très différente de sa conformation initiale, voire trompeuse sur sa formation. Mais dans certains cas particuliers la condensation-corrosion peut carrément être la cause principale du creusement des conduits, et c'est évidemment dans les régions plutôt arides qu'on va pouvoir trouver les cas les plus particuliers et les plus évidents... Par exemple en Sicile, dans les monts Inici (province de Trapani) s'ouvrent l'Abisso dei Cocci et l'Abisso dell'Eremita (photographies 13 et 14). Ils ont tous deux été creusés au départ par la remontée d'eaux sulfureuses à travers le calcaire via un petit conduit de quelques décimètres de module qui suffisait largement pour faire monter quelques litres d'eau par seconde, qu'on peut d'ailleurs encore identifier ça et là dans le réseau.

La Sicile, c'est bien connu, c'est une région pas trop calme sur bien des aspects y compris tectoniques: ces dernières centaines de milliers d'années, le massif a pris de l'altitude et la vallée s'est encaissée, du coup l'eau sulfureuse chaude a abandonné le réseau et sort maintenant plus bas, à quelques centaines de mètres de distance, aux thermes de Segesta. Mais s'il n'y a plus d'eau depuis un bail dans le petit conduit de départ, ben il y a de l'air, alimenté en chaleur, en humidité et en gaz corrosif par les eaux devenues profondes; la condensation-corrosion a ainsi bouffé le calcaire autour et l'a élargi jusqu'à ses dimensions actuelles, plusieurs mètres de diamètre. La photographie 14 montre bien les formes de parois en coupoles géantes moulant les volutes d'air humide typiques du processus, la voûte et le sommet des parois lisses et décapées, et les produits de la corrosion en partie recristallisés au pied du conduit.

Là faut bien admettre que la condensation-corrosion, c'est p'tête bien plus long, mais c'est quand même bien plus propre que le perfo et les pailles pour élargir un boyau impénétrable...

Spéléogénèse de l'Enfer

La condensation-corrosion peut même être l'unique origine du creusement d'un réseau juste à partir des fissures du calcaire: c'est le cas dans le mont Kronio, pas loin d'Agrigente en Sicile. C'est une petite colline calcaire de 400 m de haut pour à peine plus de diamètre, assez quelconque, qui ne présente en surface rien de spécialement karstique: pas d'épikarst, pas de perte, pas de lapiaz affriolant genre « prospecte-moi grand fou, tu verras, j'ai de beaux dessous »; pourtant, elle abrite un vaste réseau spéléologique à entrées multiples qui, bien qu'il n'ait aucun bassin d'alimentation en surface, se développe autour d'un énorme P140 borgne de plusieurs dizaines de mètres de diamètre, le « Pozzo Trieste ». Ah oui, un petit détail: laissez tomber combi et sous-combi, il y fait presque partout plus de 35 °C...

Les entrées inférieures, situées à mi-hauteur de la colline, aspirent l'air frais de l'extérieur, et le recrachent

par les entrées hautes, connues sous le nom de « Stufe di San Calogero » (les chaudières de saint Calogero), en grands panaches vaporeux surchauffés à 40 ° C! Lorsqu'on pénètre par les entrées inférieures, on se retrouve très vite dans des galeries où il fait 20 ° C et sec au niveau des jambes parce que l'air froid et dense qui entre dans le réseau y circule dans un sens, et 30 ° C au niveau de la tronche parce que l'air chaud et humide venu du fond du réseau y circule dans l'autre sens, avec de la condensation qui ruisselle littéralement sur les plafonds (et sur les lunettes) (photographie 15).

Au cœur du système, l'hygrométrie est à saturation et par endroits la température dépasse 38 ° C... Dans ces conditions, il est physiologiquement impossible de fournir un effort soutenu, l'hyperthermie est la sanction immédiate : les rares explos du P140 ont été réalisées en 1998 par le Club alpin italien de

Trieste avec un treuil (plus exactement un guindeau, qui sert en principe à remonter l'ancre sur un bateau) et des « scaphandres » spéciaux ventilés à l'intérieur par de l'air comprimé envoyé par un compresseur installé dehors et, forcément, un tuyau à air suiveur...

Kronio est en fait un énorme alambic (mon rêve...) chauffé par une géothermie de tous les diables bien sicilienne (l'Etna n'est pas loin), qui distille les eaux d'infiltration (y compris marines probablement, on n'est qu'à 2 km de la mer) et les condense dans les zones superficielles; la chaleur qui remonte des zones profondes active des pompes thermiques qui aspirent l'air au bas de la colline et le rejettent dans les « stuffe » vers le sommet. Et cet air acidifie la condensation dans les fissures où il circule, ce qui les a corrodées et à la longue élargies en galeries pénétrables : donc rien, mais alors rien à voir avec ce qu'on avait vu dans les épisodes précédents.

Le karst : alors, on est au courant (d'air), maintenant!

Kronio est évidemment un cas extrême où on voit la condensation-corrosion dans son paroxysme, mais les gradients thermiques normaux, même s'ils sont souvent saisonniers, suffisent à alimenter les mêmes processus en moins violent. Moins violents, mais assez efficaces pour altérer très souvent les parois sur des millimètres ou des centimètres... Et probablement, hélas, y bouffer la plus grande partie des œuvres pariétales qui ont pu être réalisées par les hommes préhistoriques depuis la nuit des temps. Ben oui, est-ce qu'on peut réellement penser qu'en 35 000 ans, les hommes se sont contentés d'une poignée de grottes pour s'exprimer? Ben quoi, ils ont eu les chocottes d'aller dans les autres? Ils avaient plus de piles à leurs torches? Non, ils sont probablement allés partout (ou presque) où nous, spéléologues modernes, on va, qu'est-ce que vous croyez? Qu'ils avaient pas le pied sûr? Et avec leurs charbons et leurs ocres, ils ont dû dessiner partout leurs petits Mickeys préhistoriques tout comme nos grapheurs exploitent le moindre mur dans leur environnement. Sauf que pour les premiers la condensation-corrosion a fini par nettoyer tout ça comme les services techniques municipaux pour les seconds. Ce n'est pas par hasard si les plus belles représentations pariétales ont été trouvées dans des cavités préservées de la condensation-corrosion par accident, genre éboulement ou remontée du niveau marin comme à Lascaux, Cosquer ou Chauvet... C'est juste que les autres ont été corrodées, parfois en partie, souvent totalement.

Plus généralement, avec le temps, la condensation-corrosion retouche les formes au point d'effacer parfois totalement les indices de la formation initiale des réseaux, et peuvent même transformer des conduits « rastègues » en galeries confortables pour le plus grand plaisir du spéléologue, préhistorique ou historique. Rien ne sert de courir, il faut condenser longtemps... Et en géologie, on a du temps, beaucoup de temps.

On est loin du modèle classique de Martel... Mais bon, finalement pas tant que ça quand même : courant d'eau ou courant d'air, il faut toujours un courant pour creuser les trous, voilà tout.

Toujours?

Pas si sûr, les gars, pas si sûr...



Photographie 15: Grotte della Cucchiara (Monte Kronio); ce sont les gouttelettes d'eau qui donnent cet aspect argenté à la voûte, où l'air qui remonte du fond du réseau à plus de 35 ° C et saturé d'humidité dépose constamment de la condensation. Elle corrode le calcaire et ruisselle sur les parois; les altérites entraînées par le ruissellement s'accumulent en croûtes au bas des parois, où l'air sec et frais venu de l'extérieur a tendance à assécher le film humide. On peut voir à la voûte une coupole en formation (cliché de l'auteur, pas facile de faire des photographies dans ces conditions, les appareils photographiques sont plein de buée parce qu'ils ont du mal à s'équilibrer avec la température du lieu. Le photographe aussi...).

Fantôkarst contre Wallon yard

Ou « L'inspecteur Karst contre la spéléogénèse aux mille visages »

La karstologie expliquée par un nul,
par Karst Marx Brother



Alors où on en était, déjà? Ah oui.

D'abord on avait vu dans le n°124 que si des trous se creusent dans le calcaire, c'est à cause que le carbonate de calcium qui le compose en grande partie est susceptible aux acides même pas trop nerveux, comme un que justement y'en a plein dans la nature: celui qui se forme lorsque du gaz carbonique se combine avec de l'eau.

Puis dans le n°133 on avait vu qu'à la fin du XIX^e siècle, Martel et Cvijić, illustres précurseurs de la karstologie, avaient bâti leur théorie de la formation des grottes et des gouffres sur un exemple beau comme un appartement-témoin: le plateau du Kras en Slovénie (à l'époque: du Karst en Autriche), vu que le premier y était allé en vacances avec ses parents

et que le second était plus ou moins du pays. Leur modèle repose sur un drainage des eaux de pluie et de ruissellement spécifique aux massifs calcaires: au lieu de circuler en surface sous forme de ruisseaux qui font de grandes rivières comme partout ailleurs, l'eau y exploite les fissures, les élargit en corrodant le carbonate (figure 1), circule à travers la masse rocheuse (figure 2) et ressort sous forme de sources dans les vallées au pied du massif (figure 3). Eh bon, voilà, ça fait des pertes, des gouffres, des galeries, des grottes et des résurgences. Ce modèle « fluvio-karstique » était tellement LA référence que depuis un siècle tout massif calcaire est appelé un karst, c'est vous dire.

Figure 1: une perte karstique à l'embut de Caussols (Alpes-Maritimes).
Cliché de l'auteur. ↗

Figure 2: une circulation karstique dans la grotte de Milandre (Jura Suisse).
Cliché B. Losson. ↓





Figure 3 : une exsurgence karstique à La Balme d'Épy (Jura). Cliché de l'auteur.

Mais dans le n° 144 on avait vu que parfois l'eau qui creuse les trous ne tombe pas du ciel pour descendre à travers le calcaire : dans certaines grottes c'est exactement l'inverse, elle REMONTE à travers le calcaire ; c'est ce qu'on appelle depuis les années 1980 la *spéléogenèse hypogène*, un processus physique complètement différent du modèle classique de Martel. Même que dans ces cas-là la corrosion peut être sulfurique plutôt que carbonique (figure 4), ce qui pour le coup est très différent aussi sur le plan chimique.

Et puis dans le n° 147 ça s'est encore corsé ; on a vu qu'il n'y a même pas forcément besoin de circulations d'eau pour creuser le karst, les simples circulations d'air bouffent le calcaire parce que l'air transporte les agents corrosifs : l'eau sous

forme gazeuse qui se condense sur la roche, et le gaz carbonique (éventuellement l'hydrogène sulfuré) pour l'acidifier. On a vu aussi que les chauves-souris et leur guano produisent entre autres gaz plus ou moins inélégants du CO₂ à gogo, un vrai turbo pour cette *spéléogenèse par condensation-corrosion* (figure 5). Un processus chimiquement voisin de ce qu'on avait vu dans le n° 124, mais physiquement là encore rien à voir... Mais on en avait conclu que, courant d'eau ou courant d'air, il faut quand même toujours un courant pour creuser les trous.

Toujours ?

Ben non. Y'a des grottes qui se forment sans aucun courant de rien du tout. Je sais, c'est énervant, mais c'est pas de ma faute.



Figure 4 : un petit matin de décembre en Sicile... Un karstologue vérifie scientifiquement que la source de Segesta est hydrothermale et sulfureuse : oui, l'eau est à 27 °C et pue les œufs pourris, donc c'est bien celle-là qui a creusé les gouffres hypogènes sulfuriques de l'Eremita et dei Cocci juste à côté. L'eau sulfureuse, c'est pas bon pour le calcaire mais c'est très bon pour la peau. L'odeur colle quand même un peu, après je vous dis pas dans la baignole. Cliché de l'auteur.



Figure 5 : dans les grottes « à chiros » la condensation-corrosion agrandit globalement les conduits, mais crée aussi par convection des morphologies en coupoles, nichoirs tout trouvés pour les chauves-souris, ce qui va les approfondir encore plus par condensation-corrosion et par bio-corrosion (par les acides organiques). Schéma Philippe Audra.

« Avec ses cathédrales pour uniques montagnes, avec ses carrières pour uniques falaises, regardez-le karstifier, le plat pays qui est le mien... » (Karst Brel)

Dans les années 1990, des karstologues de la fac de Mons (Belgique), avec en tête le professeur Yves Quinif et une doctorante, Anne Vergari, partis fureter dans les carrières du coin où on exploite un beau calcaire plein de petits fossiles très jolis, se sont intéressés à des trucs qui embêtaient bien les carriers : par endroits, dans la bonne roche massive, ils tombaient sur des grosses masses toutes friables toutes nazes ; ça se prolongeait parfois sur des dizaines de mètres derrière le front

de taille, parfois jusqu'au sommet de la couche calcaire, ça faisait comme des corridors ou bien des sortes de puits, ou des poches, des conduits, mais toujours pleins d'un truc argilo-granuleux (figure 6). C'était bien délimité, mais quand même rien de tel pour bousiller un front de taille et te pourrir l'exploitation...

Comme ça ressemblait à d'anciennes grottes bourrées de remplissage (figure 7), forcément nos karstologues sont allés voir ça de plus près ; mais bon, ce qui

était bizarre c'est qu'on retrouvait dans ce soi-disant remplissage les mêmes fossiles que dans la roche, avec la même répartition. Et puis tiens, quand un filon de calcite bien blanc traversait la roche, ben il traversait aussi le soi-disant remplissage (figure 8). Pareil, quand il y avait un joint de strate dans la roche, il se voyait aussi dans le soi-disant remplissage. Bon, bah c'est simple : c'était pas du remplissage, c'était juste la roche en place, mais toute pourrie. Ça ressemble à de la roche mais



Figure 6: au front de la carrière de Hainaut (Belgique), une des formes « pseudoendokarstique » que les engins ont recoupée et en partie vidée. Celle-ci ressemble à un puits. Cliché Yves Quinif.



Figure 7: le décaissement du tunnel de Bure (Autoroute A16, Jura Suisse) a recoupé des cavités qui ressemblent à des conduits colmatés d'argile. Sauf qu'ils sont isolés dans la masse rocheuse et non interconnectés... Ce n'est pas un réseau mais des volumes d'altération *in situ*. Le front d'altération s'est diffusé à partir d'une diaclase et a exploité les interstrates comme l'aurait fait un courant d'eau... Sauf que, sans amont et sans aval, l'eau n'a jamais pu couler là ! Cliché Didier Cailhol.



Figure 8: le fantôme de l'Excursion (carrière Gauthier-Wincqz, Soignies, Belgique): la partie altérée se distingue par sa couleur plus sombre. Les filons de calcite blanche qui traversent l'ensemble montrent qu'il s'agit de roche encaissante altérée *in situ* et non d'un remplissage remanié. Cliché Yves Quinif.

c'est plus de la roche, juste un souvenir de roche. Une roche fantôme, quoi.

En l'analysant, ils ont vu que cette roche fantôme est juste « décarbonatée » : la calcite qui fait ciment a été corrodée, il reste essentiellement la partie argileuse ou siliceuse et les petits fossiles plus durs, du coup la roche n'est plus du tout compacte.

Pour corroder le carbonate, il fallait forcément que de l'eau, un peu acidifiée par du CO₂ comme d'hab', ait imbibé la porosité et les discontinuités de la roche et puis qu'elle ait circulé pour évacuer les solutés. Circulé, oui, mais très très doucement sinon elle aurait dégagé les insolubles comme ça se passe dans le karst classique des bouquins, et bon, ça aurait fait un trou creux. Là, c'étaient des trous pleins, c'étaient même comme qui dirait des non-trous, des idées de trous.

Très doucement, ça veut dire pas de vitesse, pas d'énergie, donc pas de gradient, pas de dénivelé qui permette à l'eau de couler et de faire un bon vieux drainage à la Martel voir *Spelunca* n° 133 p. 23). Et bon, faut bien avouer que la Belgique, question gradient, hein... Brel chantait « Le plat pays qui est le mien », ben voilà : ici y'a plus de degrés dans la bière (purée, j'adore la Belgique...) que dans la pente des paysages. Pas de montagnes, donc pour l'eau souterraine pas de vallée

en contrebas où ressortir, pas d'exutoire, du coup sous la surface du sol l'eau ne circule pas vraiment.

Pourtant une fois que l'eau a bouffé sa dose de carbonate et qu'elle est « saturée », faut quand même bien qu'elle se renouvelle pour que la corrosion continue, non ? Et si elle ne circule presque pas, du

coup il faut forcément beaucoup de temps pour qu'elle se renouvelle ? Ben oui, beaucoup, mais en géologie, du temps souvent on en a, et justement la Belgique ça fait en gros 200 millions d'années que c'est un plat pays : c'est bien assez pour que, dans les zones les plus perméables du calcaire (principalement les fissures) de l'eau



Figure 9: ces grès surmontent les célèbres ocres de Rustrel (Vaucluse) et épongent depuis une centaine de millions d'années les eaux de pluie. Des oxydes de manganèse ont migré dans la masse minérale et, au gré de variations d'humidité, se sont concentrés en auréoles appelées *anneaux de Liesegang*. Pour cette migration de minéraux, il suffit d'avoir de la porosité, de l'eau dedans et pas mal de temps : la fantômisation ça marche aussi comme ça. Cliché de l'auteur.

emporte les carbonates tout doucement, millimètre par millimètre... D'ailleurs, en fait, dans une roche poreuse il n'y a même pas besoin d'une vraie circulation pour faire migrer les sels minéraux, de simples va-et-vient de molécules d'eau suffisent (figure 9). Donc voilà, ces *fantômes de roche* c'est simplement une altération très lente et très longue par l'eau diffuse, sur place, sans évacuation des résidus, une altération qui se produit quand l'eau souterraine ne peut pas s'écouler et éroder.

Bon, d'accord, les fantômes existent en géologie, mais c'est quoi le rapport avec les grottes, alors ?

Tant karst faire...

Ben le rapport il a vite sauté aux yeux des karstologues wallons quand ils ont vu de l'eau sortir d'une de ces poches d'altérites (figure 10).

Dans un plat pays ou y'a ni montagnes ni falaises, pour faire une carrière pas le choix : faut creuser. C'est pourquoi dans les plaines des Hauts-de-France et en Belgique, les carrières c'est le plus souvent de grandes excavations de plusieurs dizaines (parfois centaines) de mètres de profondeur. Du coup l'eau souterraine de la nappe phréatique y trouve un point bas



Figure 10 : dans la carrière de Nocarcentre (Belgique), ce couloir de fantômisiation a été recoupé par le front de taille; un drainage de la nappe phréatique a pu se mettre en place, et le courant d'eau est en train de vider le fantôme en évacuant ses altérites. Cliché Yves Quinif.

pour ressortir, même que si t'as pas de bonnes pompes pour virer la flotte tu te retrouves vite fait avec un lac à la place de ta carrière. Et comme l'eau de la nappe est virée dès qu'elle sort, eh ben elle re-coule, en permanence; les carriers et leurs pompes font donc en quelques mois le boulot que l'orogénèse, l'incision des vallées et la géologie en général mettent des millions d'années à faire : ils créent un gradient hydraulique là où il n'y en avait pas, et du coup un drainage dans le karst. Et d'après vous, cette eau qui stagnait bêtement dans le calcaire et qui

se met à circuler dans la masse rocheuse, par où elle passe ? Ben oui, par les zones les plus perméables, forcément. En l'occurrence, par les zones fantômées. Et voilà, dans les carrières les fantômes se mettent à te drainer le calcaire comme des vrais conduits fluvio-karstiques à la Martel.

Résultat : comme ces écoulements-là, eux, ont un gradient et de l'énergie, ils arrachent les altérites, ils te récurent tout ça bien comme il faut, et au bout du compte quand les fantômes sont vidés il reste quoi ? Des couloirs, des puits et des galeries dans du calcaire massif, éventuellement axés sur fracture (figure 11), avec même des fois un ruisseau qui court au fond. Exactement ce qu'on voit dans plein de « vraies » grottes, du bon p'tit fluvio-karst tout ce qu'il y a de « normal », bien propre sur lui ! Quels hypocrites, ces fantômes... C'est vraiment à s'y méprendre.

Et d'ailleurs...

L'arnakarst !

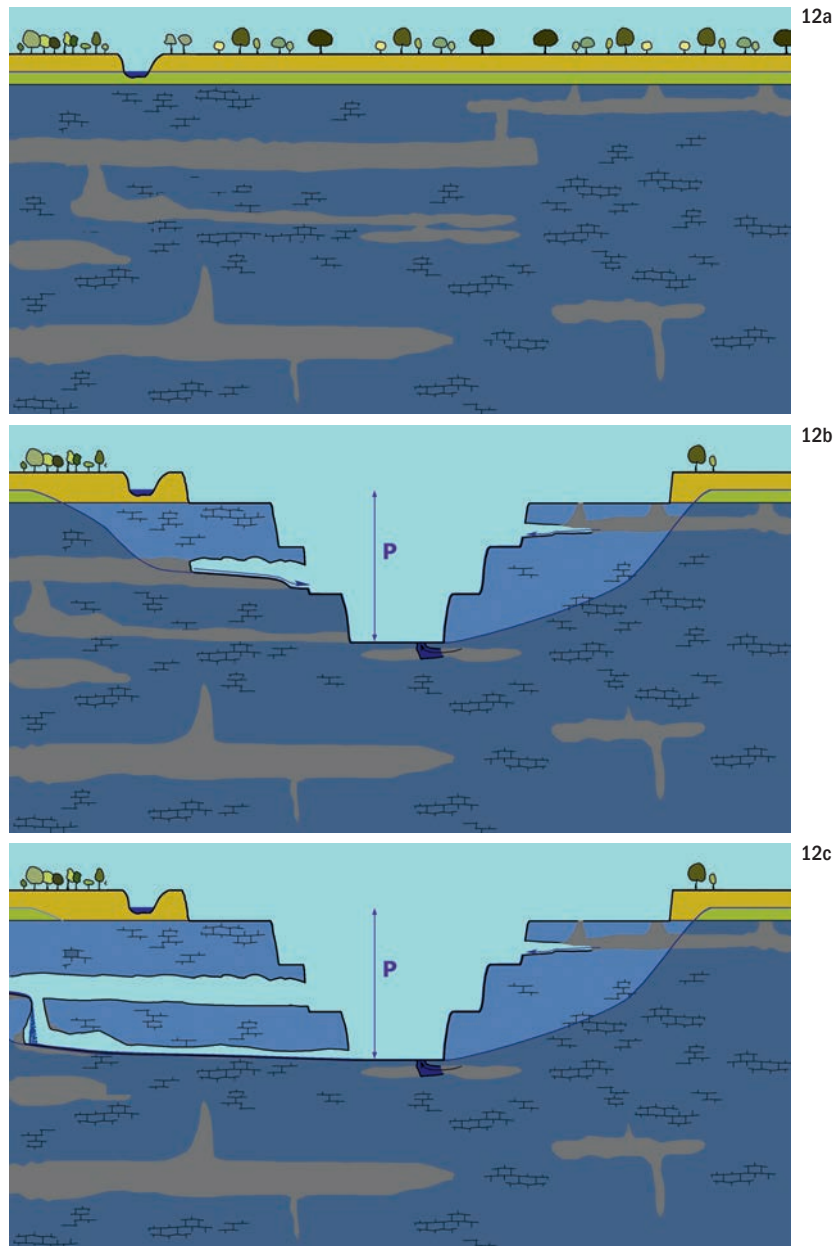
D'ailleurs, avant d'être portés en altitude par des orogénèses plus ou moins vigoureuses, avant que l'encaissement des vallées périphériques ne les ait drainés, plein de karsts ont commencé par être à un moment ou à un autre des plats pays... Beaucoup ont pu stagner des milliasses et



Figure 11 : un fantôme complètement vidé, ici dans la carrière de Clypot (Belgique), ressemble parfaitement un conduit karstique « normal », avec même des morphologies qui miment des banquettes paragénétiques et un méandre. Cliché Yves Quinif.

des milliasses de millénaires pleins d'une flotte fainéante qui se contentait de digérer le calcaire là où elle pouvait l'imbiber, et fabriquer lentement de la roche pourrie. Après, lorsque l'orogénèse et l'érosion en ont fait des massifs perchés avec un potentiel hydraulique, ben là le drainage il était tout préinstallé : les écoulements n'avaient plus qu'à découper les fantômes selon les pointillés, et en quelques dizaines de milliers d'années on te démodule un réseau de grottes et un simili-fluvio-karst bien propres, ni vu ni connu (figure 12 a, b et c). Du coup, des anciens fantômes évidés, ben si ça se trouve on en connaît plein sauf qu'on ne voit plus que c'en est...

Eh ben justement, reculons de trois pas et voyons ça d'un peu plus loin : faut bien avouer que nos inventaires spéléologiques sont farcis de moutons à cinq pattes qui rentrent vraiment pas bien dans le modèle fluvio-karstique, non ? Dans le modèle « classique », normalement les réseaux devraient être organisés selon une logique hydrographique : un chevelu de petits amonts qui convergent, se hiérarchisent en descendant et suivent une direction préférentielle (celle du gradient hydraulique) pour faire un drain principal (le « collecteur »). Oui mais voilà, y'a plein de réseaux bizarres, qui descendent pas franchement, avec des conduits plus ou moins en zigzags qui suivent plus la fracturation qu'un gradient hydraulique, du coup parfois bizarrement organisés en réseaux parallèles réunis par des jonctions en baïonnette, au final tellement labyrinthiques qu'on ne voit pas trop où sont les amonts et les avals surtout



Figures 12a, b et c : création de fantômes de roche et intégration dans un karst « classique » dès lors qu'un gradient se crée et permet la mise en place d'un drainage qui évacue les altérites. (Schéma Yves Quinif)

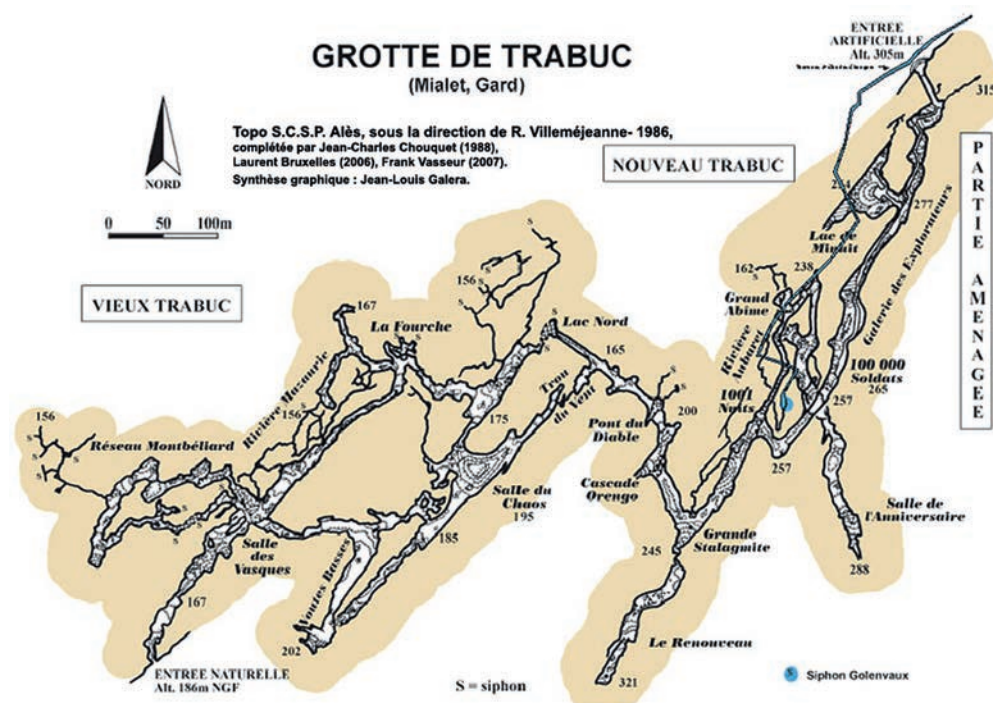


Figure 13 : topographie d'ensemble de la grotte de Trabuc. Vous y voyez un collecteur et une ramification d'affluents, vous ? Ou une direction de drainage ? Topographie Société cévenole de spéléologie et de préhistoire d'Alès et contributeurs.

quand ils ne sont pas actifs (figure 13)... C'est quoi au juste ces réseaux-là? On y voit même des galeries qui, cash, s'arrêtent en cul-de-four: et alors elle passait par où la flotte? Là, t'as beau forcer sur le chausse-pied, le système « classique » ça marche plus du tout; en revanche, la fantômisatation explique tout ça très bien!

Tiens, je vais vous décevoir: manifestement, la plupart de nos superbes méga-lapiés ruiniformes genre Païolive en Ardèche, Montpellier-le-Vieux en Aveyron, Nîmes-le-Vieux en Lozère ou bien encore Saint-Barnabé dans les Alpes-Maritimes (figure 14), ne se sont pas formés comme on t'explique dans les brochures de l'Office de tourisme: la pluie qui élargit les fissures bla-bla bla... En fait, ce sont probablement des fantômes nettoyés de leurs altérites après exhumation. Eh ben pareil, beaucoup de grottes qui paraissent plus ou moins « normales » ont dû au départ naître fantômes de roche avant d'être vidées, voire réutilisées dans du vrai fluvio-karst... Parce que quand un drainage karstique se met en place, la flotte, qu'est-ce que vous croyez, elle va pas se fatiguer à taper dans le dur, elle va faire avec ce qui existe déjà: si y'a déjà du trou ou du



Figure 14: lapiaz ruiniforme de Saint Barnabé, col de Vence (Alpes-Maritimes): ce paysage étrange excite l'imaginaire des ufologues qui y viennent la nuit traquer l'OVNI. Les karstologues y voient plutôt des fantômes: une altération sous couverture commandée par la fracturation a décarbonaté les parois des diaclases de ce calcaire jurassique; lorsque la couverture a disparu, les altérites tendres ont été dégagées, laissant émerger entre les couloirs d'altération les parallépipèdes de roche saine, que l'érosion météorique et nivale subactuelle émousse en chicots striés de *rillenkarren* (cannelures). Le processus initial, souvent nommé *cryptocorrosion*, n'est rien d'autre qu'un cas de fantômisatation. Cliché Jean-Yves Bigot.

presque trou, ben vu que le fantôme c'est toujours plus facile à creuser que le bon calcaire, elle va s'en servir. Je sais, c'est moins géo-poétique que dans le bouquin de classe, mais c'est comme ça. Si ces

conduits-là sont aujourd'hui pénétrables, c'est que le fantôme a disparu (comme dirait La Palisse), du coup bien malin qui peut le voir aujourd'hui, et encore plus malin qui pouvait le comprendre avant...

Des grottes fantômes ??? Ça va tourner à la karstomancie cette histoire...

Dans le passé, plein de spéléologues, de karstologues, d'ingénieurs des mines étaient tombés par hasard sur les rares reliques spéléologiques de ces altérations *in situ*; beaucoup avaient vu ces lits de chailles ou de silex, ces fractures ou ces joints de strates bizarrement en continuité entre l'encaissant et le pseudo-remplissage, mais sans qu'un modèle conceptuel n'en sorte. Bizarrement, les grandes idées émergent souvent à peu près en même temps dans plusieurs endroits: pendant qu'en Wallonie les karstologues de Mons invoquaient les fantômes dans les carrières du Hainaut, dans les carrières de craie de Normandie Joël Rodet vidait à la Mansonnrière un « labyrinthe d'altération » de ses altérites, et appelait ça un *primokarst*. La chance peut-être qu'ont eue les karstologues de Mons, c'est de voir la vidange spontanée de ces fantômes grâce à la création artificielle d'un gradient hydraulique, ce qui a permis de mettre en évidence qu'il peut y avoir après la fantômisatation une spéléogénèse complète.

Anne Vergari soutient en 1997 sa thèse de doctorat dans laquelle elle décrit

le modèle global, qui a rapidement été consolidé par de nouvelles observations: en 1999, Paola Tognini identifie dans les grottes du Monte Bisbino (Alpes italiennes) l'héritage d'une fantômisatation datant de 25 à 5 millions d'années, recyclée ces cinq derniers millions d'années en karst « normal » lorsque les Alpes se sont soulevées et que les vallées se sont creusées; en 2002, le karstologue Laurent Bruxelles (qui est en fait français et de Montpellier) utilise le modèle de façon prédictive pour prospecter (et trouver!) de nouvelles cavités (*Spelunca* n° 88, « La chasse aux fantômes dans les Grands Causses. Utilisation d'un nouveau concept de spéléogénèse dans la recherche de cavités. »): c'est carrément une preuve par « neuf »...

Plus récemment, en France, les grottes de Trabuc (figure 13) ou le Trou du Bois du Clot à Pranzac (Charente) ont eux aussi trouvé dans la fantômisatation initiale une logique génétique (Laurent Bruxelles, Grégory Dandurand, *Karstologia mémoires* n° 19, « Grottes et karsts de France », coordinateur Ph. Audra, p. 306-307 et

326-327). Grégory a même argumenté dans sa thèse de doctorat l'hypothèse de la fantômisatation profonde du karst charentais (un autre « plat pays »...) et de l'utilisation de ces proto-conduits par le fluvio-karst de La Rochefoucault: voilà qui expliquerait enfin pourquoi les sources de la Touvre (la deuxième exurgence de France après Fontaine de Vaucluse, rien que ça!) qui jaillissent à 50 m d'altitude ont pu être plongées jusqu'à -180 sans trouver le point bas! Car dans le karst martélien rien n'explique clairement que des réseaux puissent se creuser sous le niveau le plus bas atteint par l'océan à travers les temps géologiques, alors que la fantômisatation explique très bien que dans la zone noyée le calcaire s'altère, puis que des fantômes profonds puissent être dégagés et utilisés comme drains.

Et le processus de fantômisatation permet même maintenant de comprendre comment des grottes peuvent se creuser dans des roches non calcaires, comme les quartzites des tepuis vénézuéliens ou des gneiss et des gabbros au Cameroun!

Fantômisation express !

La fantômisation c'est très long, mais à la cocotte-minute forcément ça va plus vite...
Et s'il y a sur Terre un endroit qui ressemble à un autocuiseur, c'est bien l'Islande !

L'île est faite pour l'essentiel de bon basalte bien costaud. Le basalte, sous l'action des acides organiques de l'humus, ça finit par s'altérer, surtout sous climat tropical humide : pour faire simple, les aluminosilicates qui le composent s'hydrolysent et ça donne principalement du silicate d'alumine hydraté, de l'argile pour causer poliment ; mais normalement, ça, ça prend des éternités, disons des millions d'années sans être trop marseillais... Or l'Islande déjà c'est pas vraiment tropical, et puis l'île est trop jeune pour ce truc de vieux continent : une grande partie de ses basaltes sont quaternaires, autant dire d'hier...

Trop jeune, l'Islande, c'est pas faux, mais à côté de ça elle est toute grêlée de zones géothermales où fusent à travers la roche de la vapeur d'eau surchauffée et pleine de gaz (CO_2 , H_2S , SO_2 , HCl ...) qui ne demandent qu'à faire des acides bien piquants (carbonique, sulfureux, sulfhydrique, sulfurique, chlorhydrique...) : à ce régime-là, le basalte ne fait pas le malin bien longtemps ! Près du lac Mývatn par exemple, le volcan Krafla a recouvert la région il y a 2000 ans d'une coulée de lave dite « la jeune Laxá ». À Leirhnjúkur, elle est truffée de fumerolles et de solfatares : à ces endroits-là le basalte, cuit à l'étouffée par les vapeurs et imbibé d'acides, est complètement décomposé en argile (Leirhnjúkur, en islandais, ça veut dire « colline d'argile »)... On voit sur la photographie 1 le basalte non altéré au premier plan, et au second le basalte compté par les vapeurs acides dont on le voit tout fumant : là, il est complètement pourri à cœur, réduit en une argile sableuse qui se casse à la main sans trop forcer. La photographie 2, prise à 200 m de la photographie 1, montre la différence entre ce basalte altéré et le basalte sain d'une coulée du Krafla toute fraîche (entre 1975 et 1984)... Cette altération du basalte de la Laxá s'est forcément faite après la coulée (comme dirait Laxá Palisse), du coup en pas plus de deux petits millénaires : quasiment de l'instantané. L'érosion n'a même pas eu le temps de déblayer les argiles, du coup on voit partout des blocs de basalte pourri où sont emballés des morceaux que la coulée de lave avait arrachés au substrat, qui, plus compacts, ne sont pas encore trop altérés (photographie 3).

Altération sur place, isovolumique, structure de la roche originelle respectée : on est bien dans un cas particulier de fantômisation, une fantômisation rapide, mais surtout une fantômisation hydrothermale, donc hypogène... Et si un panache hydrothermal est capable de bouffer du basalte, il est facile d'imaginer ce que ça peut faire dans du calcaire même si on n'est pas dans le paroxysme islandais ! CQFD.



Photographie 1 : zone de solfatares dans les basaltes du Krafla.



Photographie 2 : basalte frais et basalte altéré.



Photographie 3 : inclusions préservées dans le basalte altéré. Clichés de l'auteur.

Fantokarst ou la spéléogénèse aux mille visages : le maître du monde souterrain ?

La fantômisatation explique donc la genèse réelle de cavités qui, parfois, semblent pourtant « normales » parce que récupérées dans une seconde phase par des processus fluvio-karstiques. Mais elle ne concurrence pas ce modèle-là : elle le complète, parce que ce n'est pas l'un OU l'autre, c'est l'un APRÈS l'autre.

Et pas que le modèle fluvio-karstique, d'ailleurs... En effet, cette altération lente *in situ* des calcaires, si elle peut se faire avec l'eau qui s'infiltré lentement d'en haut pour faire une nappe phréatique, pourquoi pas aussi avec l'eau du dessous ? Avec les remontées diffuses de fluides profonds, souvent corrosifs, parfois minéralisés ? C'est probablement le cas dans pas mal de grottes-mines (genre la grotte d'Oilloki à Sainte-Engrâce, Pyrénées-Atlantiques, mais ça c'est juste mon avis) ou de mines tout court (genre la Grande Vernissière, figure 15) où ont été exploitées des minéralisations de galène dans des calcaires très altérés *in situ*. Il y aurait donc une fantômisatation épigène (ou plus exactement endogène) et une fantômisatation hypogène (voir encadré)... Car il est sans doute aussi difficile de détecter une part originelle de fantômisatation dans les grottes hypogènes « évoluées » que dans les grottes d'apparence fluvio-karstique ! Les fosses charentaises, par exemple, on sait pas trop si c'est du fantôme ou de l'hypogène, les deux se discutent, mais après tout c'est peut-être les deux, non ?

Tiens, puisqu'on cause de ça, les grottes-mines de l'Iglesiente en Sardaigne... Moi qui suis pourtant à moitié rital j'y suis jamais allé, et puis de toute façon j'y connais pas grand-chose en karstologie, mais quand même, vu de loin, hein... Des volumes fermés non interconnectés qui n'ont aucune sortie en surface... Des zones de calcaires intensément altérés, des sédiments argilo-silteux qui m'ont plus l'air d'altérites à peine remaniées que de bouse de vache venue de la surface on ne sait pas comment... Des figures de corrosion différentielle (« Boxworks ») qui rappellent les filons de calcite dans



Figure 15 : fantôme de roche dans l'ancienne mine de la Grande Vernissière (Fressac, Gard). La galerie a recoupé des volumes d'apparence argileuse où on peut sans problème planter une truelle ; mais en fait la structure de l'encaissant y est conservée, la stratification initiale se voit bien à gauche du torse du personnage, et les zones noires dans la masse altérée sont des silex qu'on retrouve en continuité dans le calcaire sain. Même les filons minéralisés se retrouvent en continuité dans le fantôme. Cliché Jean-Yves Bigot.

les fantômes du Hainaut... Les copains karstologues italiens disent que tout ça c'est de l'hypogène, bon, OK, aucun doute là-dessus, mais une de ces cavités est carrément creusée dans des quartzites : même pour de l'hypogène c'est quand même zarbi, non ?

Sans vouloir balancer du gros fromage qui pue dans les carstologghi bolognaise, si ça se trouve, dans les années à venir, on aura sur l'origine de ces cavités-là un autre regard comme ça s'est passé pour Trabuc, parce que si c'étaient de bons vieux fantômes récupérés par une spéléogénèse plus récente et ici effectivement hypogène, ça n'aurait pas une autre gueule... Tiens, délirons un peu : il y a 300 millions de pignes entre le Carbonifère et le Trias, à vue de nez il y avait tout ce qu'il faut et tout le temps pour faire des fantômes dans ces calcaires cambriens, et au pif, à l'Oligo-Miocène, l'ouverture du bassin méditerranéen occidental avec tout le bazar volcanique et hydrothermal que ça a foutu dans le secteur, ça a dû être au top pour te faire du bon gros hypogène qui les

aurait récurés et retouchés, ces fantômes. Enfin, je dis ça et pis je dis rien, c'était juste mon côté Marx Brother, mais quand même faut avouer que c'est tentant... « Se non è vero è ben trovato¹ », non ?

En tout cas, on commence bel et bien à identifier une fantômisatation initiale dans beaucoup, beaucoup de cavités, des bizarres et des apparemment « normales », et ce n'est que le début... Les fantômes, en fait, une fois qu'on sait ce que c'est, c'est comme les cavités hypogènes et les emmerdes : plus tu cherches, plus tu en trouves...

Bon, alors c'est bon, là, maintenant ? Spéléogénèse fluvio-karstique, hypogène carbonique, hypogène sulfurique, par condensation-corrosion, et maintenant spéléogénèse après fantômisatation : des courants d'eau, des courants d'air, pas de courant du tout, par-dessus, par-dessous... Là on a fait le tour de la question dans tous les sens, non ?

Mouais... Vous croyez vraiment ?

1. « Si ce n'est pas vrai, c'est en tout cas bien trouvé » proverbe italien ancien, notamment cité au XVI^e siècle par le moine et philosophe Giordano Bruno dans un dialogue imaginaire entre le Cœur et les Yeux.

Le karst, plus tu y cherches des réponses et plus tu y trouves des questions...

La karstologie expliquée par un nul,
par Karst Marx Brother



Figure 1 : coloration de la perte du lac de Lignin (alt. 2300 m, Colmars-les-Alpes, Alpes de Haute-Provence), un extrême amont du système fluvio-karstique Coulomp-Chamois. Cliché de l'auteur.



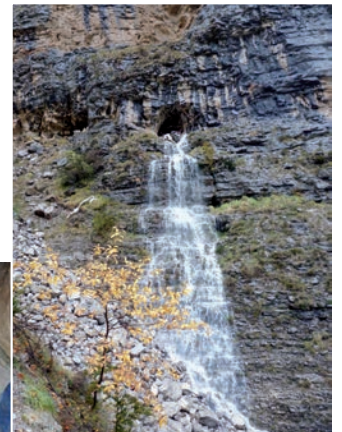
Figure 2 : 900 m plus bas et 5 km plus loin, le Coulomp souterrain. Les bouées, ça fait sourire, mais dans une rivière où le débit d'étiage est de 500 l/s c'est pas si idiot que ça. Cliché J.-Y. Bigot.

Résumé des épisodes précédents

D'abord, on a vu dans les n° 124 et 133 que Martel et Cvijić ont expliqué il y a un siècle comment les grottes et les gouffres se creusent dans le calcaire : c'est l'eau de pluie ou les ruissellements de surface qui s'enfoncent dans les fissures, en corrodant le carbonate grâce à l'acide carbonique (figure 1) ; sous terre, les eaux convergent, forment des rivières souterraines (figure 2) et résurgent dans les vallées (figure 3). Et hop, voilà l'affaire.



Figure 3 : la grotte des Chamois, émissaire fossile de la source du Coulomp, résurgant lors de la crue du 6/11/2011. Vu l'accès scabreux, rares sont ceux qui ont pu assister à ces crevaisons. Clichés Ph. Audra.



Puis dans le n° 144 (« Attention, un karst peut en cacher un autre ») on a vu que dans les années 1970 des margino-karstologues ont commencé à démontrer qu'il existe un autre mode de creusement, par de l'eau qui ne tombe pas SUR le karst mais le traverse PAR-DESSOUS (figure 4); même que dans ces cas-là, parfois, c'est pas du bête acide carbonique qui bouffe le calcaire, mais de l'acide sulfurique indirectement produit par des bactéries zarbies qui se régalent de sulfures et de sulfates. C'est la *spéléogénèse hypogène*.

Après, dans le n° 147 (« Le karst: y'a de l'eau dans le gaz! »), on a vu que depuis une trentaine d'années d'autres margino-karstologues ont aussi montré que les circulations d'air, invisibles contrairement aux circulations d'eau, ont pourtant un rôle bien plus important qu'on l'imagine dans la formation des grottes: en effet, l'air transporte de l'eau et (au moins) du CO₂, tout ce qu'il faut pour bouffer le carbonate. C'est la *condensation-corrosion*: plus y'a de vide et plus y'a d'air, plus y'a d'air plus y'a de condensation, du coup plus y'a de corrosion, total ça fait encore plus de vide (figure 5).

Et puis dans le n° 149 (« Fantôkarst contre Wallon Yard ») on a vu que depuis une vingtaine d'années d'autres margino-karstologues encore ont démontré que certains réseaux ont été initialement créés par aucun de ces processus-là, mais par autre chose, une altération chimique du calcaire sur place sans circulation de fluides et sans création de vides (en tout cas au départ) (figure 6). C'est la *fantômission*.

Du coup, d'article en article, nous sommes tranquillement arrivés aux acquisitions les plus récentes, aux confins de l'univers connu en karstologie... Mais derrière ces limites provisoires de la connaissance, il y a encore beaucoup d'autres processus pour l'instant pas totalement cernés, voire carrément pas connus, qui creusent des trous.



Figure 4: des *folia* dans la grotte de l'Adaouste (Jouques, Bouches-du-Rhône), concrétions rares poussant à l'envers sous les parois déversées, considérées comme caractéristiques de zones noyées de cavités hypogènes où le CO₂ dégaze abondamment. Cliché J.-Y. Bigot.



Figure 5: grotte du Chameau (Maroc); la condensation-corrosion a raboté tous les anciens enduits de calcite jusqu'à éroder l'encaissant sur plusieurs centimètres de profondeur, ne laissant en saillie que quelques moignons des plus grosses concrétions. Cliché M. Renda.



Figure 6: des fantômes recoupés par le front de taille dans la carrière de Peusec (Garat, Charente). Cliché B. Losson.

Sous les pavés la plage, et sous la plage le karst...

Le grand Martel a beaucoup voyagé pour explorer des grottes de toutes sortes; en 1896, le voilà sur Majorque, un gros bloc de calcaire posé au beau milieu de la Méditerranée... Là, dans un village côtier, Manacor, il topographie les *Covas del Drach* qui se développent horizontalement à une vingtaine de mètres sous terre (c'est-à-dire en gros au niveau de la mer) sur deux bornes. Avec une vraie clairvoyance, Martel avait noté qu'on n'y voit aucune morphologie caractéristique du fluvio-karst, et vu qu'elles ne sont qu'à quelques dizaines de mètres de la mer il les avait classées parmi les « grottes marines » : c'était vague (☺) mais c'était bien vu. Bon, ça ne l'empêchera pas d'écrire en 1903 et 1921 que « d'une manière ou d'une autre » (quand on veut absolument y croire...) ces grottes étaient nées d'« anciennes pertes » d'un ruisseau de surface. Fluvio-karst, quand tu nous tiens...

Mais faut bien admettre que dans les massifs littoraux calcaires, à Majorque comme ailleurs, y'en a plein, des grottes pile poil au niveau de la mer (figures 7 et 8). Et puis même on voit souvent, le long des falaises marines calcaires, une encoche nette et continue dans la roche juste au niveau de l'eau (figure 9) : ça fait parfois pas loin du mètre de profondeur et les géomorphologues appellent ça une *encoche marine*. Au début, Martel en tête (☺), ils disaient que grottes et encoches c'était l'érosion due au battement des vagues : les encoches, bon, admettons¹, mais seulement voilà y'a aussi des réseaux littoraux qui se développent horizontalement au niveau de la mer sans aucune ouverture sur la mer, justement comme les *Covas del Drach*, même que c'est ça qui embêtait bien Martel. Tiens, un autre exemple à Majorque : la *Cova des Pas de Vallgornera*, un labyrinthe horizontal de 60 bornes de développement au total où on progresse partout le c... dans l'eau (figures 10 et 11). Pas de courant mesurable et pas d'exutoire connu : ce n'est donc pas une rivière souterraine ; l'eau est saumâtre, mais le réseau se trouve partout à bonne distance de la mer et les faibles variations cycliques de niveau qu'on y relève montrent un impact atténué et déphasé des marées, ce qui indique que la communication avec la mer est diffuse. Là aussi, grotte marine on peut le dire, mais creusée par les vagues sûrement pas ! Non, ce réseau est tout simplement

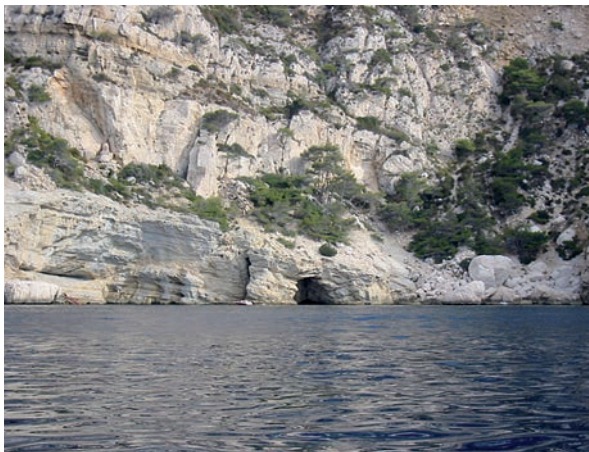


Figure 7 : une des nombreuses grottes marines des calanques de Cassis (Bouches-du-Rhône). Cliché de l'auteur.



Figure 8 : grotte marine de la Cova del Dimoni (Manacor, Majorque, Espagne), où le ressac est transmis à la nappe d'eau souterraine à travers des fissures noyées : ici, sans être le facteur prépondérant, l'érosion mécanique peut intervenir dans la spéléogénèse. Cliché J.-Y. Bigot.



Figure 9 : au pied des falaises des calanques de Cassis (Bouches-du-Rhône), l'encoche marine marque très finement le ras de l'eau : sa formation a donc lieu essentiellement en eau calme, privilégiant un processus de corrosion chimique au détriment de l'érosion par la houle. Cliché de l'auteur.

cénotes où parfois ça fait comme un nuage trouble et sulfureux dans lequel pour le plongeur il ne fait pas bon s'attarder. Tiens tiens, du H₂S... En s'oxydant ça donnerait pas de l'acide sulfurique, ça? Tu m'étonnes que le calcaire soit bouffé! Alors d'où il peut bien venir, cet H₂S?

Ben pour l'instant on n'en est qu'aux hypothèses. Il y a bien en Italie du sud quelques karsts côtiers où une partie de l'eau « douce », d'origine profonde, est sulfureuse, ce qui donne une « grotte marine hypogène » comme la Cala Fetente en Campanie; mais il semble bien que dans d'autres cas, au niveau du mélange

des eaux, il se passe que des bactéries qui vivent là métabolisent les sulfates de l'eau de mer, du CO₂ et des matières organiques (et sûrement d'autres choses qu'elles ont à grignoter) pour fabriquer de la matière vivante, et qu'elles libèrent en sous-produit du H₂S (et parfois aussi des oxydes de fer). Mais dans ce domaine, en vrai, presque tout reste à découvrir!

Ça peut paraître un peu « marginal » (c'est vrai, tous les karsts ne sont pas au bord de la mer), mais c'est pas aussi négligeable qu'on pourrait le croire. D'abord parce qu'on a un paquet de réseaux de

plusieurs dizaines de kilomètres qui se sont formés comme ça. Et puis aussi parce que, au fait, quand on y réfléchit... Dans le passé géologique lointain, certains de nos calcaires aujourd'hui perchés n'ont-ils pas été à un moment ou à un autre au bord d'une mer? Et les tout premiers creusements, du coup, selon quel processus s'y sont-ils produits à l'origine? Fantômisation, corrosion par mélange ou autres processus ont probablement fait naître plus souvent qu'on ne peut le soupçonner les cavités qui, hors de leur contexte d'origine, semblent aujourd'hui plus ou moins conformes au modèle « académique »...

The Invaders!

Lorsqu'on a parlé de la corrosion « normale » du calcaire, on a vu que le CO₂ qui donne l'acide carbonique est produit dans le sol par les bactéries qui y vivent.

Lorsqu'on a parlé de la corrosion sulfurique, on a vu que l'hydrogène sulfuré qui en est à l'origine est largué par des bactéries spécifiques qui se nourrissent de matière organique et de gypse.

Lorsqu'on a parlé de la condensation-corrosion, on a vu que le processus est dopé par des enduits bactériens sur les parois et par la fermentation (bactérienne pour l'essentiel) des guanos.

En 2011, dans sa thèse sur le karst de Charente, Grégory Dandurand a montré que les fantômes eux aussi sont farcis de bactéries, qui interviennent probablement dans le processus d'altération.

Ces dernières années, les karstologues italiens ont travaillé sur les grands réseaux de l'Auyan Tepui vénézuélien avec des microbiologistes italiens et australiens; et ils commencent à y voir que les processus d'altération qui creusent des grottes dans ces quartzites (en principe pas du tout karstifiables) et les concrétions insolites qu'on y trouve sont clairement en rapport avec des communautés de bactéries, dont ils pensent que d'une manière ou d'une autre elles utilisent le silicium dans leur métabolisme, et dont beaucoup sont sans doute nouvelles pour la science.

Et voilà maintenant que dans la *mixing zone corrosion* aussi les bactéries semblent avoir un rôle pas bien cerné mais de toute évidence significatif et peut-être même essentiel...

ARRRGH! Damned, mais elles sont donc partout, *PARTOUT!* Personne ne les voit, mais elles ont bel et bien envahi



notre planète... Un soir qu'il s'était perdu à la recherche d'une galerie qu'il ne trouva jamais, Karstic Vincent, lui, les a vues: LES BACTÉRIES!

Des bactéries, enfin des trucs microscopiques vivants, y'en a partout, y compris dans les endroits où apparemment rien ne devrait vivre: comme *Pyrococcus CH1*, une archée (bactérie primitive) qu'on a trouvée prospérant peinard à 100 °C et

sous une pression de 1200 bars dans une source hydrothermale océanique, ou bien *Sulfolobus acidocaldarius* qui pourrait vivre dans l'acide de la batterie de ta bagnole s'il y faisait au moins 60 °C, ou encore *Ferroplasma acidarmanus* qui bouffe de la pyrite et pisse de l'acide sulfurique. Des bactéries *stricto sensu*, aussi, comme *Desulforudis audaxviator* qu'on a trouvée dans une mine à 3 km de fond, se gavant de sulfate dans de l'eau à 60 °C pourrie d'uranium. Et encore, celles-là c'est celles qu'on connaît parce qu'on est tombés dessus... Parce que pour détecter des trucs qu'on voit même pas, mon gars, faut carrément du bol! Maintenant qu'on a des microscopes électroniques, on en trouve même fossilisées dans les roches sédimentaires, entre autres du genre *Desulforudis* justement (probablement responsables de



Figure 12: chrysochlores et cyanobactéries sur la voûte de la Baume obscure (Tourrettes-sur-Loup, Alpes-Maritimes). Tous les spéléologues en ont vu, mais il y a peu d'études et encore moins de publications sur ces algues primitives dont on sait peu de choses sur leur interaction avec la roche... Cliché de l'auteur.

la formation de la pyrite contenue dans ces roches). Mais c'est sûr qu'il y'en a plein qu'on n'a jamais vues ni étudiées, dont on ignore tout des interactions sur leur environnement. Surtout quand leur environnement est salement inaccessible. Les archées et les bactéries en géologie, c'est *Terra incognita*...

Tout ce qu'on sait sur les algues et bactéries en grottes (figure 12), c'est qu'elles sont à la base de la chaîne alimentaire cavernicole: bon, pour savoir ça, pas besoin de les connaître, il suffit de voir que des organismes (à peine) supérieurs s'en nourrissent; mais au-delà de cet aspect « biospel », on commence à comprendre que leurs interactions avec la spéléogénèse sont nombreuses, importantes et complexes, beaucoup plus qu'on pouvait l'imaginer. Il existe toute une floppée de bactéries, dites *chimiolithotrophes*, qui n'ont besoin ni de lumière ni de matière organique pour fabriquer leur propre matière, elles se débrouillent très bien juste avec du CO₂ (ou des carbonates) et des matières inorganiques ou minérales comme des nitrates, des sulfures, du soufre ou du fer: elles sont responsables d'une partie (qu'on ne sait pas encore mesurer) de l'altération des calcaires. En plus, d'autres (ou parfois les mêmes) participent aussi au remplissage (figure 13)...



Figure 13: *pool fingers* ou « baguettes de gours », concrétions sur filaments bactériens poussant sous les margelles de gours, ici asséché, dans Carlbud Cavern (Nouveau-Mexique). Ce type de concrétions passe souvent inaperçu mais est assez répandu. Ces bactéries créent du remplissage. Cliché de l'auteur.

Les indices qu'elles laissent permettent d'entrevoir des cycles complexes liant la roche encaissante, les remplissages, les apports chimiques et organiques transportés par les eaux de surface et eaux profondes, et les gaz corrosifs biogéniques (figures 14a & 14b)... Pour avoir la connaissance précise de ces processus il

faudrait connaître chaque bactérie planquée dans les fissures des massifs, et avec son CV encore, et ça on en est très loin! Il faudra donc que Karst Marx Brother revienne sur ce sujet... dans quelques dizaines d'années! Parce que pour l'instant, on est vraiment ici à la frontière de la connaissance...



Figures 14a et 14b: cet aven du Vaucluse (aven du Chat, Lagnes, Vaucluse) est un ancien conduit hypogène; des bactéries y ont exploité des sulfures ou sulfates de fer dissous, formant ces *pool fingers* d'oxyde de fer et libérant alors de l'hydrogène sulfuré: c'est une des phases de la spéléogénèse hypogène sulfurique. Cliché de P. Audra. L'échantillon provient d'une autre ancienne cheminée hydrothermale recoupée par un front de carrière à Malacoste (Vaucluse). Cliché de l'auteur.

Maintenant y'a plus karst conclure...

Au long de ces six articles, on a vu que le modèle de spéléogénèse inspiré par Martel, qui a pourtant fait consensus pendant un siècle, est loin de décrire tout ce qui peut se passer dans un karst: ce n'est en réalité qu'une des modalités de creusement dans le calcaire, la plus visible peut-être mais en fin de compte peut-être même pas majoritaire! Il suffit d'aller ailleurs que dans nos causses et nos montagnes calcaires, dans des régions où le modèle épigène « classique » n'est pas dans ses conditions idéales, pour voir à l'œuvre d'autres processus. D'ailleurs, lorsqu'on lit l'œuvre de Martel, on s'aperçoit qu'en fait ce *globe-trotter* de la spéléologie avait tout vu ou presque: même s'il s'est un peu colleté avec Daubrée et Meunier à ce sujet, les remontées d'eaux profondes, d'hydrogène sulfuré ou de gaz carbonique, il sait que ça existe (par ex. *L'évolution souterraine*, Flammarion 1908, pp. 43-46); la condensation-corrosion, il en a peut-être eu l'intuition (par ex. *La Spéléologie*, Scientia 1900, p. 25), et de la fantômisiation il n'en était peut-être pas loin (par ex. *La Spéléologie*, Scientia 1900, p. 27); simplement voilà, il était sur un terrain totalement vierge et ne pouvait pas tout mettre en système. En faire un qui tienne debout même s'il affirme beaucoup et n'explique pas tout, c'était déjà pas si mal...

Mais dis donc... **Un siècle de karstologie coïncé dans un modèle** sans que personne ne s'aperçoive qu'il était trop étroit... C'est énorme, non? Ça ferait pas un peu réfléchir sur la façon dont se construit la Science, ça?

La Science c'est l'ensemble des explications que nous collons sur ce que nous observons; Yves Coppens écrit dans *Origines de l'Homme, origines d'un homme*: « *la science, c'est la description du monde, or le monde est compliqué, la science est donc compliquée mais, pour avancer dans sa compréhension, il faut oser des interprétations, des anticipations, des spéculations bien au-delà des données, quitte à les abandonner pour en proposer d'autres, si elles sont infirmées.* »: la science est donc *fabriquée*, c'est une production intellectuelle, nécessairement façonnée dans les codes culturels de son auteur... Finalement ce n'est que le reflet des mythes d'une époque! Du coup, la Science, c'est p'tête

ben la vérité, mais p'tête pas toute la vérité, et pis même des fois p'tête pas du tout la vérité... Pour la Science, la Terre a longtemps été plate, et puis après non, plutôt ronde mais quand même au centre de l'univers, y'a un minimum... De la trop idéale civilisation minoenne d'Evans à la génétique kolkhozienne de Lyssenko, la pensée scientifique a connu pas mal d'errements liés aux convictions culturelles, philosophiques, politiques ou religieuses du lieu et du moment.

Replaçons-nous dans le contexte de la naissance de la karstologie, à la fin du XIX^e siècle: on est en pleine révolution industrielle, en plein mythe de l'ingénierie triomphante et de la Science dominant une Terre qu'on croyait alors pas beaucoup plus compliquée qu'une locomotive à vapeur. Le savant passait pour le détenteur éclairé d'un savoir définitif et bientôt total qui, grâce au génie et à la technique, allait assurer à l'Homme la maîtrise du Monde (depuis il y a eu les perturbateurs endocriniens et les bactéries antibio-résistantes). Jules Verne, témoin de l'esprit de ce temps, postulait avec son capitaine Nemo, son ingénieur Cyrus Smith et autres Robur qu'on pouvait faire ce qu'on voulait de la Nature (figure 15) avec un peu d'intelligence, une bonne grosse chimie de cuisine et de la physique à la truelle (depuis il y a eu Tchernobyl et Fukushima). Du coup, à l'époque de Martel, un modèle de creusement unique

et mécaniste, qui aujourd'hui paraîtrait réducteur et plutôt simpliste, était intellectuellement parfaitement satisfaisant.

Intellectuellement satisfaisant même si la théorie ne s'appuyait que sur des exemples qu'on a généralisés, en négligeant le fait qu'il n'y avait pas de raison que toutes les cavités se forment de la même manière.

Satisfaisant même si, parce que les promoteurs de la spéléologie scientifique ont longtemps été français, c'est le mode de formation le plus visible en France et alentours qui a été admis comme LA norme. Il y avait bien des trous ailleurs, dans des déserts, dans des îles, mais là-bas il n'y avait pas de karstologues à l'époque.

Même si (et ce n'est qu'aujourd'hui qu'on commence à le comprendre) en tous domaines (météorologie, économie, biologie, médecine...) et en particulier dans la nature, les interactions entre des facteurs qui semblent impondérables sont bien plus complexes et conséquentes qu'on ne l'imaginait: courants marins, vents, gaz minoritaires, micro-particules, bactéries, sont en même temps à l'origine de modifications du milieu et influencés par ces changements, ronde dialectique qui tourne en cercles soit vicieux soit vertueux, ça dépend... Cette même complexité se révèle dans le fonctionnement intime du karst.

Le karst a donc encore beaucoup de secrets, et bien fol qui prétend le connaître! Les karstologues (les vrais, pas les amateurs éclairés à l'acéto dans mon genre), que j'ai un peu moqués (toujours amicalement) dans ces pages mais qui m'ont permis d'entrevoir à leurs côtés toute cette complexité, le savent bien. Sur la base de cet héritage martélien du XIX^e siècle, patiemment, chacun avec son expérience et son expertise, ils font ensemble avancer leur science avec une ouverture et une richesse intellectuelle qui n'ont pas fini de nous nourrir, nous, spéléologues passionnés par notre domaine d'élection. Alors: abonnez-vous à *Karstologia*!



Figure 15: Le capitaine Nemo concrétise le fantasme de Jules Verne et de son temps: dominer la Nature la plus indomptable grâce à la Science et l'ingénierie au service de l'Homme élevé au rang de Maître du Monde (gravure Gustave Doré).

Mais au fait... Qui donc est Karst Marx Brother?

Certains des personnages qui apparaissent sur les photographies, connus dans la communauté « karsto », ont été suspectés de se planquer derrière ce pseudo ; un certain Philippe par exemple, avec qui j'ai pas mal traîné mes bottes et qui figure souvent sur mes clichés... Il a largement assez d'humour pour avoir osé écrire tout ça et ça l'a même amusé qu'on le croie (ouf...), mais bon, voilà, c'est pas lui, il ne peut pas être en même temps l'auteur du cliché et le sujet du cliché !

En vrai, de qui est Karst Marx Brother on s'en fout, c'est pas ça qui compte. D'abord, je suis juste un spéléologue comme vous (et moi, du coup) ; je ne suis ni universitaire ni chercheur, je n'ai rien créé rien trouvé, j'ai juste participé au travail des vrais karstologues : j'ai été sur le terrain avec eux, j'ai observé, j'ai écouté, j'ai compris (pas tout mais quand même),

et après j'ai écrit ce que j'avais compris, voilà tout. Finalement, Karst Marx Brother c'est un peu comme le mathématicien poldève Nicolas Bourbaki, qui vers 1935 a déclassé les maths avec ses publications novatrices... Et qui en réalité n'existait pas : c'était un collectif de 9 mathématiciens de Normale Sup qui ont inventé un auteur (et un pays, la Poldévie) pour publier leurs travaux. Un canular de génies, quoi. Là je parle de Bourbaki, évidemment.

Ce qui compte c'est que mes grosses bottes pleines de la boue des grottes d'un peu partout aient mis un petit coup de pied dans les vieux clichés sur la formation des grottes que je lisais partout, alors que je voyais tout autre chose sur le terrain... Même si vous n'êtes pas des scientifiques estampillés, conservez toujours une part d'esprit critique, gardez par rapport à ce qu'on vous explique (même si c'est Karst

Marx Brother qui le fait!) une marge de prudence intellectuelle : après tout, pour dire la messe, pas besoin de comprendre le latin, il suffit d'apprendre le missel par cœur, alors ceux qui vous le récitent ne sont pas forcément investis de la Divine Connaissance ! « Science sans conscience n'est que ruine de l'âme », disait Rabelais : la science devient une ornière lorsqu'elle reste dans les salles ou dans les livres ; apprenez, bien sûr, mais aussi observez, mettez à l'épreuve du terrain ce que vous avez lu dans les bouquins, voyagez, parlez avec les spéléologues d'ailleurs, voyez d'autres karsts, d'autres grottes (figures 16, 17, 18). Et surtout, n'ayez peur ni de douter, ni de penser : car la Science est dans les livres, mais la vérité est sur le terrain ! Et sur le terrain, vous, vous y êtes...

Remerciements :

Je remercie l'équipe rédactionnelle de notre super-canard qui a su gommer quelques rugosités que j'ai pu parfois commettre... Je remercie aussi et surtout les hommes et femmes de savoir (notamment ceux dont les noms sont cités dans les articles et dont on voit souvent les bobines sur les photographies qui les illustrent) qui m'ont accueilli dans leurs travaux et sur le terrain, qui me font partager tant de richesses intellectuelles, tant de calendos et tant de gros rouge qui tache. Et tant d'amitié. Car, et ça c'est vraiment essentiel, un(e) karstologue c'est avant tout un(e) spéléo.



Figure 16 :
spéléologie alpine
(France).
Cliché P. Zaoui.



Figure 17 :
spéléologie
méditerranéenne
(Sicile).
Cliché J.-Y. Bigot.



Figure 18 :
spéléologie désertique
(Nouveau-Mexique).
Cliché L. Bruxelles.

1. En fait non, c'est essentiellement un cas particulier de corrosion par mélange, dans ce cas entre l'eau de mer et les eaux météoriques dans la zone de surface où les secondes rencontrent nécessairement la première.
2. Vallgomera présente en certaines parties du réseau beaucoup d'indices de dégazages importants au sein de la nappe d'eau : à titre d'hypothèse et par défaut d'autre explication, ces dégazages ont été supposés liés à des arrivées d'eaux hydrothermales. Pour probable qu'elle soit, cette hypothèse n'est pas démontrée. Si la *mixing zone corrosion* possède une composante biologique encore peu connue, ces dégazages pourraient aussi être d'origine biochimique. En fait, on n'en sait rien, quoi.