

Eléments de karstologie et géologie pour spéléo

Stage perfectionnement du CDS 69, avril 2008

par V. Lignier,

La plupart des grottes de notre planète se trouvent dans le Karst. Ce terme étrange qui est la version allemande du mot **Kras** - « terrain pierreux dénudé » -, vient du nom d'une région de Slovénie où les phénomènes de dissolution des calcaires sont impressionnants et connus depuis longtemps. Par extension, toute région comprenant de tels phénomènes de dissolutions (généralement constituées de roches calcaires) est considérée comme karstique. L'étude de ses phénomènes est appelé(e) karstologie.

Généralement constituées de roches calcaires,... Ce qui laisse entendre qu'il y a d'autres « roches » dans lesquelles les grottes se forment

1 – Principaux types de roche et grottes associées

Granite, lave, grès, calcaire, argile,... il existe une grande diversité de roches. Ce qui compte c'est leur relation avec l'eau : transfert et action érosive de l'eau avec la roche. De ce point de vue les roches n'ont pas les mêmes comportements.

1a - Des roches non solubles

Les roches magmatiques (issue de magma, silicates fondus entre 1200° et 650°C environ) en surface sont généralement imperméables et les silicates ne sont pas solubles. Ces roches sont par contre généralement déformées par les mouvements tectoniques et comportent une perméabilité de fracture et fissures. Les granites se forment à partir de magma en profondeur (plusieurs kilomètres) et sont remontés après des millions d'années par l'érosion vers la surface. Les laves volcaniques, sont issues également de magmas qui sont remontés se refroidir en surface en formant les volcans.

Dans le granite (ou le gneiss, roche métamorphique de composition proche)

Ces cavités restent rares et peu développées. Elles se développent sur des fractures béantes et/ou par cavitation suite à l'altération du granite en surface (la roche « pourrie », transformée en sable argileux par l'hydrolyse des feldspaths et des micas du granite, en argile). On en trouve souvent sur le littoral où l'action des vagues est très érosive.



Dans le basalte : les basaltes sont à l'origine des laves très fluide. A leur émission en surface à 1200 °c elles s'écoulent très rapidement. La surface de la coulée se refroidit et se fige très rapidement alors qu'à l'intérieur la lave, très chaude, fluide, continue de s'écouler. Elle vidange le tube ainsi formé laissant des réseaux de galeries.

On en trouve dans les régions volcaniques à basalte, comme les îles Canaries, la réunion, ... A Hawaï, Kazimura Cave se développe sur plusieurs kilomètres.



Photographie : Pierre Thomas



Dans la glace : la glace est également imperméable en petit, les cavités se forment par fusion. Les cavités qui sont creusées en pleine glace s'ouvrent à la surface des glaciers, à l'endroit où les torrents glaciaires élargissent, durant l'été, des fissures qui laissent passer l'eau au travers de la glace. En l'espace de quelques mois, ces fissures peuvent se transformer en gouffres profonds de plusieurs dizaines de mètres. On connaît des cavités de ce type appelées *moulins glaciaires* dans la plupart des glaciers du monde.

Par analogie avec un réseau karstique, les moulins constituent les équivalents des avens.

D'autres grottes glaciaires elles, se développent entre le glacier et son socle. Leur formation est due à l'écoulement des rivières sous glaciaires qui favorisent le creusement des vides plus ou moins important que l'on peut parfois suivre sur plusieurs centaines de mètres. En Islande, une rivière sous glaciaire peut être suivie sur plus de 2Km et 500m de profondeur. Mais dans ce cas, précis, le creusement de la glace est provoqué par l'existence d'un phénomène, à savoir une activité géothermique intense sur les flans d'un volcan.

On en trouve sur la Mer de Glace en France, sinon dans les pays des hautes latitudes avec de gros glaciers comme l'Islande et le Groënland.



1b - Dans les roches solubles : se sont les roches qui peuvent se dissoudre dans l'eau à plus ou moindre vitesse. Les phénomènes karstiques véritables se développent par dissolution dans ces roches.

Trop solubles... Les évaporites (sel, gypse, anhydrite) sont des roches très solubles, le phénomène de karstification s'y développe de façon très intense jusqu'à disparition de la roche, effondrement rapide des galeries... Les grottes y sont donc généralement peu pérennes (des exceptions cependant). En France on trouve des karts de gypse dans les Alpes, au col du Galibier (réseau de Gébroulaz). De grandes cavités de ce type se développent en Espagne, en Iran (Zagros), en Oural...



Gébroulaz, en Savoie



Grotte de Sel en Iran

Pas assez soluble... la silice. Les quartzites ne sont composées que de quartz, de la silice quasiment pure. Cependant la silice est très peu soluble, il lui faut donc beaucoup de temps pour former des karts à condition de ne pas être écrasée dans une chaîne de montagne engloutie sous la mer érodées par les torrents avant. De plus les formations de ce type de grande étendue sont relativement rares. La région de Tepuy au Venezuela développe des réseaux de plusieurs kilomètres dans des quartzites très anciennes, à la surface depuis des millions d'année.



Juste assez solubles : Les calcaires. Moins solubles que les évaporites, mais plus que les quartzites, les calcaires permettent un développement intense et relativement pérenne de la karstification. C'est dans ce type de roche que se développent la plupart des karsts à la surface du globe.



Gouffre de la Morgne (01)



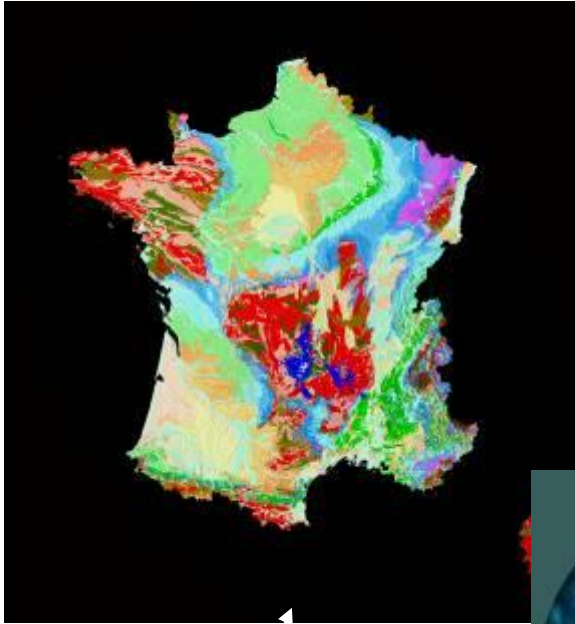
Ojo del Agua (Cuba)



Event de Peyrejal (07)

2 – Régions calcaires en France, origine et paysages

Causses, Vercors, Ardèche...Jurassique...karst typique



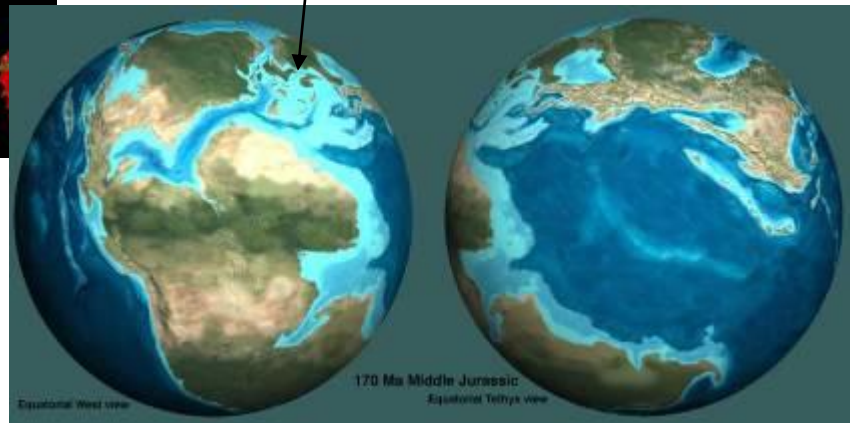
Carte géologique de France

Dans la Montagne Noire et les Pyrénées, il affleure également des terrains calcaires de l'ère primaire, karstifiés.

Les régions calcaires en France sont celles qui figurent essentiellement en bleu et vert sur la carte géologique ci-contre ; c'est-à-dire respectivement du jurassique et du crétacé.

A ces périodes, la France ressemblait au Bahamas actuel : mer peu profonde, chaude très propice aux dépôts de calcaire.

Des couches de plusieurs centaines de mètres de calcaire se sont ainsi déposées à ces époques

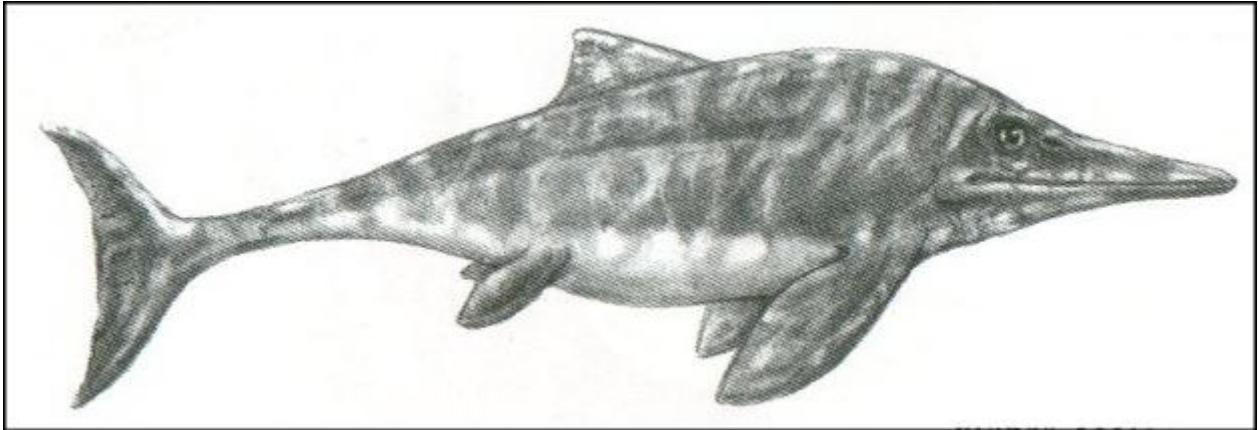


L'éclatement de la Pangée au Jurassique

Au Jurassique, l'éclatement du méga continent, la Pangée, avec l'ouverture de l'Atlantique central s'accompagne d'une ouverture océanique au niveau des Alpes actuelles, la Téthys, alors que l'Italie (Apulie) reste encore attachée à l'Afrique. Les mers recouvrent une partie des continents sur lesquels se déposent des calcaires récifaux et peri-récifaux, relativement purs, dans les environnements peu profonds (Bourgogne, Périgord, Causses, Jura...) Dans les bassins plus profonds se déposent des sédiments plus fins donnant des calcaires très fins comme ceux du Tithonique dans les Alpes ou des marno-calcaires plus riches en argiles selon les périodes climatiques et les mouvements tectoniques. A cette époque la Bretagne et le massif central sont probablement en partie émergés formant des grandes îles.



Au début du Crétacé, l'océan alpin est bien ouvert et l'approfondissement du fond marin donne lieu à des dépôts plus fins, marneux comme les marno-calcaires de l'Hauterivien. Au Crétacé, cette bordure océanique est peu à peu comblée par les sédiments et des environnements à nouveau peu profond laissent se former les calcaires Urgonien dans les Alpes en continuité avec l'Ardèche et le Gard calcaires, le Vaucluse et une partie de la Provence. Dans la région entre Vercors et Ventoux, c'est plus profond : le Bassin Voconzien dans lequel se déposent des marno-calcaires riches en ammonites et fossiles de dinosaures marins comme l'Ichtyosaure... Ces terrains très marneux sont aujourd'hui peu karstiques.



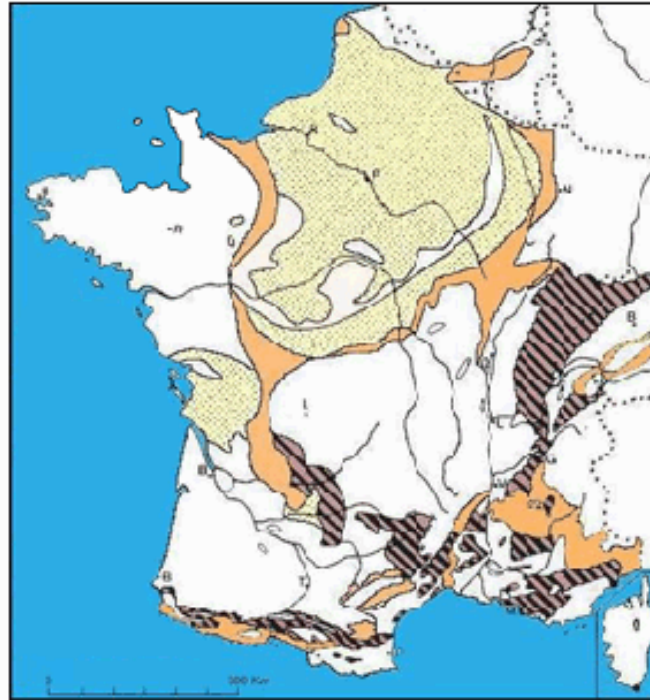
*L'Ichtyosaure ; vit au jurassique et crétacé en pleine mer.
(requin = poisson ; dauphin = mammifère ; ichtyosaure = reptile)*

Au Crétacé, le Jura notamment est en partie exondé. Le Bassin Parisien, mer chaude et peu profonde, est le lieu d'une intense activité planctonique. L'accumulation des squelettes de ces algues microscopiques (les coccolithophoridés) est à l'origine de la craie.

Dans les Pyrénées, une partie des calcaires, plus ancien, datent de l'Ere primaire. Ils sont déformés par l'érection de la chaîne hercynienne, puis recouverts au crétacé par la mer (discordance Crétacé – Primaire) lors du coulisement de l'Ibérie (Espagne) contre l'Europe (la France) et de l'ouverture de l'Atlantique Nord. Le rapprochement de l'Afrique au Tertiaire entraîne la collision Europe-Ibérie et la formation des Pyrénées avec la déformation des calcaires crétacés et plus anciens. La collision Europe-Apulie entraîne la formation des Alpes en écrasant l'ancienne bordure océanique et ses calcaires. Cette tectonique est à l'origine des plis et des failles qui affectent les chaînes subalpines notamment.

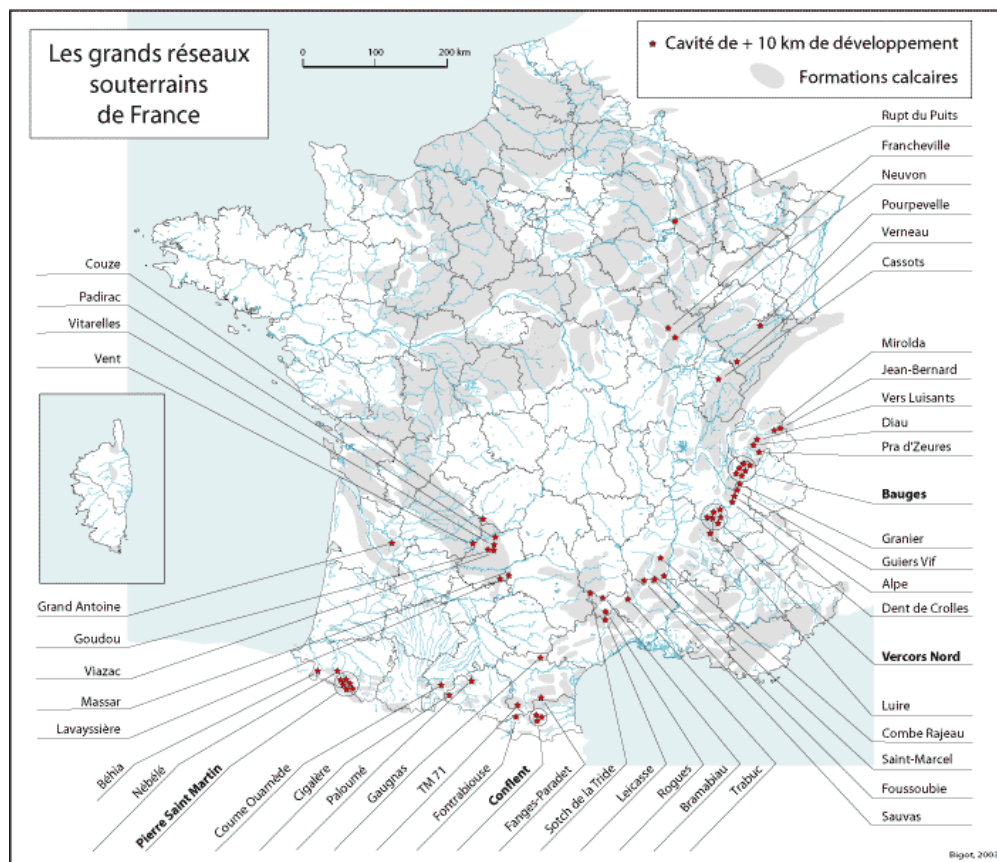
De cette histoire sédimentaire associée à la tectonique des plaques, l'éclatement de la Pangée en plusieurs continents, découle la formation des principales régions calcaires à l'origine de nos massifs karstiques actuels.

-  Régions très karstiques (calcaires compacts ou dolomie dominants)
-  Régions moyennement karstiques (calcaire peu épais ou alternant avec marnes)
-  Régions peu karstiques (craie, calcaire impurs ou très peu)
-  Régions non ou très peu karstiques

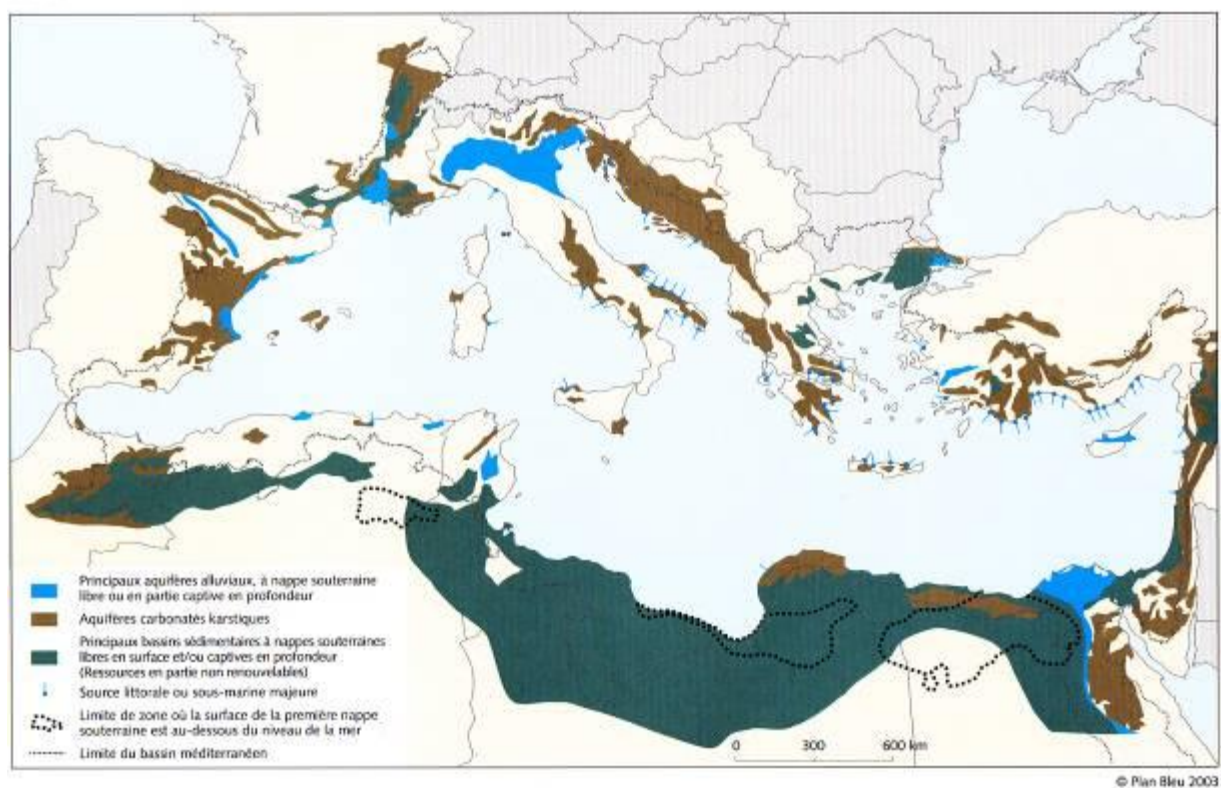


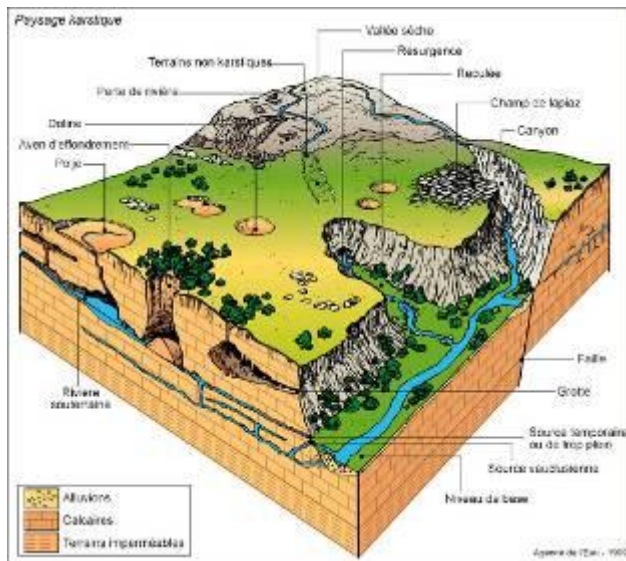
Carte hydrogéologique des formations carbonatées karstifiables





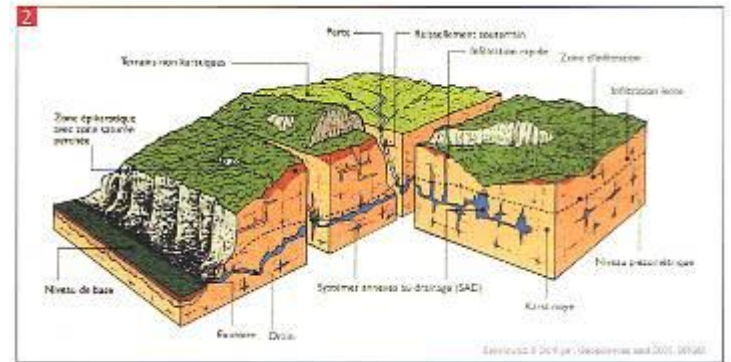
Carte 6





Modèle morphologique de Karst

Les morphologies karstiques (gouffre, doline, perte, polje...), généralement déjà bien connues, ne sont pas plus détaillées ici.



Modèle hydrogéologique de karst

3 – Circulation et action de l'eau dans les calcaires

Faille, strate, libre, noyé, niveau de base, colmatage...

Le calcaire est une roche imperméable en petit. L'eau ne circule que par les discontinuités stratigraphiques (joint de strate : espace d'origine sédimentaire entre 2 couches) et tectoniques (fractures, failles)



Joint de strate

(vers St Rambert en Bugey)

faille

Sous terre de nombreuses galeries se développent de façon bien visible sur ces discontinuités.



Galerie noyée sur joint de strate (Peraou de Chadouillet, Ardèche) Photo voir www.plongée-sout.com

L'eau en s'infiltrant par ces fissures, dissout le calcaire et agrandit ces vides en galeries qui vont peu à peu s'organiser en réseau souterrain, guidés par les lithologies (marnes/calcaires), les structures des couches (pendage, plis, failles...) et le gradient hydraulique (la différence de niveau de l'eau entre l'entrée et la sortie).



Les coups de gouges sur les parois sont le témoin de l'action mécanique (tourbillons et sédiments en suspension) et chimique (dissolution) de l'eau.

Leur orientation indique le sens du courant et leur dimension, la vitesse dominante.

Marmite de géant, formée par les tourbillons de l'eau et les galets ; à chaque crue ceux-ci restent piégés en tournoyant abrasant le fond.



Lorsque les galeries se forment en régime noyé, la pression et la dissolution s'exerce sur toutes les parois et donne lieu classiquement aux conduites « forcées ».



Galerie en tube de l'évent de Peyrejal (Ardèche)

Lorsque les écoulements s'effectuent en régime semi-noyé (vadose). L'eau, par gravité, ne s'écoule que sur le bas des galeries. Celles-ci peuvent alors évoluer vers un profil en trou de serrure



Galerie en forme de trou de serrure

Galerie horizontale constituée d'un conduit cylindrique dans sa partie supérieure, et d'un méandre dans sa partie inférieure. La section de la galerie a ainsi schématiquement une forme en trou de serrure.

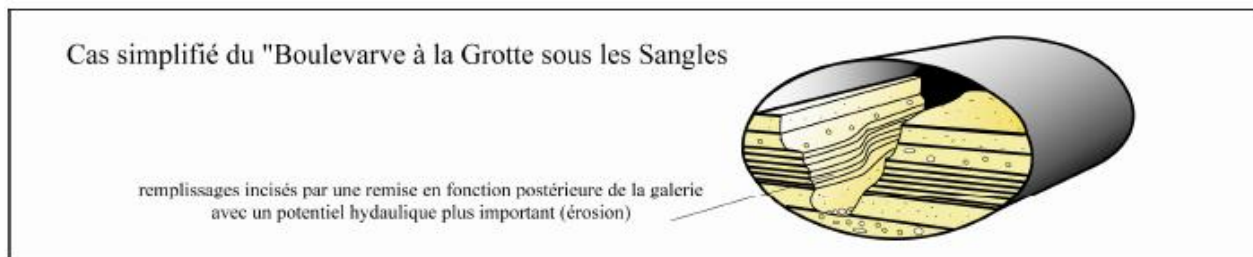
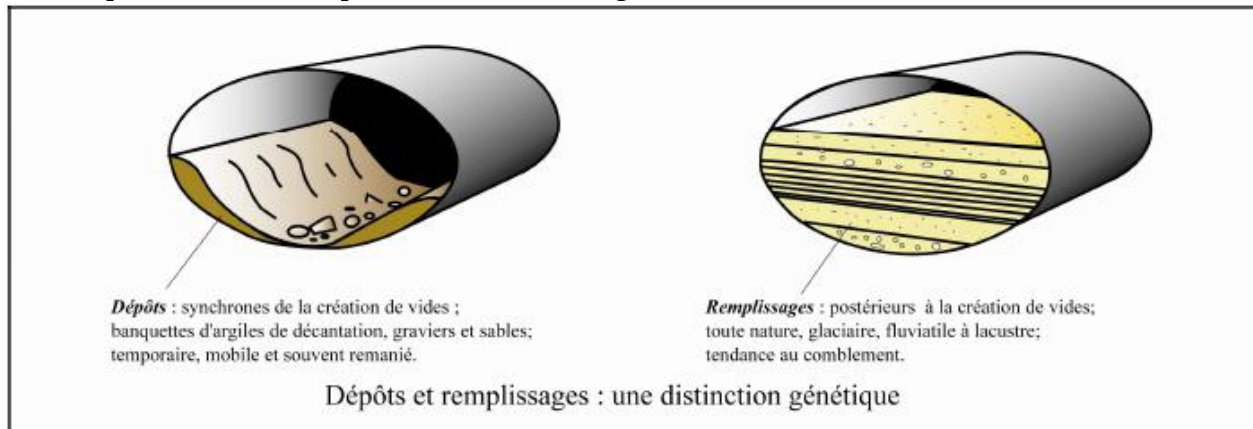
Crochet inférieur (01)

Rumbling Falls Cave Chamber, Tennessee

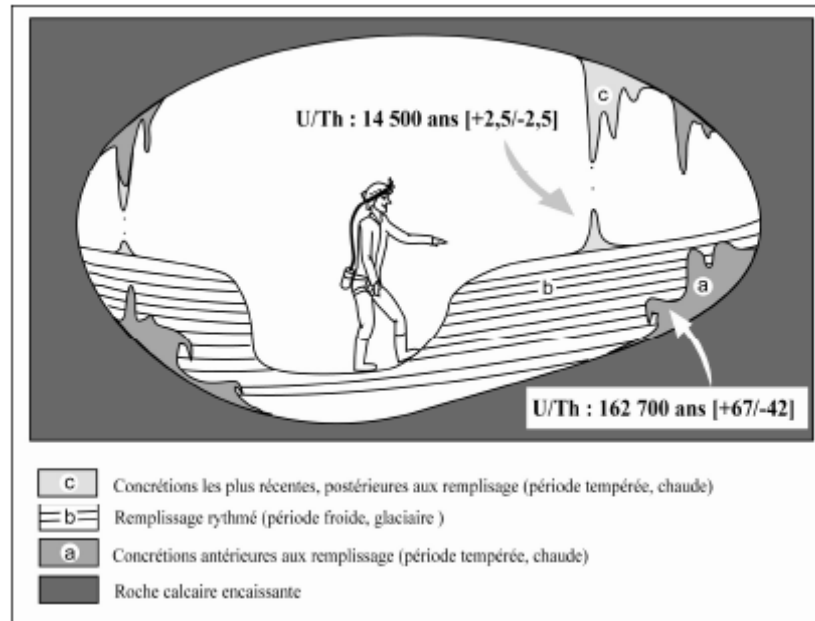


La gravité joue également un rôle dans l'acquisition de profils d'équilibre par effondrement des voûtes à l'origine de grands volumes.

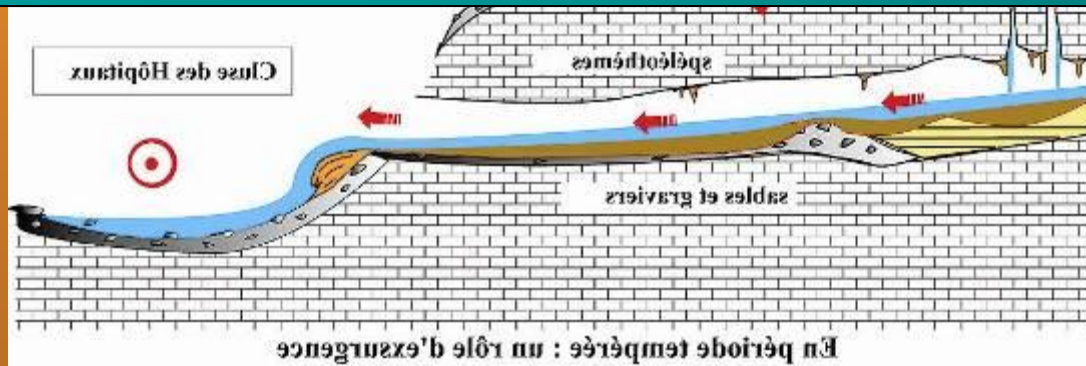
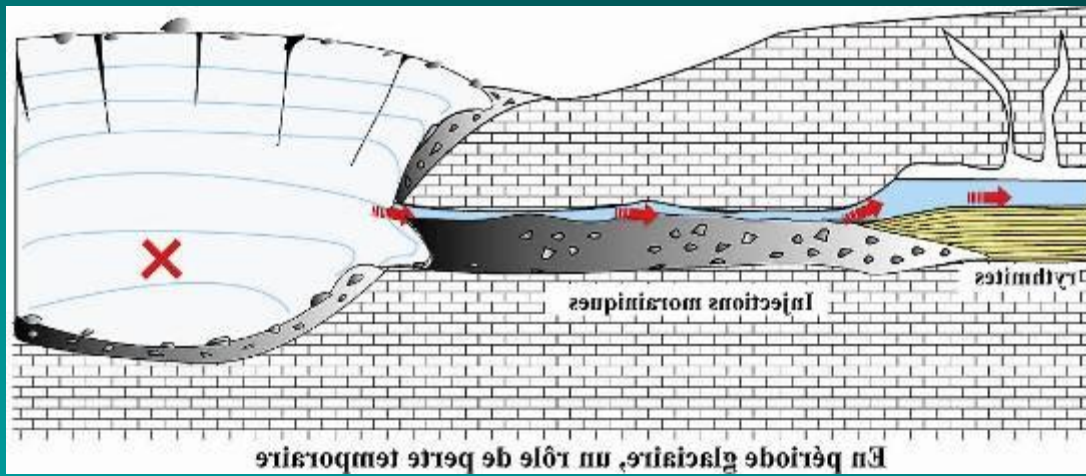
Si l'eau creuse le calcaire, elle charrie également des sédiments qui peuvent se trouver piégés, stockés plus ou moins temporairement dans les galeries souterraines.



L'étude de ces sédiments et leur relation avec les concrétions permet d'avoir une idée des modes de fonctionnement des galeries et des âges des sédiments.



L'étude combinée des morphologies de galeries et des remplissages sédimentaires permet parfois de remonter à l'histoire souvent complexe de formation et de fonctionnement d'une cavité au cours du temps.



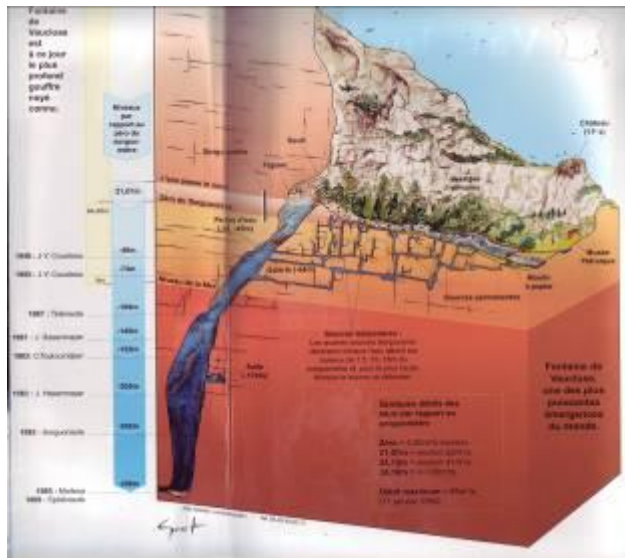
La Grotte sous les Sangles (Ain) est ainsi un très bon témoin du passage des glaciers à la dernière glaciation.



Blocs de moraines injectés par le glacier dans les galeries karstiques

« farines » glaciaires, sédiments très fins déposés dans un contexte de décantation rsè calme, sorte de lac proglaciaire sous terrain.

Au cours de la période de creusement des canyons, des galeries karstiques se sont formées accompagnant la baisse du niveau de base. Au cours de la remontée de la méditerranée, le comblement des canyons a entraîné le colmatage des débouchés karstiques créant ainsi des réseaux ennoyés de plusieurs centaines de mètre de profondeur comme la Fontaine du Vaucluse (84) ou les goules du Pont et de la Tannerie à Bourg Saint Andéol en Ardèche.



A diver in a dark cave, illuminated by a bright light source, surrounded by numerous stalactites and stalagmites. The cave ceiling is covered in long, thin stalactites hanging down. The floor is covered in various sized stalagmites. The diver is positioned in the center, facing away from the camera, with a bright light source behind them, creating a strong backlight effect.

4 - Ça creuse ou ça dépose ? Un peu de chimie et implications

Acide carbonique, température, pluie, végétation, concrétions



Sur cette photo de la Grotte de la Cocalière (Ardèche-Gard) on distingue aisément les traces de creusement de conduite forcée (dissolution) partiellement remplie de sédiments et concrétionné (précipitation). Au même endroit au cours du temps l'eau a d'abord dissous puis précipité du calcaire.

Autre exemple de conduite récente colmatée par du calcaire ...



Autre exemple de précipitation de carbonate de calcium CaCO_3 : l'aragonite. C'est un polymorphe de la calcite : même formule chimique, mais pas le même réseau cristallin. La calcite cristallise dans le système rhomboédrique alors que l'aragonite cristallise dans le système orthorhombique lui conférant des morphologies cristallines en aiguilles.

Les conditions ambiantes et chimiques de l'eau sont à l'origine de la précipitation de l'une ou l'autre de ces cristallisations.

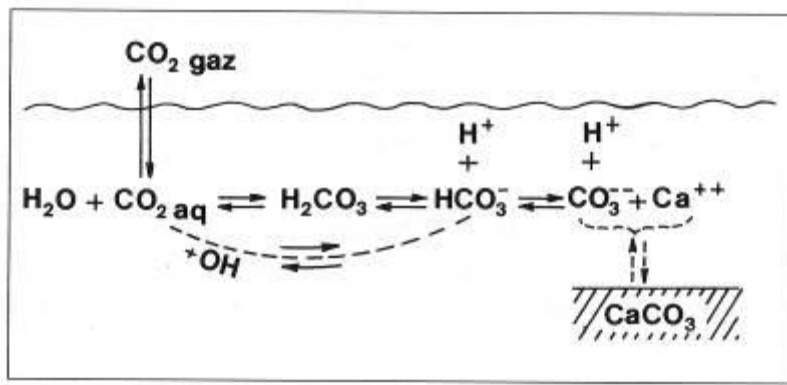
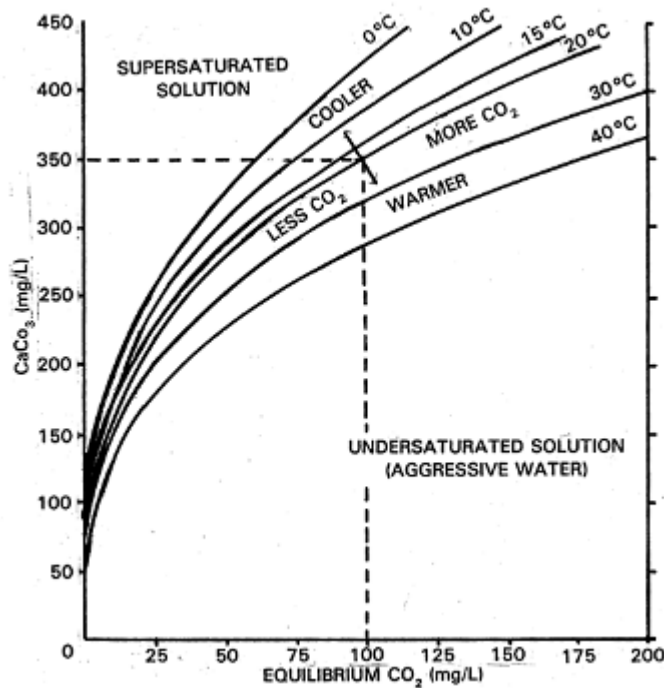


Figure 6.3.

Équilibres du système $\text{CO}_2\text{-HCO}_3^-\text{-CO}_3^{2-}$.

En pointillé, on a indiqué la relation directe possible : $\text{CO}_2\text{aq} + \text{OH}^- \rightleftharpoons \text{HCO}_3^-$ dont la prise en considération ne change en rien l'équilibre thermodynamique du système. On a porté également l'équilibre de précipitation CaCO_3 , qui ne devient effectif que lorsque le produit ionique $[\text{Ca}^{2+}][\text{CO}_3^{2-}]$ atteint une valeur bien précise.

Le gaz carbonique de l'air se dissout dans l'eau avec lequel il s'associe pour donner de l'acide carbonique. Cet acide, en excès, entraîne la dissolution du calcaire dans l'eau, en défaut, sa précipitation... il s'agit d'un équilibre qui, selon les conditions du milieu (physiques et chimiques : t° , pression, salinité...) va se déplacer d'un côté ou de l'autre.



Ce diagramme montre qu'à pression ambiante de 1 bar, pour 100 mg/l de CO_2 dissout, à 20°C , la solution peut contenir 350mg/l de CaCO_3 (calcite) ; à 0°C c'est plus de 400 mg/l et à 40°C c'est moins de 300mg/l.

Donc plus l'eau est chaude moins elle peut contenir de CO_2 et donc de calcaire.

La pression favorise la solubilité du CO_2 : l'ouverture d'une bouteille de soda montre bien ce dégazage à pression ambiante.

En fonction du climat et donc des précipitations, de la température les eaux seront plus ou moins chargées en CO_2 .



En Patagonie occidentale, les températures modérées, mais surtout les très abondantes précipitations sont à l'origine de karstifications poussées avec des formes géantes

Les régions équatoriales et tropicales, du fait de leur température et pluies abondantes sont peuplées de végétation luxuriante. Les sols qui en résultent sont le lieu d'une intense activité biologique qui produit énormément de CO_2 . Les eaux de pluies abondantes seaturent en dioxyde de carbone en traversant ces sols et deviennent de ce fait très agressives, favorisant une intense karstification. Ces régions tropicales humides présentent des morphologies très avancées d'érosion karstique comme les karsts en tourelles, cockpits ou mogotes selon les régions.



Paysages de mogotes à Cuba



Lapiaz acéré dans la jungle (Cuba)

Conclusion : les roches calcaires sont les plus propices à la karstification, d'autant plus qu'elles sont déformées (fractures, failles) et soumises à un gradient hydraulique et donc des reliefs. Les conditions climatiques conditionnent la dynamique chimique de karstification.

Les karsts ont souvent des histoires complexes, polyphasées, liées aux modifications climatiques et tectoniques de la surface terrestre. Mais avec un peu d'attention, aux morphologies, concrétions, remplissages sédimentaires, on peut déceler des éléments de ces histoires en se baladant sous Terre.

Merci à Laurence Bacconnier pour sa patience et sa ténacité !