

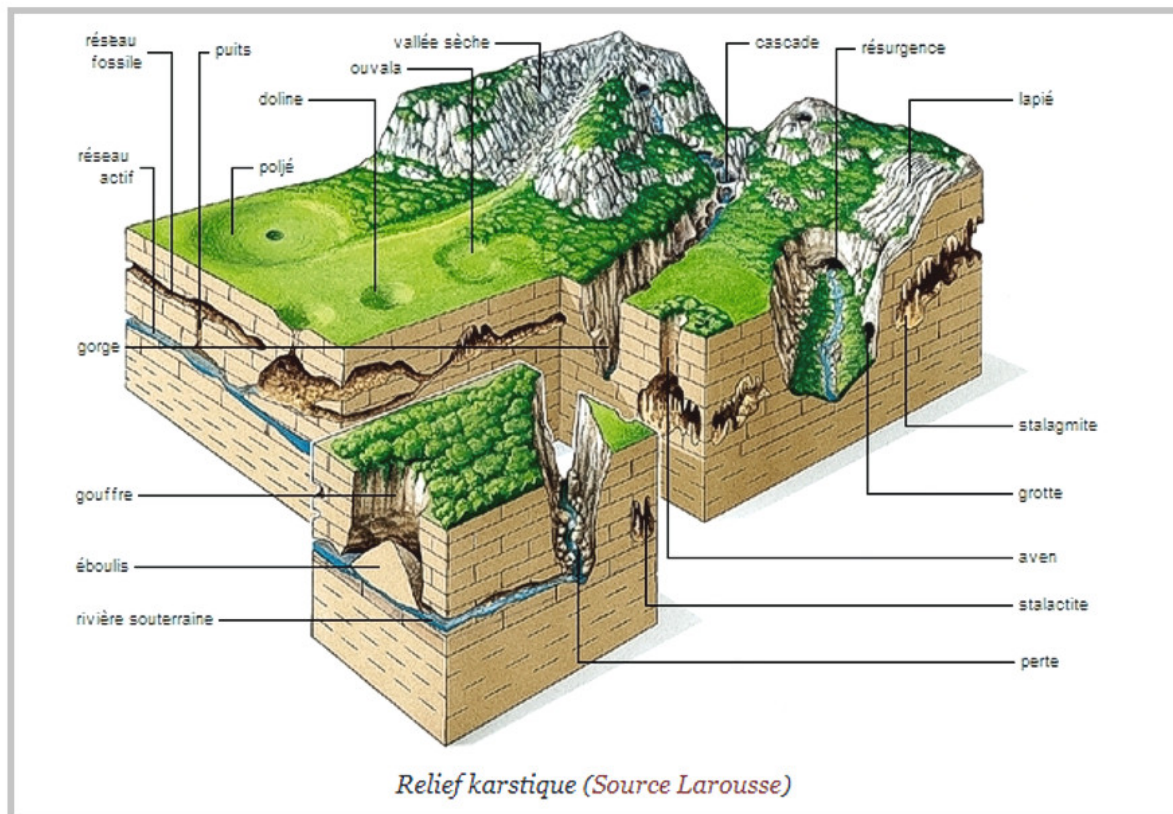
RELIEFS KARSTIQUES

Le mot « Karst » vient de Kras, région de Slovénie où ce relief est bien présent. Le mot « Kras » fut germanisé en Karst lors de l'intégration du pays à l'Empire Austro-hongrois. Ce relief particulier a été étudié par les géographes autrichiens au 19^{ème} siècle.

Dans les reliefs karstiques, l'eau, plutôt que de couler en surface comme dans d'autres régions, s'infiltré dans le sous-sol. Ce relief (on utilise souvent en France le mot "causse" pour le désigner) se rencontrera le plus souvent dans le cas où le sous-sol est constituée de roches calcaires : calcaires et dolomies surtout, mais aussi craie, marbre, et travertin.

Mais l'action de l'eau peut créer des karsts dans le gypse, l'anhydrite et le sel-gemme (halite), mais aussi dans des grès ou des quartzites.

Les paysages karstiques sont caractérisés par des formes de corrosion de surface mais aussi par des formations souterraines étonnantes. Un certain nombre de mots de vocabulaire géologique sont à rapporter à ce type de relief et nous les expliquerons ici : doline, stalagmite, stalactite, résurgence, lapiaz, aven, paysage ruiniforme...



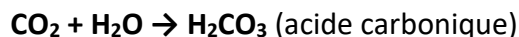
Près de 20% de la surface terrestre émergée est constituée de karst. En France, des paysages karstiques se rencontrent sur presque la moitié du territoire : dans les Alpes, les Pyrénées, le Jura, les Préalpes provençales, le Plateau Lorrain, le Bassin Parisien, le Bassin Aquitain, les Causses....

Processus chimique de dissolution de la roche par l'eau

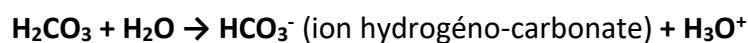
Nous allons parler ici du cas le plus fréquent ; celui de la dissolution des carbonates (calcaire, craie, marbre, travertin...). Quelques cas particuliers (hors carbonates) seront évoqués à la fin de cette étude.

Dans un premier temps, l'eau (de pluie) va se charger de dioxyde de carbone (CO₂). Celui-ci provient en partie de l'atmosphère mais majoritairement du dioxyde de carbone contenu dans le sol et qui, lui, est d'origine biogénique (respiration des êtres vivants ou décomposition de la matière organique).

La réaction chimique est la suivante :



Cet acide carbonique va se dissocier en présence d'eau :

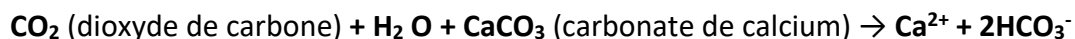


Si l'eau pure ne peut dissoudre que 15 mg de calcaire par litre, cette eau acide (pH6 environ) peut en dissoudre jusqu'à 60 à 80 mg par litre après traversée dans l'atmosphère et jusqu'à 200 mg par litre grâce au dioxyde de carbone issu de l'activité biologique du sol.

Dans le cas du calcaire, le carbonate de calcium (CaCO₃) sera donc attaqué par l'ion acide selon cette réaction :



Globalement, on peut résumer ces réactions ainsi :



L'ion calcium passe ainsi en solution sous forme d'hydrogénocarbonate de calcium (Ca²⁺ + 2HCO₃⁻) qui pourra être transporté par l'eau.

Un certain nombre de facteurs agissent sur cette réaction :

- La température de l'eau : plus elle est basse et plus elle peut se charger de dioxyde de carbone.
- L'abondance de l'eau : les régions désertiques ne sont pas favorables à la formations de reliefs karstiques.
- La nature de la roche.
- La teneur de l'eau en dioxyde de carbone : cette teneur augmente avec la pression par exemple mais aussi avec l'abondance dans le sol d'êtres vivants fournissant ce dioxyde de carbone à l'eau.
- La présence de fractures, fissures, diaclasses, cavités, pores ... dans la roche permet une meilleure infiltration de l'eau et une dissolution meilleure.
- La durée de contact entre l'eau et la roche : il vaut mieux des roches microfissurées où l'eau circulera lentement, que de grosses fractures qui diminueront la surface et le temps de contact entre l'eau et la roche.



Les nombreuses fissures dans le calcaire facilitent la pénétration de l'eau à l'intérieur de la roche. Causse Noir. Millau. Aveyron.

Structures dues à l'action de l'eau sur les roches au cours de cette dissolution

L'eau chargée de dioxyde de carbone (et donc à caractère acide) va circuler dans les roches calcaires fracturées en empruntant les failles, diaclasses et autres espaces présents dans la roche. Lorsque le massif calcaire a subi au cours de son histoire des mécanismes de surrection, plissements..., la présence de ces vides dans la roche est d'autant plus importante. C'est en circulant dans ces espaces que l'eau se charge d'ions calcium en dissolvant peu à peu la roche qu'elle traverse. Le résultat de cette attaque chimique est l'élargissement progressif des failles et des espaces, pouvant créer à la longue l'apparition de cavernes souterraines, de galeries, de grottes....



Galerie souterraine façonnée par l'eau.. Grotte de St Marcel d'Ardèche.

En surface, le relief karstique peut se traduire par l'apparition de lapiez, de dolines, d'avens.... Nous allons décrire quelques formations :

Les lapiez

On dit aussi lapiaz, lapié ou karren (dans le Jura). Ce sont des rigoles de dissolution plus ou moins parallèles, tracées sur les sols calcaires par l'action de l'eau (ruissellement) ou par les alternances de gel et de dégel. La roche est comme déchiquetée, dentelée, avec des aspérités coupantes parfois, des trous, des crevasses, des rainures...



Lapiez au-dessus du refuge de la Vogelle. Sixt Fer à Cheval. Haute-Savoie.



Lapiez. Combe aux Puaires. Haute-Savoie.

Quand des argiles issus de la décarbonatation (argiles de décalcification) s'accumulent dans les creux du lapiaz, une végétation peut s'y installer. Dans le cas contraire, le lapiaz est complètement stérile.



Argile rouge (argile+oxyde de fer) restant après décalcification du calcaire. Millau. Aveyron.

Les paysages ruiniformes

Ce paysage, typique des régions karstiques présente un aspect de ruines (d'où son nom). Il s'agit de formes dues à l'érosion lorsque le sous-sol est hétérogène (calcaires et dolomies par exemple, ou grès et calcaires). L'action de l'érosion est inégale, les roches les plus résistantes (aux agressions physiques ou chimiques) formeront des reliefs alors que les roches les moins résistantes disparaîtront et formeront des parties en creux.

En France, le site le plus connu est le paysage ruiniforme de Montpellier-le-Vieux, en Aveyron, sur le Causse Noir.



Paysage ruiniforme. Montpellier le Vieux. Aveyron.



Paysage ruiniforme. Montpellier le Vieux. Aveyron.



Paysage ruiniforme dans calcaire dolomitique. Escandorgues. Hérault.



Chaos ruiniforme du "Rajal del Gorp". Causse du Larzac. Aveyron.

Les dolines

Ce sont des dépressions plus ou moins arrondies de la surface dans laquelle le calcaire a été dissout par l'eau de pluie, provoquant l'affaissement du sous-sol. Les argiles de décalcification (résidus de la dissolution chimique du calcaire) s'accumulent au fond de ces dolines, retenant l'eau et rendant ces surfaces fertiles et cultivables.

Si le fond de la doline continue à se creuser, on peut avoir formation d'un gouffre ou aven. Lorsque plusieurs dolines se réunissent, on parle d'ouvala.



Doline en Lozère



Cultures de céréales dans doline. Aveyron

Dans certaines régions, ces dolines ont été aménagées en les pavant de calcaires pour en faire des abreuvoirs pour les animaux. L'argile présente en dessous empêche l'eau de s'échapper :



Lavogne : Doline aménagée en abreuvoir. La Couvertoirade (Aveyron).



La lavogne de la Blaquèrerie. Aveyron.

Les avens

Ce sont des gouffres caractéristiques des régions karstiques. Ils sont le plus souvent formés par l'effondrement de la voûte d'une cavité souterraine au cours de la dissolution du calcaire. Un aven communique généralement avec une grotte souterraine et tout un réseau de galeries.



Aven sur le Causse noir près de Millau. Aveyron.

L'aven Armand est en France l'un des sites les plus connus. On peut aussi citer le gouffre de Padirac.

Selon les régions, les avens ont été baptisés de noms particuliers : igue dans le Quercy, bétoire en Aveyron, emposieu dans le Jura, embut, garagai, caraven, toumple en Provence, scialet en Savoie et en Isère, cénote au Mexique....



Gouffre de l'Œil Doux. Massif de la Clape. Aude. On pense que l'eau qui remplit ce gouffre provient du drainage des eaux souterraines environnantes.

Les pertes

Une perte est une ouverture par laquelle un cours d'eau devient souterrain après un trajet à l'air libre. Il ressortira par une résurgence. Un exemple connu est la grotte du Mas d'Azil en Ariège qui voit l'Arize disparaître sous terre.

Processus chimique de formation des concrétions

Lorsque l'eau qui a circulé dans le sous-sol en se chargeant d'ions Ca^{2+} débouche dans une cavité souterraine, un phénomène inverse de la dissolution va se produire : le concrétionnement.

Cette réaction peut s'écrire ainsi :



Hydrogénocarbonate de calcium ionisé donne carbonate de calcium, dioxyde de carbone et eau

Cette réaction se produit lorsque l'eau perd une partie de son dioxyde de carbone (dégazage) ou si une partie de l'eau s'évapore. Les ions calcium précédemment en solution vont précipiter en se transformant en carbonate de calcium. Il se forme une concrétion. Le mécanisme de formation des concrétions souterraines passe donc par trois phases :

- Dissolution de la roche calcaire par des eaux chargées de dioxyde de carbone lors de la circulation de cette eau dans le massif.
- Transport de cette eau chargée de calcium (sous forme d'hydrogénocarbonate de calcium) à travers les fissures, et autres espaces du massif.
- Départ de l'eau (évaporation) ou du dioxyde de carbone (dégazage) ce qui entraîne la précipitation du carbonate de calcium. C'est ce qui se produit lorsque après avoir circulé dans la roche, l'eau se retrouve dans une cavité aérienne (grotte, galerie..). La baisse de pression favorise le dégazage du dioxyde de carbone et l'évaporation de l'eau. Le carbonate de calcium précipite et se cristallise en calcite ou aragonite.



Suintement d'eau au plafond d'une grotte avec formation de calcite (concrétions). Grotte près de Vuillafans. Doubs.

Si le mécanisme de dissolution-transport-concrétionnement paraît simple, un certain nombre de facteurs peuvent influencer sur ces étapes. C'est ce qui explique que selon les grottes, la « qualité » des concrétions peut-être très inégale.

- La vitesse de circulation de l'eau dans le massif : si la circulation de l'eau est trop rapide, la dissolution sera moindre et le concrétionnement de même. Cette vitesse dépend de la porosité et de la perméabilité de la roche (nature de la roche, taille des fissures.) mais aussi du climat (abondance ou rareté des précipitations).
- La température de l'eau : une eau froide favorise la dissolution mais réduit le concrétionnement. Pour une eau chaude, ce sera l'inverse.
- La présence ou l'absence en surface d'un couvert végétal et donc d'humus, augmente la quantité de dioxyde de carbone présent dans le sol et donc l'acidité de l'eau d'infiltration.

Il faut aussi signaler que ces phénomènes sont lents. La dissolution du calcaire et le concrétionnement sont très étalés dans le temps. Une concrétion peut grandir de quelques centimètres par an mais cela peut être de seulement quelques millimètres par siècle. Lorsque, pour des raisons diverses, la circulation de l'eau dans le massif s'arrête, les concrétions n'évoluent plus.



Couches concentriques de calcite (dépôts successifs) dans une concrétion. Mont Saint-Clair. Sète. Hérault.

Les différents types de concrétions

La visite d'une grotte à concrétions laisse le visiteur souvent pantois et émerveillé devant la variété de formes et de couleurs que peuvent prendre les concrétions rencontrées. Il est habituel de classer les concrétions en deux catégories : celles qui se rencontrent en dehors de l'eau (concrétions aériennes) et celles qui se forment sous l'eau (concrétions immergées).



Groupe de concrétions. Grotte de St Marcel d'Ardèche.

Les concrétions aériennes se forment dans les grottes et les galeries exondées, en milieu aéré et ventilé : ce sont les stalactites, stalagmites, draperies, piliers...

Les concrétions immergées se forment sous l'eau, soit dans les galeries immergées, soit dans les cuvettes ou bassins qui persistent çà et là dans les galeries en recueillant les eaux de ruissellement.

Les concrétions aériennes

C'est à cette catégorie qu'appartiennent les formes les plus connues : les stalactites et les stalagmites.

Les stalactites

Lorsqu'une goutte d'eau suinte au plafond d'une cavité, le dégazage qui se produit entraîne un dépôt de carbonate de calcium. Un petit tube va ainsi se former qui s'allonge et grossit au fur et à mesure de l'arrivée de l'eau à l'air libre.



Groupe de stalactites. Grotte de St Marcel d'Ardèche

Le centre de la stalactite présente donc un petit tube par où l'eau, arrivée par une fissure en haut de la stalactite, descend pour atteindre l'extrémité de la concrétion. Si ce canal central se bouche, l'eau va ruisseler le long de la stalactite et continuera son élaboration. La stalactite peut ainsi atteindre des dimensions imposantes.



Stalactite. Grotte Carpe Diem. Dordogne



La stalactite vue du dessus. Le canal central de circulation de l'eau est bien visible



Stalactite vue par en-dessous. On observe bien le trou central de sortie de l'eau.

Des conditions particulières peuvent donner à ces stalactites des formes plus irrégulières avec parfois des croissances plus ou moins horizontales.



Groupe de stalactites à croissance plus désordonnée. Grotte de Clamousse.
Hérault

Les stalagmites

Lorsqu'une goutte d'eau tombe du plafond d'une grotte ou de l'extrémité d'une stalactite, elle contient encore du carbonate de calcium en dissolution. Lorsqu'elle arrive sur le sol, elle produit des éclaboussures qui déposent de fines particules minérales. Au point d'impact se crée alors une sorte de bosse qui, par accroissement progressif de son sommet, donnera une stalagmite.



Stalagmite "La table des Rois". Grotte de St Marcel d'Ardèche.

Si la hauteur de chute de l'eau est importante, et si le débit est suffisant, les éclaboussures permettront d'ériger des structures particulières en piles d'assiettes. On peut en rencontrer de magnifiques à l'aven Armand par exemple.

La taille des stalactites et des stalagmites est en rapport avec le débit d'eau et sa hauteur de chute. Si le débit est trop important, les stalactites n'auront pas le temps de se former au plafond. Elles seront de petite taille. Cependant, on aura alors des stalagmites épaisses, massives et impressionnantes.

Les colonnes et les piliers

Si la hauteur entre le plafond et le sol est assez réduite, il peut arriver que la stalactite et la stalagmite se rejoignent. Il se forme alors une colonne qui peut s'épaissir peu à peu en pilier.

Les fistuleuses

Ce sont des stalactites provoquées par un écoulement de très faible débit. Elles ont la forme d'un tube creux de petit diamètre, très fragile, mais pouvant atteindre plusieurs mètres de longueur.



Formations de fistuleuses. Grotte près de Vuillafans. Doubs.

Les draperies

Lorsque l'eau, au lieu de s'écouler directement du plafond d'une galerie, ruisselle le long de la paroi, la construction de la concrétion peut donner des formes très variées rappelant des draperies, des méduses, des cascades, des orgues... Le vocabulaire les désignant ne manque pas dans les commentaires des guides des grottes à concrétions.



Concrétions. Grotte de Clamousse. Hérault.

NB : Un artisanat s'est développé autour de cette capacité que possède l'eau des paysages karstiques de pouvoir libérer et déposer sa calcite. Il suffit de placer, sous un ruissellement d'eau, des objets divers. Ceux-ci se recouvrent avec le temps (de 6 mois à un an) d'une jolie couche de calcite. On peut aussi utiliser des moules qui vont peu à peu se remplir de calcite. Au bout de 2 ans environ, le moulage permet d'obtenir des objets décoratifs.



Pétrification d'objets décoratifs. Grotte de Savonnières. Indre-et-Loire.

Les concrétions immergées

Quand on visite des grottes à concrétions, il est commun de rencontrer çà et là sur le sol, des bassins, cuvettes, petits creux... où l'eau de ruissellement va s'accumuler. L'eau de ces vasques est bien sûr encore chargée de carbonate de calcium. L'évaporation progressive de cette eau va entraîner une sursaturation en calcite d'où cristallisation de celle-ci, sous des formes différentes, sur le fond, ou sur les bords des bassins.

Les gours

Ce sont des structures où l'eau arrivant dans un plan d'eau en quantité faible va entraîner un dépôt de calcite sur le bord de la zone d'écoulement du liquide. Il se forme ainsi un petit barrage qui en s'élevant formera à l'arrière un bassin appelé « gour ». Ce bassin s'approfondira progressivement au fur et à mesure de l'élévation du barrage de retenue. De contour généralement irrégulier, ces gours se présentent souvent à plusieurs, étagés le long d'une pente. L'eau se déverse successivement d'un gour à l'autre.



Gour. Grotte près de Vuillafans. Doubs. On voit bien le niveau maximum atteint par l'eau.

Autres concrétions

Lorsque l'alimentation est irrégulière, l'évaporation de l'eau dans ces bassins lors de « période sèche » va entraîner rapidement une cristallisation de calcite sous des formes très diverses. Ces cristallisations s'observent sur le fond ou sur les côtés du bassin.



Concrétions se formant au fond du gour ou sur ses bords lors de l'évaporation de l'eau lors des périodes sèches. Vuillafans. Doubs

Si l'écoulement d'un gour est très lent, ou nul, il peut se former à la surface de l'eau un voile fin de cristaux : on parle de « calcite flottante ». Cette calcite peut former de fragiles planchers à la surface.



Voile de calcite prélevé à la surface d'un gour. Grotte de Savonnières. Indre-et-Loire.

Les perles des cavernes

Lorsqu'un petit grain de roche est prisonnier d'un petit bassin, l'arrivée régulière d'un filet d'eau dans ce bassin peut le faire tourner sur lui-même. La calcite se déposant régulièrement sur toute sa surface, on finit par obtenir une petite perle plus ou moins sphériques présentant à l'intérieur des couches concentriques de calcite.



Nid de perle rose de caverne. Photo Philippe Crochet www.philippe-crochet.com

© Copyright Philippe CROCHET - Toute utilisation et reproduction des photos interdites

La couleur des concrétions

Les concrétions étant formées de calcite ou d'aragonite (minéraux de couleur blanche), on pourrait s'attendre à ce que les concrétions soient de couleur blanche. Or quiconque a déjà visité des grottes à concrétions s'est bien aperçu que les stalactites, stalagmites, draperies et autres formations présentent souvent des teintes jaunâtres, orangées, brunâtres, noirâtres....



Les concrétions prennent des teintes diverses. Grotte près de Vuillafans. Doubs.

On a longtemps pensé que les oxydes de fer (rouille) et les oxydes de manganèse (noir), contenus dans le calcaire, étaient à l'origine de ces couleurs, l'eau entraînant ces oxydes en profondeur avec le carbonate de calcium pour les déposer avec la calcite lors du concrétionnement.

En fait, ces teintes sont dues à la matière organique que l'eau entraîne avec elle. En surface, la décomposition de la matière organique va créer une série de substances : les acides fulviques puis les acides humiques. Bien que contenus dans l'eau en très faible quantité, ces acides suffisent à teinter les concrétions lors de leur formation. Les acides humiques donneront les couleurs claires (jaunes et crèmes) ; les acides fulviques donneront les couleurs sombres (brunes). En climat froid, la décomposition de la matière organique étant plus lente, les acides fulviques seront plus abondants. Les concrétions seront plus foncées. En climat tropical, les acides humiques seront plus abondants (meilleure décomposition de la matière organique). Les concrétions seront plus claires.

La couleur des concrétions peut donc être un marqueur des climats régnant à la surface du karst au moment du concrétionnement.

La présence de certains métaux peut donner aux concrétions des couleurs particulières. Par exemple le cuivre colore l'aragonite en bleu et la calcite en bleu-vert. Ces teintes dues à la présence de métaux apparaissent lorsque les grottes sont situées sur des filons minéralisés.



Aragonite teintée par du cuivre. Arrigas. Gard

Et lorsque l'eau ressort

La résurgence

Après avoir traversé un massif calcaire à travers fissures, failles, galeries.... L'eau finit par ressortir à l'air libre à un niveau inférieur. Cette sortie d'eau, fréquente dans les paysages karstiques est appelée résurgence. C'est une sorte de source mais l'eau des résurgences ayant simplement traversé les roches n'est pas filtrée et est donc de qualité médiocre. La source de la Loue dans le Doubs fait partie des résurgences les plus connues.



Résurgence de la Loue. Doubs.

On peut signaler que le niveau de la mer ayant subi des fluctuations de niveau, une hausse de son niveau a positionné certaines résurgences en-dessous du niveau marin actuel. Ces arrivées sous-marines d'eau douce sont souvent bien connues et des essais de captage ont même été réalisés.

Les tuffières ou cascades pétrifiantes

Elles sont fréquentes dans le Doubs par exemple. Lorsque de l'eau d'une résurgence forme une cascade sur une zone végétalisée, un dépôt de calcite encore présente dans l'eau va se former sur la végétation (herbes, mousses...) ce qui va, à la longue, pétrifier cette végétation.



Concrétion de tuf. La Tuffière. Doubs.

D'autres couches de végétation seront à leur tour pétrifiées et la masse de calcaire (le tuf) s'épaissit. Le site porte alors le nom de tuffière. Ces formations tuffeuses se rencontrent souvent au fond de petits vallons. La cascade pétrifiante donne naissance ensuite à un petit cours d'eau qui descend le vallon.



Formation de tuf. La Tuffière. Doubs.

Le travertin est une sorte de tuf calcaire. On utilise fréquemment cette roche comme pierre de construction, dallages, carrelages, recouvrement de façades...



Travertin à la base de la cascade de Vaux. Doubs.



Masse de travertin en gros plan. Cascade de Vaux. Doubs.

Les reliefs karstiques autres que dans du calcaire

Comme nous l'avons signalé en introduction, les reliefs karstiques ne sont pas réservés au calcaire. On peut en rencontrer dans d'autres roches.

Karst du sel

Dans le cas de ce type de karst, la présence de dioxyde de carbone dans l'eau n'a aucune importance. C'est juste l'action de l'eau qui intervient.

On rencontre ces formations par exemple en Sibérie septentrionale. En surface, des trous verticaux (ponor), au fond d'une dépression (polje) permettent à l'eau de pénétrer à l'intérieur du massif. A la sortie (résurgence), de vastes dépôts de sel (les « naleds salins ») peuvent occuper de grandes surfaces. Les sources peuvent aussi construire des « naled bougres salinsi », sorte de coupoles salines qui se forment directement sur la source et peuvent s'élever jusqu'à une dizaine de mètres de hauteur. L'eau continue à s'écouler par le sommet de cette structure.

Le diapir de sel de Slanic Prahova en Roumanie présente aussi des formations étonnantes tels de splendides lapiaz formés par dissolution par l'eau à la surface du sel.



Karst du sel. Slanic. Roumanie. Photo André Holbecq.



Lapiaz de sel gemme.. Slanic. Roumanie. Photo André Holbecq.

Karst du gypse et de l'anhydrite

Le gypse et l'anhydrite sont des roches voisines se différenciant l'une de l'autre par la présence ou l'absence d'eau dans la composition chimique.

L'anhydrite est du sulfate de calcium anhydre CaSO_4 tandis que le gypse est du sulfate de calcium hydraté $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$.

C'est l'action de l'eau qui est à l'origine de l'apparition de reliefs karstiques dans ces roches, même si l'eau n'a pas un grand pouvoir de dissolution du gypse. L'eau distillée par exemple dissout environ 2 grammes de gypse par litre, quantité qui croît légèrement avec la température jusqu'à un optimum de 40°C. De plus, cette dissolution demande un certain temps de contact entre l'eau et la roche (temps cependant bien inférieur à ce que demande la dissolution du calcaire). Et, tout comme le karst du sel, la présence de dioxyde de carbone n'a pas d'influence sur la dissolution. La quantité dissoute au niveau des aquifères peut cependant être considérable.

L'anhydrite peut se dissoudre directement, ou passer après hydratation par le stade gypse. Mais comme l'anhydrite est assez imperméable, la dissolution s'avère le plus souvent plus rapide que l'hydratation.

Ce type de karst du gypse se rencontre par exemple en Sibérie septentrionale. On y observe en surface de vastes dépressions à pentes abruptes remplies d'eau, des dolines, des résurgences, des cours d'eau souterrains.... Des tufs à gypse peuvent aussi être observés.

On peut aussi signaler la Pecos Valley et les environs de Shamrock (USA), le pourtour du Harz (Allemagne), la Lituanie, mais aussi plusieurs régions françaises. Le karst français le plus étendu que nous connaissons est celui de la Plagne en Haute Tarentaise mais il en existe aussi dans le Beaufortain, au Mont-Cenis...



Lapiaz sur une surface de marne gypseuse (Photo Kayou). Trias Languedoc

Karst du marbre

Le principe est le même que pour le calcaire. C'est l'action de l'eau chargée de dioxyde de carbone qui agit sur la roche, en surface et en profondeur.

Ce type de karst peut être rencontré en Bulgarie par exemple au niveau de la zone montagneuse de Pirin. Cette zone est constituée de deux roches : roches granitiques et marbre qui se sont mêlées ensemble. Un relief karstique s'est développé aux dépens du marbre.

En Norvège, près de Svartisen (célèbre pour son glacier, le plus bas d'Europe en altitude), un karst de ce type existe aussi.

En Patagonie chilienne, les îles de marbre de l'archipel Ultima Esperanza offrent aussi un très bon exemple, d'autant plus que l'abondance des pluies (jusqu'à 7 mètres par an) rend le phénomène très rapide.

En France, dans le massif de la Vanoise, au-dessus de Pralognan, un karst dans du marbre s'est développé. Il s'agit d'un marbre Trias à Crétacé supérieur, fortement plissé. On y observe des surfaces lapiazées, des dépressions karstiques, des canyons, des pertes et des résurgences, quelques grottes en paroi...



Lac Buenos Aires (ou General Carrera) karst de marbre.

Karst de la craie

La craie étant aussi une roche calcaire (formée de carbonate de calcium), le processus sera le même que pour les autres roches calcaires (calcaire et marbre). Mais la craie étant une roche plus fragile et plus poreuse, la corrosion mécanique de l'eau sera plus importante. Dans un massif crayeux, les fissures vont rapidement se transformer en galeries... L'eau circulera donc plus vite et la karstification sera plus rapide. Dans les zones crayeuses, le karst comprendra des conduits verticaux (puits et cheminées) issus des failles et des diaclases, des conduits horizontaux (galeries), des salles (de proportions parfois gigantesques) mais il y a aussi des concrétions (stalactites, stalagmites...). Les carrières de Caumont dans l'Eure en montrent de beaux exemples.



Falaises de craie, Etretat.

Karst du travertin

Se rencontre par exemple dans le parc national de Plitvice, Croatie.



Karst du travertin. Parc national de Plitvice. Croatie.

Karst des grès ou des quartzites

Beaucoup de zones de l'état du Minas Gerais au Brésil présentent des grottes et cavités développées dans des grès ou des quartzites. Les régions de *Serra do Espinhaço* et *Serra da Mantiqueira*, en particulier, permettent l'étude de systèmes complexes de karst qui ont largement influé sur le paysage.

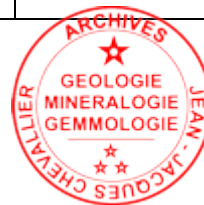
[Voir l'annexe 1](#)

Conclusion

Nous ne pouvons quitter le domaine karstique sans citer quelques paysages connus qui doivent leur existence et leur célébrité à ce type de phénomène :

- Les calanques de Marseille aux rochers et falaises blanches déchiquetés, avec la célèbre grotte Cosquer.
- Les cénotes mexicains (péninsule du Yucatan), vastes gouffres provoqués par l'effondrement de terrains calcaires situés au-dessus d'un réseau de galeries et de rivières souterraines.
- La baie d'Halong au Viet-Nam, ancien relief karstique ennoyé par la suite par la mer. Cette multitude de rochers calcaires dressés en font un site touristique réputé.
- Les Tsingis de la côte ouest de Madagascar. Ces véritables forêts minérales impénétrables dressent vers le ciel des multitudes de pics calcaires acérés, déchiquetés...
- La France n'est pas dépourvue d'autres curiosités karstiques. Un grand nombre de grottes à concrétions sont connues de tous : l'aven Armand, le Gouffre de Prouymessac, le gouffre de Padirac, la grotte de Clamousse, la Grotte des Demoiselles, Dargilan, Certaines cavités karstiques ont servi d'abri ou de refuge aux hommes préhistoriques : qui ne connaît pas la Grotte de Lascaux.





Annexe 1

RAPPORT DE MISSION AU BRÉSIL (cnek.org)

[RAPPORT DE MISSION AU \(cnek.org\)](#) (eng.)

Systèmes karstiques polyphasés dans les grès et les quartzites du Minas Gerais, Brésil

Luc Willems¹, Joël Rodet², André Pouclet³, Sergio Melo, Maria Jacqueline Rodet⁴, Augusto S. Auler⁵

¹ EuReKarst Laboratoire de sédimentologie, Département de géologie, B20, Université de Liège, 4000 Liège, Belgique,

² EuReKarst, UMR 6143 CNRS, Morpho dynamique continentale et côtière, Laboratoire de géologie, Université de Rouen, 76821 Mont Saint Aignan Cedex, France,

³ EuReKarst, ISTO, Institut des Sciences de la Terre, Université d'Orléans, France,

⁴ Doctorant en Archéologie, Université de Paris-X, Boursier CNPq, France,

⁵ CPMTC – Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Brésil,

Abstract:

La state du Minas Gerais (Brésil) présente plusieurs zones karstiques majeures situées dans des terrains de grès et de quartzite, qui présentent une suite complexe de formes karstiques souterraines et de surface. Dans la crête d'Espinhaço, au centre du Minas Gerais, plusieurs grottes, jusqu'à quelques centaines de mètres de long, se trouvent dans les environs de la ville de Diamantina. Certaines de ces grottes, comme Salitre, représentent des avens et montrent des dolines. D'autres grottes horizontales sont caractérisées par des formes de corrosion générées dans la zone phréatique. Dans certains endroits, comme dans la région du Rio Preto, ces formes phréatiques ont été surimprimées par de canaux au plafond, suggérant une évolution karstique polyphasée, avant le drainage de la grotte. Des vestiges de passages, avec une section circulaire jusqu'à un mètre, peuvent être trouvés au milieu des reliefs de surface résiduels en forme de tour, qui constituent un paysage typique. Leur dissection est due à une karstification généralisée dans la région, entraînant la fermeture des canyons, de Mégakarrens et de Kamenitzas. Dans le sud du Minas Gerais, près de la crête de Mantiqueira, les grottes du parc de l'état d'Ibitipoca peuvent s'étendre sur 2 km de long. Ces grottes sont associées à un très grand synclinal suspendu. Plusieurs de ces grottes contiennent des ruisseaux actifs, qui coulent sur des centaines de mètres avant de disparaître dans des passages étouffés par le sable. Des passages en « trou de serrure » caractérisent les voies descendant abruptement dans ces grottes, indiquant un changement d'un écoulement phréatique lent vers un écoulement vadose plus rapide responsable de l'incision verticale du passage. Un tel changement est probablement lié à l'abaissement du niveau de base et/ou au virage dans le sens de l'écoulement de l'eau. Plusieurs générations de poches murales, de quelques centimètres à plus d'un mètre de long, se trouvent dans les grottes. Ces caractéristiques sont de bons indicateurs de la phase initiale de la spéléo-genèse, générant les conduits initiaux par leur coalescence. Ce mécanisme est également responsable des méandres de coupure. La rivière principale de la région, qui coule le long de l'axe du synclinal, traverse une barrière rocheuse, générant un passage en tunnel. Cette grotte draine, par des résurgences dans ses parois, une partie de l'eau qui coule dans d'autres grottes situées sur le flanc du synclinal. Les caractéristiques karstiques non carbonatées observées dans l'État du Minas Gerais démontrent l'organisation complexe des systèmes karstiques polyphasés en raison de la liaison de formes souterraines et de surface non connectées auparavant. Comme dans les zones

carbonatées, ces systèmes peuvent jouer un rôle hydrologique important.



Fig. 1 : Localisation des zones étudiées

Introduction

De nombreuses régions de l'État du Minas Gerais (Brésil) présentent de nombreuses grottes transformées en grès et en quartzites. Les régions de Serra do Espinhaço et Serra do Ibitipoca permettent l'étude de systèmes karstiques complexes, qui influencent largement les paysages (Fig. 1).

1. Serra do Espinhaço

La Serra do Espinhaço est un système de chaînes de montagnes à tendance méridienne, qui s'étend au sud de l'État de Minas Gerais jusqu'à l'État de Bahia, au nord. Nous avons étudié deux zones, l'une près de la ville de Diamantina, avec la grotte de Salitre, et l'autre dans la haute vallée du Rio Preto. La géologie de ces zones est constituée de grès quartzitiques Mésoprotérozoïque de la formation de Sopa-Brumadinho (Genhser et Mehl, 1977 ; Brichta *et al.*, 1980) avec méta pélite et méta abasites intercalés. Les formations d'Espinhaço ont été modérément pliées, métamorphosées et poussées vers l'ouest au-dessus de la marge du craton de São Francisco.

1.1- Grotte de Salitre

La grotte de Salitre se développe dans la partie axiale d'un petit brachy-anticlinal à tendance méridienne (Genhser et Mehl, 1977 ; Brichta *et al.*, 1980), à une dizaine de kilomètres à l'est de la ville de Diamantina. Toute la surface de ces zones montre de nombreux lapiaz et tsingy plus profonds que plusieurs mètres. Parallèlement à l'axe anticlinal, un petit canyon, d'une largeur moyenne de 4 à 10 mètres sur 100 mètres de long, se jette dans un cirque d'environ 50 mètres de diamètre, avec des parois verticales creusées par des alvéoles décimétriques à plurimétriques (Fig. 2-3).

La grotte est ouverte dans le côté sud-ouest du cirque. Son entrée principale est un porche, de 65 mètres de large pour 5 mètres de hauteur, situé à quelques mètres au-dessus du pied de la falaise. La grotte s'étend sur 40 mètres à l'intérieur du massif rocheux et forme une pièce abaissée avec une pente modérée suivant la stratification. Le sol est encombré de blocks plurimétriques effondrés du toit. Ces blocs sont recouverts de nitre abondant et de variscite inférieure. Le nitrate est collecté par les habitants locaux qui ont donné le nom de "salitre" (= nitrate) à la grotte.

Un couloir étroit avec un canal de plafond s'étend au fond de cette pièce. Il s'ouvre sur de larges passages de hauteur inférieure (en moyenne 1 mètre). Parallèlement à l'axe anticlinal, une fracture verticale traverse le toit et permet l'infiltration d'eau, qui humidifie tout le plafond et provoque une précipitation chimique de dépôts fins. Dans la partie ouest et inférieure de la grotte, la pente des différents passages augmente, en suivant la stratification plongeante des lits rocheux (10° à 20°). De nombreuses cloches de plafond et canaux de plafond peuvent être observés. Une deuxième entrée de la grotte est située au pied de la falaise ouest, à 15 mètres au-dessous de la première entrée. Le plafond de ces parties de la grotte est fait par un talus-éventail avec des blocs plurimétriques effondrés. Un écoulement d'eau disparaît à l'intérieur de petites fractures au fond de la grotte, située à 27 mètres sous l'entrée. L'eau provient d'une vallée fermée se terminant au canyon qui mène au cirque et à la grotte. L'eau réapparaît quelques centaines de mètres plus loin, au bord du rio Jaquitinhonha alimentant les habitants locaux. Presque tout le plafond et une grande partie des parois de la grotte sont recouverts d'une substance rouge à sombre principalement faite de Mn, K et Fe. L'imprégnation la plus importante se situe dans la zone de fracture axiale ou au plafond. L'analyse par diffraction des rayons X permet de déterminer la cryptomélane et la pyrolusite. Ce revêtement préserve les formes initiales comme les cloches de plafond (Fig. 4), les alvéoles ou les canaux de plafond développés dans une lithologie friable. Des spéléothèmes millimétriques à centimétriques de type « pop-corn » se trouvent à de nombreux endroits des passages escarpés.

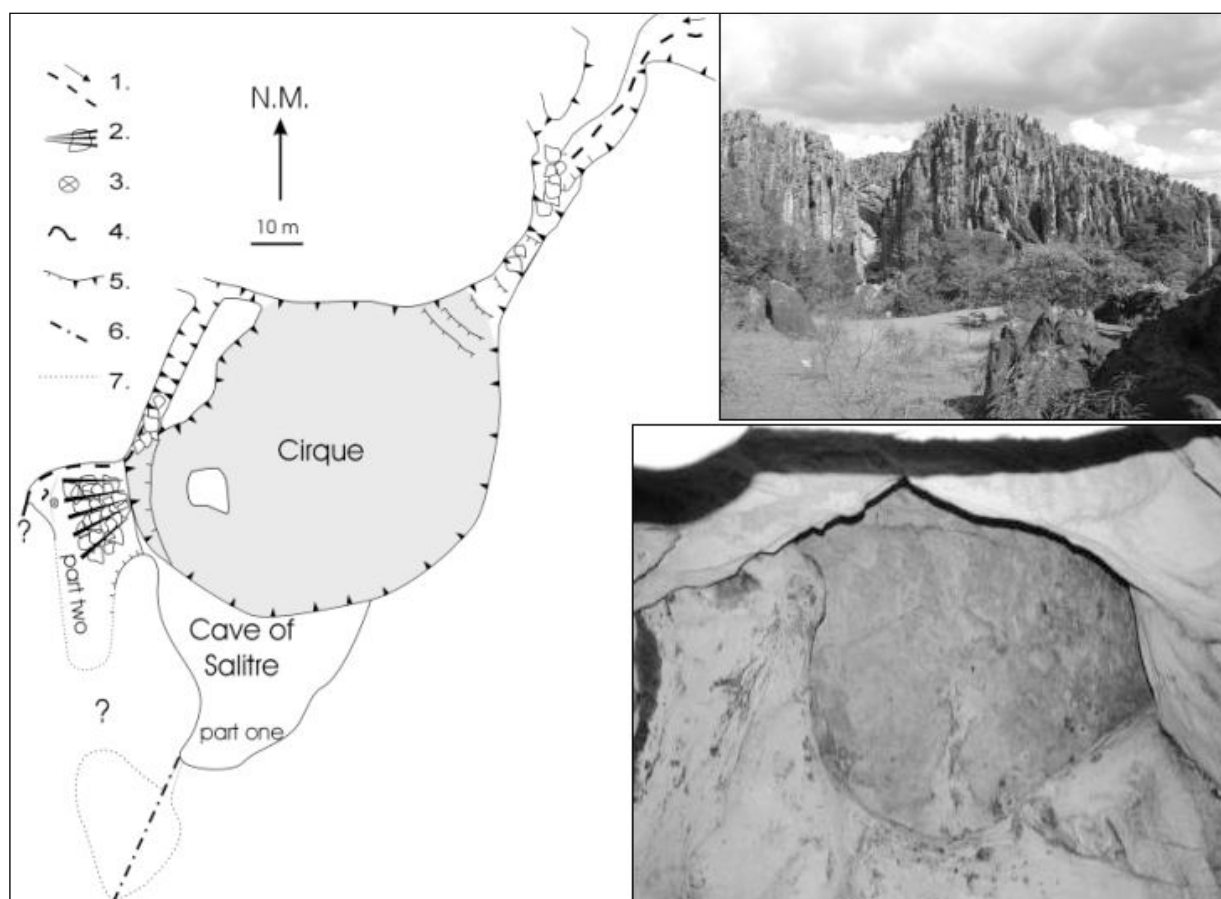


Fig. 2 : Plan du site de Salitre. 1 : écoulement ; 2 : talus en éventail ; 3 dômes de plafond ; 4 : canal de plafond ; 5 : talus/pied de falaise ; 6 : fracturation ; 7 : zones non arpentées. Fig. 3 : Vue générale du bloc Salitre avec l'entrée du canyon et du lapiaz (B. Laignel, 2004). Fig. 4 : Cloche de plafond dans la grotte de Salitre, deuxième partie. Les parties gris foncé sont des restes de revêtement (L. Willems, 2003).

Selon Genhser et Mehl (1977), le canyon et le cirque où se trouve la décharge de la grotte pourraient être le reste d'une grotte plus importante qui s'est effondrée.



Fig. 5 : Exemple de relief en forme de tour avec lapiaz et reliques de passages subhorizontaux (flèche blanche). Au premier plan, une partie de la surface plane, longue de plusieurs kilomètres sur une centaine de mètres de large, située au milieu de la rive droite de Rio. (L. Willems, 2003). Fig. 6: Plafond avec des formes de corrosion caractéristiques coupées par un canal de plafond (flèche blanche). La grotte (10 m de long) relie deux canyons (L. Willems, 2003).

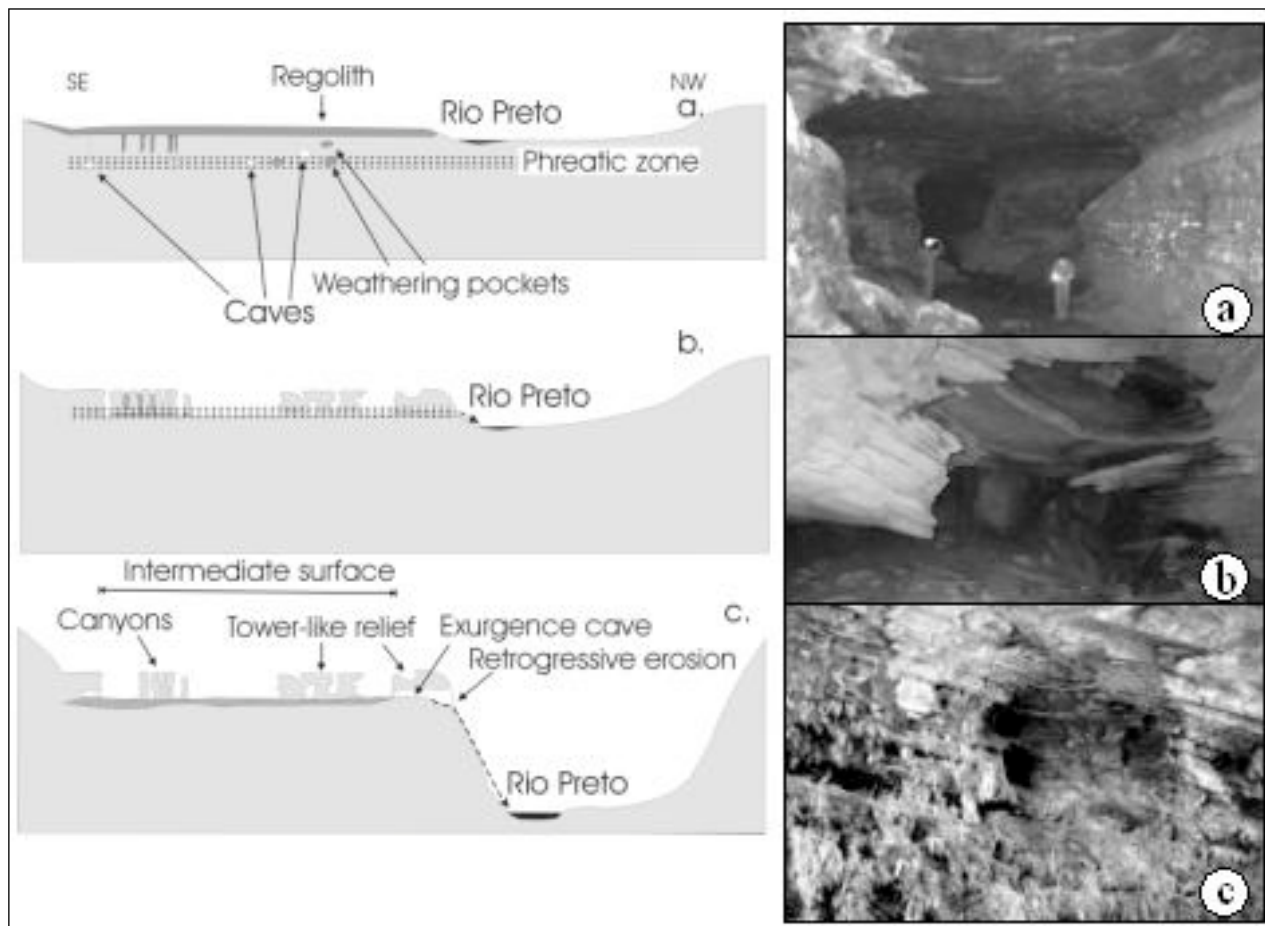


Fig.7 : Hypothèse génétique du système karstique de Rio Preto.

Fig 8:a: Gruta dos Fugitivos (Parc national d'Ibitipoca, J. Rodet, 2003). b: Gruta dos Moreira (Parc national d'Ibitipoca). Effondrement des strates quartzitiques (L. Willems).c: Caverna_Ponte de Pedra (Parc national d'Ibitipoca) Alvéoles développées sur les parois de la grotte-tunnel, sur la rive droite du Rio do Salto (L. Willems, 2003)

1.2 Karsts du Rio Preto

La haute vallée du Rio Preto se trouve à 50 km au nord-est de la ville de Diamantina. En amont d'une chute d'eau provoquée par un barrage géologique de strates quartzitiques légèrement repliées, la vallée s'élargit sur quelques centaines de mètres. Aux bords de cette zone plane (surface intermédiaire) (Fig. 7c), les flancs de la vallée présentent de nombreux ouvrages karstiques : inselbergs, canyons fermés, des dizaines de mètres de long sur plus de 10 mètres de profondeur et des reliefs en forme de tour (Fig. 5) rainurés par lapiaz et megalapiaz. Les grottes subhorizontales, les vestiges de passages à section circulaire et les grottes de canyon sont ouvertes dans les bords escarpés de la vallée. L'orientation des canyons est contrôlée par la fracturation verticale nord-sud associée aux failles de décrochement régionales.

Les parois des canyons fermés montrent des alvéoles décimétriques à métriques. Ils sont attribués au processus pédogénétique et ressemblent à des encoches basales trouvées dans de nombreuses roches gazeuses ou non gazeuses, ainsi qu'à des alvéoles qui se sont développées au contact des obturations endokarstic. Les reliefs en forme de tours sont générés par les intempéries de surface, en partie à cause des acides organiques produits par les mousses et les lichens qui couvrent largement la surface de la roche. Quelques canyons et reliefs en forme de tours traversent de nombreuses grottes horizontales. L'un d'eux relie deux canyons et a un plafond avec des formes de corrosion caractéristiques qui ont été générées dans une zone d'eau souterraine. Par endroits, les restes des canaux de plafond coupent les formes de corrosion précédentes (Fig. 6). Ils maintiennent l'ouverture

d'un système karstique avec l'augmentation du drainage. Des restes de passages circulaires traversent des reliefs en forme de tour. Ils témoignent de l'ancienne direction du drainage. Les différentes galeries rapportées sont essentiellement développées en suivant la stratification subhorizontale.

Une grande grotte particulière (plus de 100 mètres de développement) en cours de démantèlement est observée. Elle traverse un inselberg en forme de tour situé entre la rive plate de la haute vallée et le lit inférieur de la rivière. Des conduits circulaires latéraux de sortie et des colonnes de dissolution verticales sont mis en évidence. De plus, le sol de la grotte est localement recréusé pour donner des canyons qui rejoignent la rivière, plusieurs mètres plus profondes.

L'altitude de la rive plate supérieure et des différentes cavités est assez similaire. Les cavités semblent être la relique d'un système karstique à un ancien niveau de nappe phréatique (Fig. 7). L'érosion de surface a démantelé ce système qui est apparu à l'extérieur et est devenu une sorte de plaine. La baie du Rio isole la surface plane. L'eau drainée de ce niveau traverse les grottes en direction de la rivière. En raison de l'enfoncement de la vallée de la rivière, l'érosion régressive génère des canyons à l'intérieur des grottes.

Les différentes formes observées dans la haute vallée du Rio Preto attestent de la genèse d'un système karstique complet, qui résulte de la connexion d'un endokarste avec un exokarste.

1. 2.1 Serra de Ibitipoca

La Sierra d'Ibitipoca est une barrière naturelle entre les États du Minas Gerais, de São Paulo et de Rio de Janeiro (Fig. 1). C'est un grand ridge synclinal qui s'élève de plusieurs centaines de mètres plus haut que les zones environnantes. La composition lithologique de la Sierra est constituée de quartzites méso-protérozoïques. Des dizaines de grottes sont signalées dans cette zone et certaines sont parmi les plus grandes du monde, pour ce type de roche (par exemple Gruta das Bromélias, 2750 m de développement) (Fig. 8a,b).

2.1- Ponte de Pedra e affluentes (Gruta dos Coelhos, Gruta das Casas)

La grotte de Ponte de Pedra est un tunnel d'environ 50 mètres de long, pour 10 mètres de large et 12 mètres de haut. Il est développé sur le flanc ouest du synclinal, parallèle à l'axe du pli. Il permet le passage du Rio do Salto à travers la barrière rocheuse. La grotte est une section transversale en « trou de serrure » formée par une érosion verticale tardive due à un abaissement d'un niveau de base régional ou local.

Plusieurs générations d'alvéoles centimétriques à plurimétriques sont développées sur les parois du tunnel, sur la rive droite du Rio (Fig. 8c). Certains d'entre eux sont plus grands et présentent des formes complexes résultant de la coalescence d'alvéoles plus petites. Ils peuvent être surimprimés ou démantelés par d'autres alvéoles. Par endroits, l'eau s'est déversée des drains parallèlement au pendage des strates. Ils viendraient de plusieurs grottes développées plus haut dans le flanc du synclinal, où l'on observe un drainage souterrain (Gruta dos Coelhos, Gruta das Casas). Toutes les alvéoles sont situées au-dessus de l'encoche de l'érosion verticale tardive du tunnel. Aucun d'entre eux n'est observé dans la paroi de la rive gauche du Rio.

Diverses alvéoles sont interprétées comme des restes d'endokarstes primaires qui ont organisé le premier système de drainage par leur coalescence (Fig. 9). Ils ont autorisé la coupure souterraine de Rio do Salto. Ensuite, le creusement du tunnel augmente. Cela a provoqué une érosion plus prononcée sur la rive gauche, selon la disposition du pendage

des strates. Les alvéoles primaires sont complètement effacées sur cette paroi, tandis que sur la rive droite, abandonnées par le drainage, elles sont préservées. Les résurgences actuelles, le long de la paroi ouest du tunnel provoquent une modification des formes par canalisation.

1.2.2-Le drainage du Rio Vermelho (Grutas dos Moreiras, dos Três Arcos, dos Fugitivos).

Le drainage de la Serra présente une organisation dans deux directions. Le premier (Rio do Salto) suit l'axe et le pendage du synclinal vers le sud-ouest. Le second se développe dans une direction opposée à la structure, au nord-est (Rio Vermelho). Dans les cavités de cette zone nord-est, la plongée du Rio Vermelho correspond au développement de sections transversales en trous de serrure de drains parallèles à cette dernière direction. Ils témoignent d'un changement général des drainages vers le Rio do Salto au profit du bassin fluvial du Rio Vermelho.

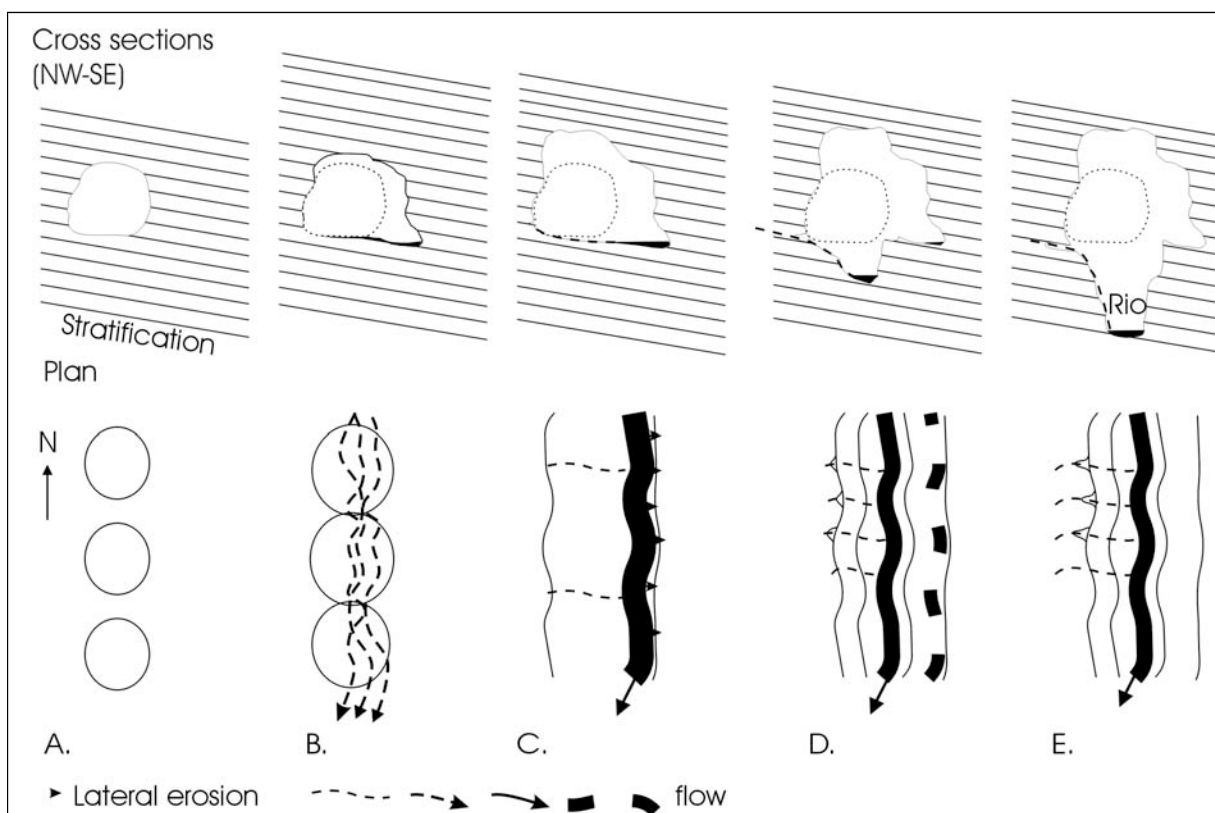


Fig. 9: hypothèse génétique de la Caverne Ponte de Pedra (voir le texte pour les explications).

1.2.3 - Discussion

De nombreuses grottes examinées dans le parc Ibitipoca présentent des parois ou des plafonds en cours de dislocation (Fig. 8b). La désintégration de la quartzite produit des matériaux sableux abondants, qui sont évacués en aval par des rivières souterraines. Si l'évolution actuelle des cavités résultait principalement de l'érosion mécanique, le processus (bio)chimique devait initialement prévaloir dans la genèse des grottes. En effet, plusieurs drainages souterrains disparaissent dans des fissures impénétrables à l'intérieur

du bloc. Pourtant, seule l'érosion chimique permet d'expliquer les volumes de sables résiduels qui n'ont pas fermé une grande partie de ces grottes et n'ont pas empêché leur développement. En effet, aucune résurgence en aval ne permet une évacuation mécanique de ces résidus.

L'érosion chimique est à l'origine des cavités et elle implique une dissolution par altération à la fois des grains de quartz et du ciment siliceux comme observé par Chalcraft et Pye (1984) dans les tepuys du Venezuela. L'aération des systèmes provoque un changement à une incomplète dissolution (Wiegand, J et *al.*, 2004) associée à une érosion mécanique. Les conditions bio physico-chimiques actuellement observées dans les cavités visitées doivent différer de l'environnement initial dans lequel ont été générées les différentes grottes d'Ibitipoca.

L'étude des différentes grottes montre que :

- elles sont générées par dissolution générale du quartzite selon un processus karstique qui doit être déterminé plus précisément ;
- elles résultent de plusieurs phases génétiques et d'adaptation ;
- elles sont les témoins des anciennes phases de l'évolution hydro géomorphologique régionale.

Conclusion

Le processus de formation et de développement des cavités dans les grès et les quartzites du Minas Gerais est dû à la dissolution du ciment siliceux et/ou des grains de quartz. Le développement important de grottes, d'avens, de rivières souterraines, de lapiaz, de dolines et de plaines a mis en place des systèmes karstiques complets. Les processus génétiques sont identiques à ceux des roches carbonatées. Ainsi, il s'agit de karsts dans les grès et les quartzites.

Remerciements

Les auteurs remercient Benoit Laignel et Nicolas Massei pour leur aide dans la réalisation de l'enquête de terrain.

Bibliographie

- Auler A.S., 2003. Grottes de quartzite d'Amérique du Sud. Encyclopédie des grottes et de la science karstique, John Gunn (d.), Fritzroy Dearborn: 611-613.
- Chalcraft, D. & Pye, K., 1984. Altération tropicale humide du quartzite dans le sud-est du Venezuela. Z. Géomorphe. N.F., Berlin-Stuttgart, 28, 3, p. 321 à 332.
- Brichta, A., Paternoster, K., Schöll, W.U., Turuinsky, F., 1980. Die Gruta do Salitre bei Diamantina, Minas Gerais, Basilien, kein "Einstursloch". Z. Géomorphe. N.F., 24-2, 236-242, Berlin – Stuttgart.
- Corrêa Neto A.V., 2000. Spéléogénèse dans le quartzite dans le sud-est du Minas Gerais, Brésil. Spéléogénèse – évolution des aquifères karstiques, National Speleological Society: 452-457.
- Genser, H, Mehl, J., 1977. Einsturzlöcher in silikatischen Gesteinen Venezuelas und Brasiliens. Z. Géomorphe. N.F., 21, 4: 431-434, Berlin, Stuttgart.
- Martini J.E.J., 2000. Grottes de quartzite en Afrique australe. Spéléogénèse – évolution des aquifères karstiques, National Speleological Society: 458-461.
- Martini J.E.J., 2003. Karst de silicate. Encyclopédie des grottes et de la science karstique, John Gunn (ed.), Fritzroy Dearborn: 649-653.

- Melo da Silva S., 2004. Carstificação em rochas siliciclásticas. Estudo de caso na Serra do Ibitipoca, Minas Gerais. Universidade Federal de Minas Gerais, Inst. Geociências, 157 p.
- Wiegand, J; Fey, M; Haus, N; Karmann, I. 2004. Geochimische und hydrochimische untersuchung zur genese von sandstei-und quartzitkarst in der Chapada Diamantina und im eiserne viereck (Brasilien). Z. dt. geol. Ges. 155: 61-90.
- Willems L., 2000. Phénomènes karstiques en roches silicatées non carbonatées. Cas des grès, des micaschistes, des gneiss et des granites en Afrique sahélienne et équatoriale. Thèse de doctorat, 257 p., 145 figs., 137 photos, Université de Liège, Belgique.
- Willems L., Rodet J., Auler A.S., Piló L.B., Pouclet A., 2003a. Karsts en roches non carbonatées - l'exemple des quartzites et des itabirites de Minas Gerais (Brésil). « Le karst de la craie en Normandie », J. Rodet (dir.), Journées de l'AFK 2003, Rouen, 10-12 septembre 2003, poster, colloque et excursions : 31.
- Willems L., Auler A., Rodet J, Melo da Silva S., Pouclet A., 2003b. Karsts en roches non carbonatées dans l'état de Minas Gerais - Brésil : résultats préliminaires. Journées 2003 de Spéléologie Scientifique, Centre Belge d'Etudes Karstologiques, groupe de contact du F.N.R.S., et la Commission Scientifique de l'Union Belge de Spéléologie, Han sur Lesse, 15-16 novembre 2003, résumé : 1 p.
- Willems L., Rodet J., Auler A.S., Pouclet A., 2004a. Reflexões sobre a gênese do carste. Exemplos em diferentes litologias: Brésil, Nger, Camarões, França e Holanda. Carste-2004, Belo Horizonte, 27-31 juillet 2004, Caderno de Resumos: 85, poster.
- Willems L., Rodet J., Pouclet A., Rodet M.J., Hatert F., Compère P., Auler A.S., 2004b. Carste no quartzito: Gruta do Salitre (Diamantina, Minas Gerais, Brésil). Carste-2004, Belo Horizonte, 27-31 juillet 2004, Cadernos de Resumos:86, poster.
- Willems L., Rodet J., Pouclet A., Rodet M.J., Hatert F., Compère P., Auler A.S., 2004c. Carste no quartzito: oParque Estadual do Rio Preto (São Gonçalo do Rio Preto, Minas Gerais, Brésil). Carste-2004, Belo Horizonte, 27-31 juillet 2004, Caderno de Resumos: 86, poster.
- Willems L., Rodet J., Auler A., Piló L.B., Pouclet A., 2004d. Karsts en roches non carbonatées – l'exemple des quartzites et des itabirites de Minas Gerais, Brésil – Karsts in noncarbonated rocks – examples in quartzite and itabirite rocks from Minas Gerais, Brazil . Actes des Journées Européennes de l'AFK 2003, Rouen, J. Rodet (ed.), novembre 2004 : 74-75.

