

Un peu de karsto pour les spéléos

Jacques Bauer

Avant-propos

Les spéléos de base, spécialement les jeunes débutants, répugnent souvent à entendre parler de géologie alors qu'ils s'adonnent à ce plaisir exclusivement souterrain. Pourtant, ce jeu n'est vraiment complet que si l'on y ajoute ce zeste de connaissance qui permet de comprendre le cadre dans lequel il se pratique. D'autre part, il est souhaitable que ceux qui ont la responsabilité de guider aient aussi celle d'expliquer la structure et les mécanismes élémentaire du terrain de jeu.

Conscient de ce que bien des copains (et des copines) reculent devant la lecture des «Principes de karsto physique» (Cahier physique n°7 de l'E.F.S., actuellement épuisé) -déjà une introduction et incitation à parcourir les classiques de la vulgarisation karsto et spéléo- je propose ici une série de notes élémentaire.

Chapitre 1 : LE KARST OU LE PAYS KARSTIQUE

a- Paysage façonné dans une roche soluble.

Pour nous, spéléos, la roche soluble est le calcaire. Sachons simplement ici que le calcaire, très peu soluble dans l'eau pure, l'est nettement plus dans une eau contenant du dioxyde de carbone (ou gaz carbonique=CO₂) dissous.

Ce gaz carbonique est prélevé un peu dans l'air mais très majoritairement dans le sol végétal qui en contient 10 à 100 fois plus en raison de l'action de champignons et de bactéries qui décomposent la matière organique.

Un karst est donc un paysage façonné dans une roche calcaire. «Karst» est à l'origine la version allemande d'une province de l'ancienne Yougoslavie. Le nom a été retenu par les géographes pour désigner toutes les zones calcaires présentant plus ou moins les mêmes particularités paysagères.

Mais il existe en France et ailleurs d'autres types de roches solubles: le gypse (pierre à plâtre), très soluble à l'eau pure, forme des paysages comparable au karst dans les Alpes (1), en Espagne (2), en Argentine (3)... A l'opposé, sous certaines régions (tropical très humide par exemple), même des roches en apparence très peu solubles comme les quartzites (grès fortement cimentés, compacts, du type de ceux que l'on trouve associés à la mine de Banca au Pays Basque) peuvent produire avec la durée des paysages mimant le karst : Vénézuéla (4), Afrique (Burundi)(5)...

b- Un pays très spécial où l'eau ne s'écoule plus en surface mais dans les profondeurs.

En raison de sa solubilité et de la fracturation plus ou moins intense qui l'affecte, le pays calcaire favorise

l'infiltration quasi-immédiate de l'eau des rivières qui l'abondent et des précipitations qui l'arrosent. Les cours d'eau organisés sont essentiellement souterrains, de même que tout écoulement plus diffus pénétrant le massif.

L'écoulement organisé est donc pratiquement inexistant en surface. S'il se produit localement, il ne se maintient guère au delà de quelques dizaines de mètres, sauf pluies torrentielles capables de saturer momentanément un talweg.

Cette perméabilité «en grand» du calcaire fracturé et la nature de sa solubilité sont à l'origine d'une grande variété de formes originales et spécifiques que façonnent de concert le contexte géologique et le climat. D'où la diversité des Karts (haute montagne, causses, tropical humide...) :

- Le lapiaz désigne les surfaces où le calcaire est à l'affleurement. Il peut être nu (pas ou très peu de sol) ou couvert partiellement (sol forestier) et présente des formes variées de dissolution du calcaire, fonction de la fracturation et du couvert végétal éventuel.

- Une vallée sèche ou morte a été creusée initialement par un cours d'eau permanent, à une époque où le débit était suffisant pour ne pas être entièrement absorbé (contextes géographiques et/ou climatiques différents de l'actuel. Son tracé et sa forme sont donc «hérités» d'un autre temps.

- Les autres dépressions du karst sont généralement des dépressions fermées. Les plus simples sont des dolines, en entonnoir, baquets, etc... Des dolines jointives forment des ouvalas («grappes» de dolines). Une doline de soutirage se forme souvent sous une couverture argileuse surmontant une

(1)- Karstologia n°17 et 21

(2)- Karstologia n°6 et 16

(3)- Karstologia n°20

(4)- Karstologia n°5

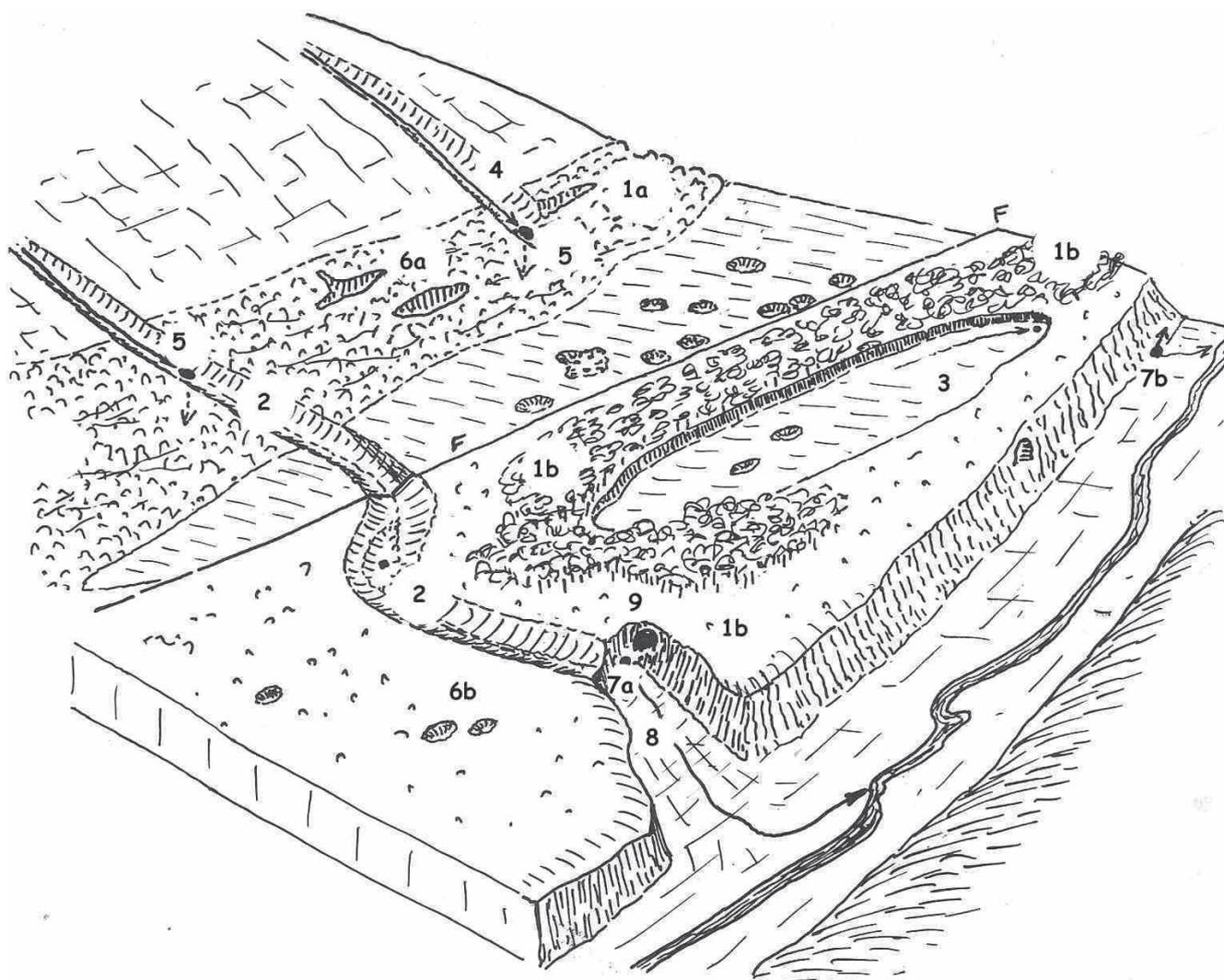
(5)- Karstologia n°29 (voir aussi dans ce même numéro les «phénomènes pseudokarstiques dans les roches plutoniques et métamorphiques du sud cameroun»

zone particulièrement fracturée du calcaire, où la dissolution est plus efficace. Les dolines sont métriques à décamétriques mais peuvent dépasser 100m de diamètre.

- Un polje est une plaine en milieu calcaire, élargie progressivement par recul de ses bords sous l'effet d'une dissolution provoquée par une inondation périodique (montée de la nappe phréatique imprégnant

les calcaires sous-jacents), d'où un fond régulier et plat généralement tapissé d'alluvions fins. Une vallée aveugle se termine en aval contre un «butoir» dont la nature et l'origine peuvent être variées, mais contre lequel s'est ouverte une perte.

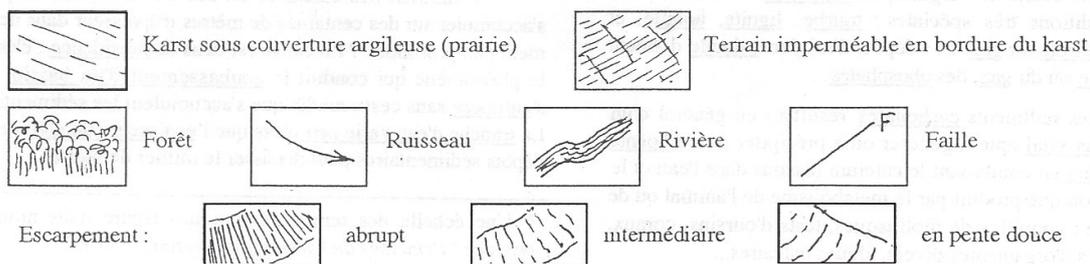
Pour le reste, on consultera la figure ci-dessous.



Formes du Karst :

- 1: Lapiaz 1a: lapiaz nu 1b: lapiaz couvert (forestier)
- 2: Vallée sèche ou morte
- 3: Polje (plaine plus ou moins inondable à subsidence calcaire)
- 4: Vallée aveugle
- 5: Perte ou ponor
- 6: Dolines 6a: d'effondrement dans le lapiaz/ 6b: de soutirage

- 7: Emergences 7a: résurgence (réapparition d'un cours d'eau enfoui en amont) 7b: exsurgence (source alimentée par l'infiltration diffuse dans le lapiaz)
- 8: Reculée
- 9: Porche perché (ancienne émergence asséchée par l'abaissement général du niveau des sources)



Chapitre 2 : CALCAIRES ET DOLOMIES :

a- Sédiments-roches sédimentaires.

L'eau des précipitations qui tombe sur les terres émergées provoque l'altération des roches en place et l'usure des reliefs. Le phénomène s'appelle l'érosion. Les produits de l'érosion sont déblayés par l'eau de ruissellement, puis transportés par les torrents les rivières et les fleuves jusqu'à ces grands réservoirs d'eau que sont les lacs, les mers et surtout les océans qui couvrent à eux seuls plus de 70% de la surface du globe.

Les produits de l'érosion ainsi véhiculés le sont soit sous forme dissoute (sels, bicarbonate de calcium), soit sous forme solide (particules argileuses, sable, gravier, galets,...). Arrivés dans un lac, la mer ou l'océan, ils s'y déposent sous forme de sédiments, en couches plus ou moins régulières :

- Les sédiments détritiques ou clastiques proviennent de la désagrégation mécanique des reliefs (par l'altération chimique responsable d'un «pourrissement» des roches, le gel, les variations brutales de température...). Ce sont les argiles, les silts ou pélites (sables extrêmement fins), les sables, etc...

- Les sédiments chimiques résultent de la précipitation de sels (sel gemme, gypse,...) dans un bassin sous climat chaud et sec, en régime d'évaporation intense (pays du golfe persique par exemple).

- Les sédiments organiques comprennent toutes les accumulations de matériaux produits par la vie végétale ou animale : déjections (comme le guano de chauve-souris), cadavres de petites bestioles ou restes de végétaux tapissant le fond de bassin...

- Les sédiments, généralement meubles à l'origine, se transforment sous certaines conditions (précipitation d'un ciment, compaction,...) en roches sédimentaires plus ou moins indurées, consolidées. Ainsi les argiles deviennent des argilites, les sables deviennent des grés ou des quartzites et, s'il contiennent des galets, des conglomérats ou des poudingues. Une évolution plus poussée sous forte pression transforme les argilites en schiste ou en ardoise.

- Les sédiments organiques végétaux deviennent sous des conditions très spéciales : tourbe, lignite, houille, et même du pétrole ou du gaz, des phosphates...

- Les sédiments carbonatés résultent en général d'un processus vital apte à générer ou à précipiter du carbonate de calcium en combinant le calcium dissous dans l'eau et le gaz carbonique produit par le métabolisme de l'animal ou de la plante : coquille de mollusque, tests d'oursin, coraux, squelettes d'organisme divers, algues calcaires...

b- Carbonates - roches carbonatées.

Les roches sédimentaires carbonatées étant dans leur grande majorité le produit de processus vitaux,

on les trouve associés aujourd'hui comme par le passé à des milieux surtout marins où la vie peut ou pouvait proliférer. Il s'agit essentiellement de zones peu profondes (quelques dizaines à 200 ou 300 mètres) où pénètre une partie du rayonnement solaire et où la nourriture est suffisante : mers intérieures, comme le furent le bassin parisien ou l'Aquitaine; marges d'océans; plates-formes ou hauts-fonds marins (Bahamas d'aujourd'hui, Pierre-Saint-Martin du Crétacé).

Les calcaires sont donc formés essentiellement de carbonate de calcium (calcite). Lorsqu'ils contiennent une certaine proportion d'argile, on passe à des calcaires marneux (5 à 35% d'argile) et à des marnes (35 à 65% d'argile).

Les récifs coralliens sont des édifices calcaires construits par des animaux. On en trouve des vestiges dans les Arbailles (Pic d'Elarré). Il existe ailleurs des récifs d'algues calcaires. Sur certaines plates-formes prolifèrent des mollusques dont les tests s'accumulent dans une boue carbonatée, produit ultime de la désagrégation d'organismes calcaires dans les vagues. Le calcaire aptien des chaînons nord-pyrénéens en est un bel exemple. Il est truffé de débris de coquilles pris dans un ciment massif à grain très fin.

Mais des calcaires peuvent également se déposer en plein milieu de l'océan, en eaux profondes : ils sont alors le produit d'une «pluie» continue de cadavres d'organismes microscopiques à squelette calcaire appartenant au plancton. Ce processus fonctionne essentiellement sous climat chaud, équatorial ou tropical. Il concerne aujourd'hui une grande surface dans le Pacifique et fut responsable au Crétacé de vastes accumulations de craies. Ces calcaires des mers profondes sont dit pélagiques = « de la haute mer ».

Sous certaines conditions, les calcaires peuvent se trouver imprégnés par des eaux riches en magnésium. Les eaux marines en contiennent d'autant plus qu'elles sont concentrées en sels. Le magnésium se combine alors au carbonate de calcium pour donner un carbonate de calcium et de magnésium : la dolomite. Les dolomies sont des carbonates formés essentiellement de ce minéral, tandis que les calcaires dolomitiques en contiennent une proportion plus ou moins importante.

Comment des calcaires ou des dolomies ont-ils pu s'accumuler sur des centaines de mètres d'épaisseur dans des mers peu profondes ? La cause est dans la subsidence : c'est le phénomène qui conduit le soubassement d'un bassin à s'enfoncer sans cesse tandis que s'accumulent les sédiments. La tranche d'eau varie peu alors que l'épaisseur cumulée des dépôts sédimentaires peut dépasser le millier de mètres.

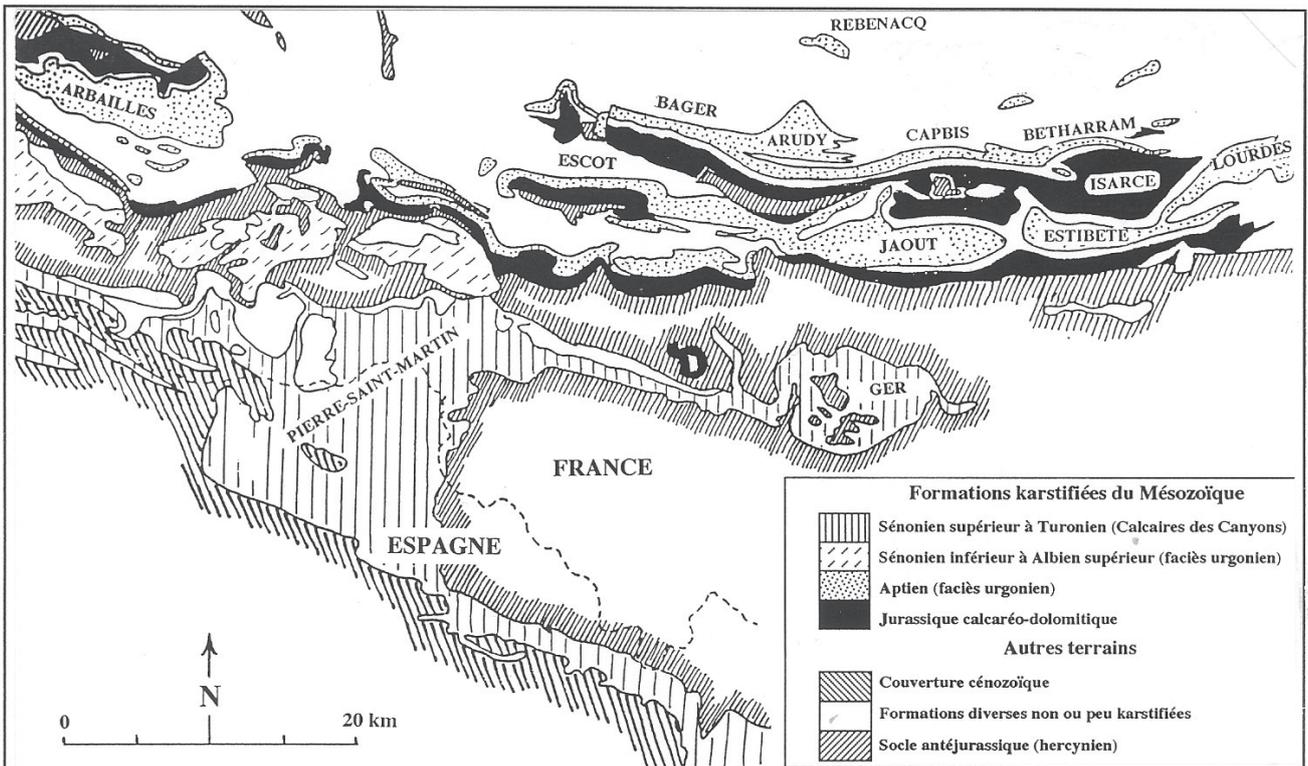


Fig. 1 : Massifs karstiques des Pyrénées occidentales (centre et est)

(d'après la carte géologique au 1 : 250 000 de la Société Nationale des Pétroles d'Aquitaine - 1972)

L'ère secondaire (Trias - Jurassique - Crétacé) fut une période particulièrement propice au développement de plates-formes carbonatées dont sont construits la plupart des karsts pyrénéens. Le Jurassique moyen et supérieur (entre - 180 et - 135 millions d'années) est riche en dolomies et calcaires dolomitiques tandis que les carbonates du Crétacé (Aptien à Sénonien, soit entre - 115 et - 80 millions d'années) sont essentiellement des calcaires d'une grande pureté (calcaires à *Toucasia* de l'Aptien, calcaires des Canyons du Sénonien de la Pierre-Saint-Martin). Pour les âges géologiques, voir J. Bauer "Principes de karstologie physique", Cahiers de l'E.F.S. n° 7 (1997).

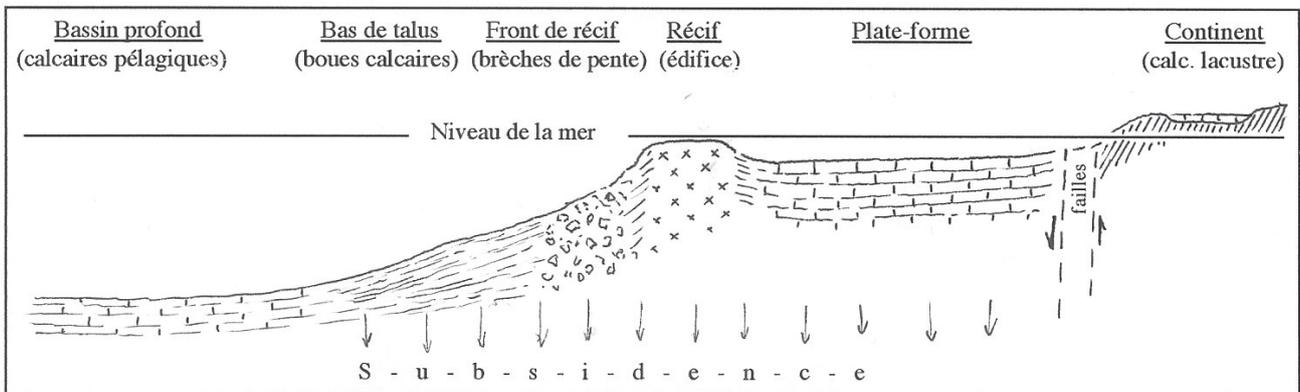


Fig. 2 : Quelques environnements de la sédimentation carbonatée, depuis la terre émergée à droite, jusqu'à la mer profonde à gauche. Sans échelle : les calcaires pélagiques (craie) peuvent couvrir des milliers de km²; les franges de bas de talus, les fronts, les récifs forment des corps allongés sur des dizaines ou des centaines de kilomètres, mais larges seulement de quelques centaines de mètres ou quelques kilomètres; les calcaires de plate-forme peuvent s'étendre sur des centaines de km²; les calcaires lacustres sont assez rares et peu étendus.

Pour ce qui est des profondeurs du milieu de dépôt : hormis les calcaires pélagiques (jusqu'à plusieurs milliers de mètres), les autres milieux sont moins profonds, en particulier les récifs et les calcaires de plate-forme (zéro à quelques dizaines de mètres, voire 2 ou 3 centaines de mètres).

La suite de « Un peu de karsto pour les spéléos » dans le prochain Info EFS !

Un peu de karsto pour les spéléos - Chapitre 3 et 4

Jacques Bauer

La petite histoire du « Karst en 12 leçons »

Connaissez vous les belles histoires de « oncle Jacques » ? C'est une question en version spéléo directement inspirée d'une BD que certains on peut être lu dans leur jeunesse (« les belles histoires de l'oncle Paul » Spirou). Si vous ne les connaissez pas nous vous proposons de les découvrir progressivement sur plusieurs numéros de Info EFS.

L'idée de cette réédition est venue lors d'une réunion de la DN EFS, lorsque nous évoquions la nécessité d'un document de référence destiné aux futurs initiateurs ; document contenant les bases culturelles incontournables. Lors d'un stage Judicaël Arnaud avait été conquis par les talents de conteur géologique de Jacques Bauer, auteur du « Karst en 12 leçons ». A l'origine il s'agit d'une suite d'articles de vulgarisation traitant de la karstologie, destinés aux spéléos des Pyrénées Atlantiques. Une version expurgée avait été publiée dans Spelunca n°86. Les JNS 2007 organisées par le CDS64 ont été l'occasion de retrouver Jacques Bauer et je lui ai proposé cette idée de réédition avec son accord. Pour ceux qui connaissent Jacques et son insatiable envie de faire partager ses connaissances, la réponse ne fait aucun doute. L'après midi même j'avais en main les versions papier des articles. Jacques, ta pédagogie n'a d'égale que ta gentillesse ; merci encore au nom de tous. La suite est une affaire de famille car il fallait saisir les textes et scanner l'ensemble des figures. Yann, Sophie et Noémie Abadie (EDS 64) ont consacré de nombreux instants à saisir ces documents. Depuis le numéro précédent, le n°53, dans ce numéro et dans les prochains, vous trouverez 2 chapitres en respectant le texte et les figures d'origine.

Bonne lecture à tous en espérant que chacun (cadre EFS ou pas) puisse y trouver du plaisir et des connaissances utilisables lors de nos balades ou explorations souterraines.

P-M Abadie

Jacques Bauer a écrit de nombreux articles sur le sujet, pour ceux qui désirent aller plus loin la lecture des « Principes de karstologie physique » (Jacques BAUER les cahiers de l'EFS N°7) constitue un bon départ.

Chapitre 3 : DISPOSITIONS STRUCTURALES DES MASSIFS CARBONATÉS : DIFFÉRENTES FORMES DU KARST.

a- Karst à la naissance

Dès qu'un massif carbonaté est soumis à l'atteinte des précipitations, il est soumis à des phénomènes de dissolution qui attaquent la roche. C'est le cas (entre autres) des récifs calcaires portés à l'émergence soit par abaissement du niveau de la mer, soit par surrection du fond du bassin. Un karst peut donc être très précoce. C'est ce que l'on observe au sein de certaines formations calcaires comme les entablements urgoniens (crétacé) des Alpes. On peut y déceler de discrètes et passagères interruptions dans la sédimentation, soulignées par des altérations de natures karstiques. De tels indices existent également dans les Arbailles. Nathalie VANARA et Richard MAIRE en auraient identifié un dans le grand puits d'Aphanicé (à confirmer).

Comme nous l'avons déjà expliqué, les carbonates de plates formes se déposent fréquemment en milieu très

peu profond. Il suffit donc parfois d'un abaissement relatif de quelques dizaines de mètres du niveau de la mer pour provoquer une émergence accompagnée de karstification.

b- Régions tabulaires, régions plissées

Une fois déposée et indurée, une formation calcaire sera donc portée tôt ou tard hors de l'eau. Si elle arrive telle quelle sous le soleil et la pluie sans aucune couverture imperméable (argile ou marne), elle sera immédiatement la proie de l'érosion et de la karstification. Si elle est protégée par une couverture efficace, elle attendra le plus souvent (mais pas toujours - car même les meilleures couvertures ont parfois des trous...) d'être libérée avant d'être touchée par l'infiltration. Mais en tout état de cause, en fonction des déformations d'ensemble quelle aura subies dans son histoire, mais aussi de l'érosion, elle sera amenée à adopter dans le contexte géographique des attitudes qui influenceront dans la forme générale et le fonctionnement hydrologique du karst quelle aura induit.

On sait que la surface des continents se partage entre zones non plissées (=tabulaires) et zones plissées (chaîne de montagnes). En région tabulaire (fig. 2), les formations calcaires forment des plateaux ou entablements horizontaux ou légèrement basculés (causses), des «cuestas» ou crêtes dissymétriques (couches plongeant vers le coeur d'un bassin, comme dans l'est du bassin de Paris).

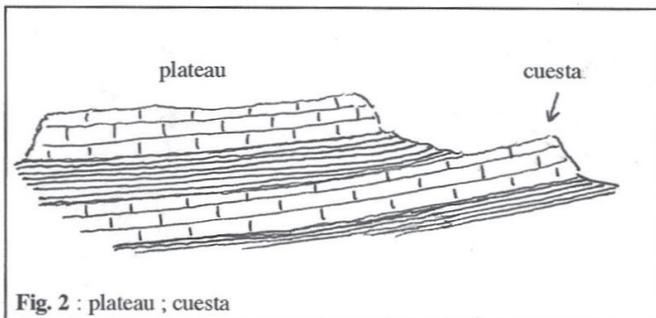


Fig. 2 : plateau ; cuesta

En pays plissés, les couches sont plus perturbées, redressées parfois à la verticale ou presque (fig 5, massif d'Iseve), ployées en synclinal (pli en U, comme le Jaout) ou en anticlinal (U inversé-fig.3). L'érosion, minant les reliefs, détruit généralement les parties hautes de plis, crevant l'axe des anticlinaux pour n'en laisser que des flancs. Ceux-ci subsistent sous forme de barres plus ou moins puissantes plongeant profondément dans le sous-sol(fig.4).

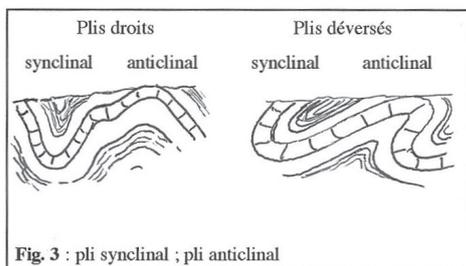


Fig. 3 : pli synclinal ; pli anticlinal

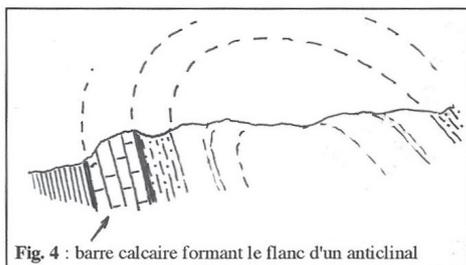


Fig. 4 : barre calcaire formant le flanc d'un anticlinal

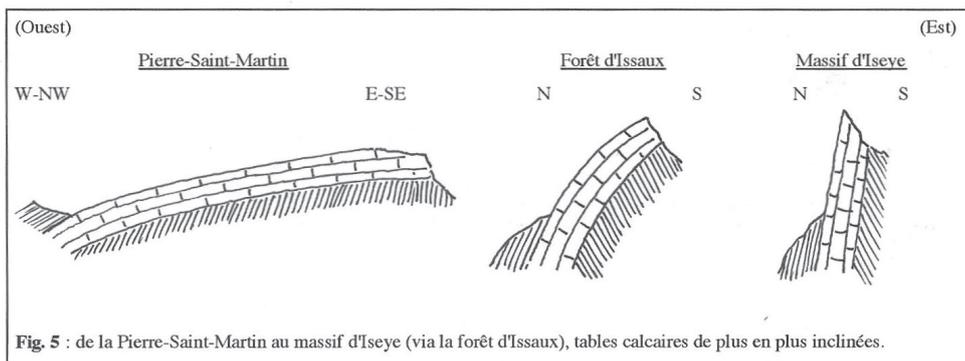


Fig. 5 : de la Pierre-Saint-Martin au massif d'Iseve (via la forêt d'Issaux), tables calcaires de plus en plus inclinées.

Mais même dans les zones montagneuses on trouve des massifs tabulaires. Exemple : la Pierre-Saint-Martin, nantie d'un entablement calcaire incliné vers le nord-est, non plissé dans sa disposition générale et cependant bien affecté dans le détail par le plissement pyrénéen. Au demeurant, la Pierre se poursuit en continuité géologique vers l'est jusqu'au massif de l'Iseve, via la forêt d'Issaux, par des calcaires de plus en plus inclinés vers le nord jusqu'à devenir subverticaux (fig5).

c- Karst perché, karst barré

Il ne s'agit pas d'énumérer toutes les formes de karsts liées aux différentes attitudes des formations calcaires. Pour la suite de ce cours succinct on se contentera de trois types représentant l'essentiel des karsts de notre région.

Dans le karst perché (fig.6), la formation calcaire (tabulaire ou plissée) repose sur une semelle imperméable pentée dont le point le plus bas, point de confluence et d'émergence des eaux souterraines s'écoulant à la surface, est situé bien au dessus de la vallée ou de la plaine attenante. L'exutoire est donc perché (cascade à la sortie).

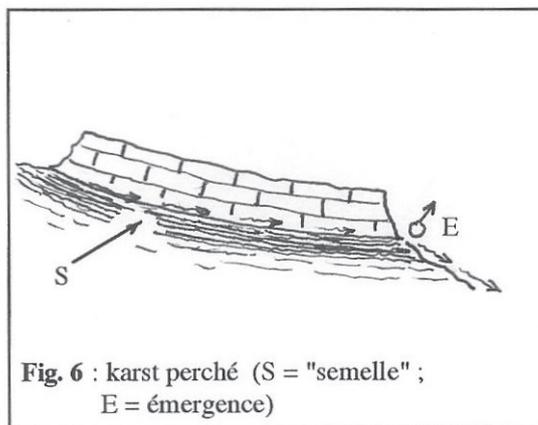


Fig. 6 : karst perché (S = "semelle" ; E = émergence)

Dans le karst barré (fig.7), la formation carbonatée est enracinée plus ou moins profondément et barrée du côté où convergent les eaux souterraines par une formation imperméable formant un barrage. L'exutoire principal ce type de karst est situé au niveau d'une échancrure ou du point le plus bas de ce barrage (Capbis, Mélat-Bétharram).

Alors que le karst perché n'a pas (ou très peu) de zone noyée, le karst barré peut être pourvu d'une zone noyée importante : toute la partie du calcaire située sous le niveau de la source principale est saturée d'eau.

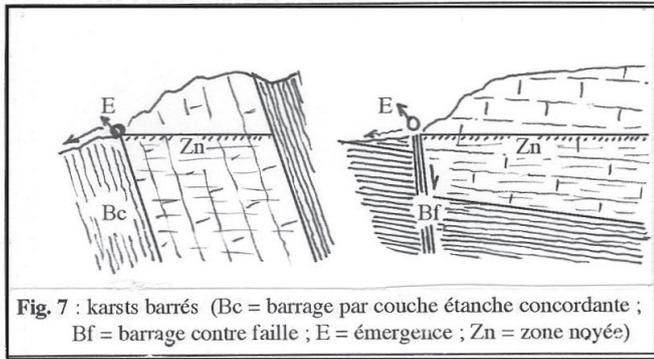


Fig. 7 : karsts barrés (Bc = barrage par couche étanche concordante ; Bf = barrage contre faille ; E = émergence ; Zn = zone noyée)

Un troisième type est représenté par les grandes barres calcaires traversées en cluses par les vallées d'Ossau et d'Aspe (exutoire au niveau des vallées : Trou des Fées au pont d'Esquit, Oasis près de Béon en vallée d'Ossau). C'est en quelque sorte une variante du karst barré avec, comme ce dernier, une zone noyée conséquente.

Les Arres d'Annie constituent essentiellement un karst perché: rivières coulant sur une semelle de terrains primaires imperméables. En son extrême aval, ce karst est barré et possède une petite zone noyée légèrement rehaussée artificiellement par le barrage de Sainte-Engrâce.

Le synclinal du Jaout se partage entre deux types de karst: l'un perché coulant vers l'est, vers la source d'Aygue Blanche dominant le haut de la vallée de l'Ouzom, l'autre correspondant au troisième type, coulant vers l'Ouest, vers les sources de Béon et d'Oasis qui sourdent au niveau de la cluse en vallée d'Ossau.

Chapitre 4 : LES VOIES DU CHEMINEMENT DE L'EAU: DISCONTINUITÉS DANS UN MASSIF CALCAIRE.

a- Perméabilité «en grand».

Dans la plupart des cas, les formations carbonatées sont imperméables dans leur masse. Quelques calcaires et dolomies font exception, présentant une perméabilité dite «intergranulaire» ou «intercrystalline»(fig.1). Nous n'en parlerons pas ici: ils sont peu représentés dans les massifs carbonatés qui font nos terrains d'exploration privilégiés. (Note: le sable présente une perméabilité intergranulaire).

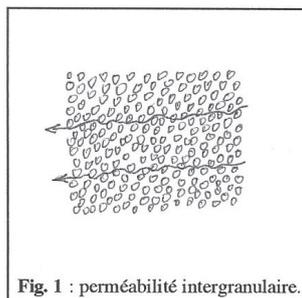


Fig. 1 : perméabilité intergranulaire.

Donc, pour que l'eau puisse s'infiltrer et circuler au sein d'un massif carbonaté au point d'en faire un karst, il faut un réseau de voies de pénétration interconnectées, faites d'un assortiment de discontinuités affectant la masse rocheuse : joints de strates, fissures, fractures, diaclases, failles...Par opposition à la perméabilité intergranulaire que l'on peut qualifier de perméabilité «en petit». On parle dans ce cas d'un réseau de discontinuités (ou réseau de fissures ou de fractures),qui confère une «perméabilité en grand»(fig.2).

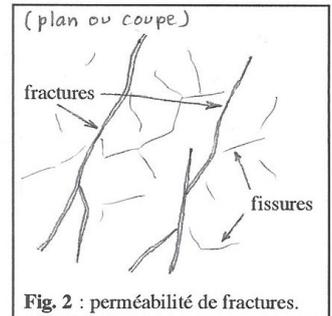


Fig. 2 : perméabilité de fractures.

b- Joints de strates et fissuration précoce.

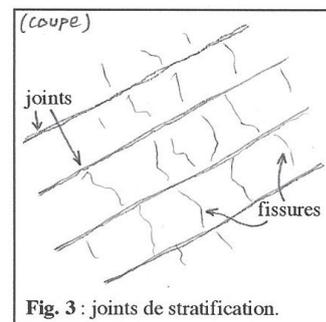


Fig. 3 : joints de stratification.

Les joints de strates (ou de stratification-fig.3) sont les interruptions entre bancs, ou limites de bancs. Chaque banc correspond généralement à un même «évènement» de sédimentation ou de dépôt. Chaque joint intermédiaire souligne un arrêt momentané du phénomène.

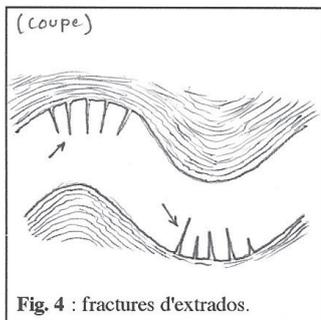
Durant la consolidation du sédiment, des fissures peuvent apparaître au sein des bancs, comme dans un ciment mal dosé. Ce sont le plus souvent des fissures de retrait. Parfois, des mouvements précoces affectant la jeune roche sédimentaire peuvent y générer des fractures.

La différence entre fissures et fractures est une question qualitative d'échelle laissée à l'appréciation de l'analyste. Mais un réseau de fractures est a priori plus grossier, et plus ouvert à l'écoulement qu'un réseau de fissures.

c- Discontinuités d'origine tectonique.

La tectonique est à la fois l'étude des déformations des roches de l'écorce terrestre (susceptibles d'aboutir à la formation de chaînes de montagnes) et l'ensemble des phénomènes et mécanismes provoquant ces déformations (voir «tectonique des plaques» et dérive des continents, souvent à l'honneur à la télé).

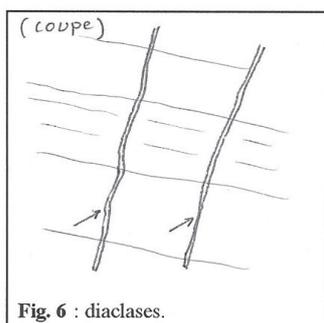
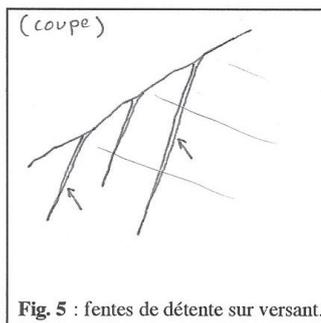
Au sein d'un massif rocheux soumis à de fortes contraintes (compression, plissement...) des fissures et des fractures apparaissent, par exemple dans l'axe des plis (fractures dites d'extrados-fig.4).



Ailleurs, au sein d'une formation rocheuse portée en altitude par la surrection du massif et libérée par l'érosion d'une ancienne couverture pesante, des fentes ou diaclases de détente ou de décompression peuvent s'ouvrir, en particulier sur

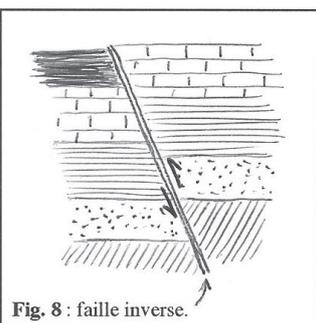
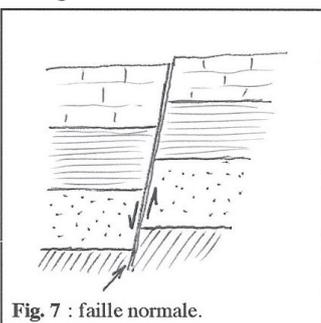
les versants abrupts (fig.5).

Par définition, une diaclase est une grande fracture au niveau de laquelle les deux compartiments de roche qu'elle sépare ne se sont pas déplacés l'un par rapport à l'autre suivant ce plan de rupture (fig.6).

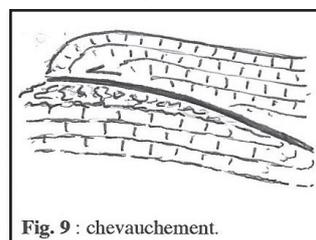


En revanche, une faille correspond à une cassure suivant laquelle il y a eu un déplacement relatif entre les deux compartiments. On distingue:

- Les failles normales dues à un mouvement d'expansion, de distension, d'étirement : l'un des compartiments est effondré par rapport à l'autre (fig.7).
- Les failles inverses ou chevauchantes dues à un mouvement de compression, l'un des compartiments étant en quelque sorte poussé sur son voisin (fig.8).

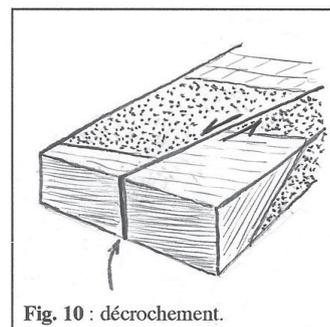


Une faille chevauchante faiblement inclinée par rapport à l'horizontale est qualifiée de chevauchement (fig.9). Dans certains cas, le déplacement du compartiment chevauchant peut atteindre des centaines de mètres, voire des dizaines de kilomètres. On parle alors de charriage (c'est le cas du Lakhoura à la Pierre-Saint-Martin).



Une faille décrochante ou coulissante (qualifiée aussi de décrochement) est une cassure subverticale par rapport au plan dans lequel le sens du déplacement relatif des compartiments opposés avoisine l'horizontale (fig.10)

On qualifie souvent un chevauchement ou une faille d'accident tectonique ou de contact anormal.

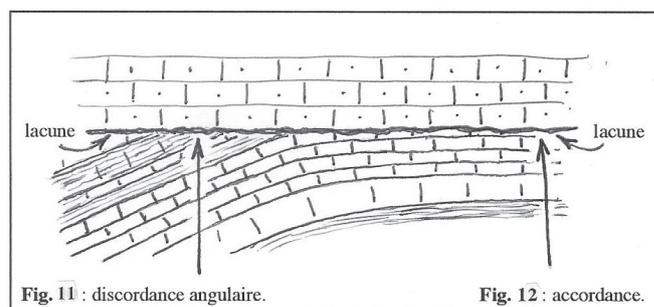


d- Discordances, accordances.

Lorsqu'une formation de roches sédimentaires repose sur un ensemble plus ancien en faisant un angle avec les couches de ce dernier, cela signifie que l'ensemble ancien a subi une déformation et a été partiellement érodé avant le dépôt de la formation sus-jacente: on parle de discordance stratigraphique, ou de discordance angulaire entre les deux (fig.11). Une discordance angulaire peut être discrète au point de n'être identifiable qu'à la suite d'un levé géologique précis.

Quoiqu'il en soit, lorsqu'il y a discordance, c'est qu'une partie de la succession sédimentaire a été enlevée par l'érosion. On parle de lacune (fig.11 et 12).

En certains endroits, dans un contexte régional de discordance stratigraphique, il arrive que localement, parfois sur quelques centaines de mètres carrés, les



deux ensembles se trouvent en contact «parallèle». On dit alors qu'il y a accordance, attitude locale trompeuse qui peut masquer à l'examen hâtif l'existence effective d'une lacune (fig.12).

Un peu de karsto pour les spéléos - Chapitre 5 et 6

Jacques Bauer

Chapitre 5 - LE RÉSERVOIR KARSTIQUE : SA DUALITÉ ET SON ORGANISATION.

a- Le réservoir de fissures ou de fractures : première condition à l'établissement d'un karst

A l'origine, les discontinuités au sein des ensembles carbonatés forment un réseau de fissures et de fractures. C'est cet état «intime» du massif qui rend la roche vulnérable à l'infiltration d'une eau corrosive (voir plus loin).

Ainsi le massif calcaire se comporte un peu comme une éponge rigide, incompressible bien sûr, mais laquelle ayant la capacité à retenir et emmagasiner de l'eau. On peut donc parler de réservoir de fissures ou de fractures, que l'on dit en conséquence «capacitif». Pour un massif dont le volume global est 1 km^3 (soit un milliard de m^3), un réseau de fractures totalisant 2% de ce même volume (ce qui est commun) correspond à 20 millions de m^3 vides, ou de réserve en eau s'il est saturé.

b- Du réservoir de fractures au réservoir karstique: l'action interne de l'érosion

Si l'eau contenu dans le réservoir fissuré reste immobile, rien ne se passe et le réservoir fissuré n'évolue pas. Si l'eau est mise en mouvement et se renouvelle sans cesse (suivant un processus que nous analyserons au chapitre n°6) et si d'autre part elle est agressive (corrosive) vis à vis du milieu qu'elle pénètre, certaines discontinuités (joints de strates, fractures, failles, et même surfaces de discordance) seront sélectionnées d'une façon ou d'une autre pour être élargie par l'érosion en drains spacieux.

L'action de l'érosion à l'intérieur du massif est la troisième condition à l'établissement d'un karst (si l'on peut considérer que, comme nous le verrons au chapitre 6, l'existence d'un «moteur» pour la mise en mouvement de l'eau est l'indispensable seconde condition).

Supposons donc l'eau en mouvement continu et sans cesse renouvelée à travers le système de fractures.

c- Érosion chimique.

Le processus de karstification est lié à la solubilité du calcaire ou de la dolomie au contact d'eaux chargées en dioxyde de carbone (le gaz carbonique). Ce dioxyde de carbone peut être puisé dans l'atmosphère (qui peut en contenir cent fois plus, du fait de la décomposition

de la matière organique). L'eau chargée de dioxyde de carbone tend à dissoudre le carbonate au contact des discontinuités qu'elle pénètre, élargissant progressivement ses vides pour en faire des petites cavernes, des petits conduits où le liquide pourra circuler plus librement (fig.1).

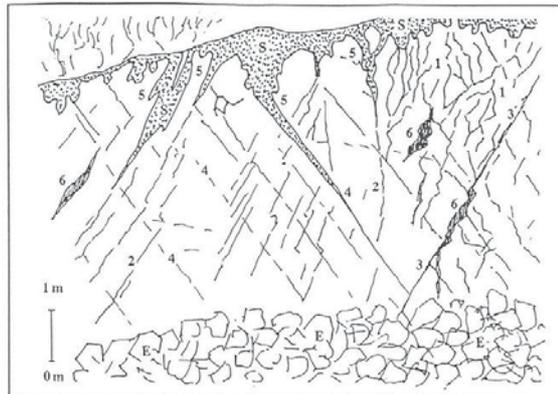


Fig. 1 : discontinuités dans un massif calcaire (réseau de fissures et de fentes).

(D'après un exemple réel : la carrière d'Asson, Pyrénées Atlantiques).

- 1 : fissures (en haut à droite).
- 2 : diaclasses.
- 3 : faille (remarquer le décalage des joints de stratification (4)).
- 4 : joints de stratification.
- 5 : fentes élargies par la dissolution, colmatées par le sol.
- 6 : petites cavités de dissolution plus ou moins colmatées.
- S : sol végétal, E : éboulis

Il s'agit là d'un processus d'érosion essentiellement chimique, ou processus de corrosion.

d- Erosion mécanique

Mais une fois les conduits suffisamment élargis, une eau plus abondante peut circuler, charriant surtout, en régime de crue, des particules insolubles dures (sables, graviers,...). Celles-ci exerceront sur les parois des conduits une action abrasive, mécanique, qui s'ajoutera ou même supplantera l'action chimique : on parle d'érosion mécanique.

e- La dualité et l'organisation du réservoir karstique : hiérarchisation des conduits.

En définitive, le réservoir de fractures se trouve pourvu d'un ensemble de drains spacieux interconnectés susceptibles, à la manière d'une tuyauterie organisée, de recueillir l'eau en s'écoulant des fractures pour la canaliser vers l'exutoire.

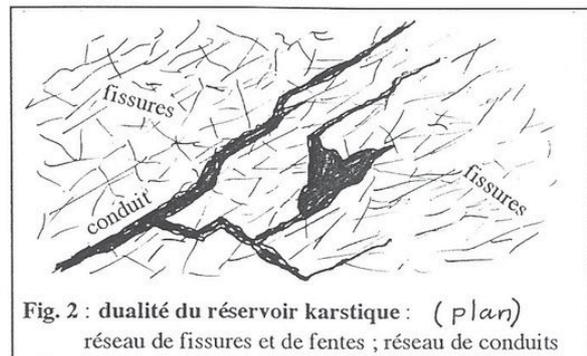


Fig. 2 : dualité du réservoir karstique : (plan) réseau de fissures et de fentes ; réseau de conduits

Le réservoir karstique comprend donc deux sortes de vides : les étroites discontinuités formant réseau de fissures et de fractures d'une part (formant « l'éponge rigide ») et d'autres part, un système ou réseau de conduits ou de drains, que nous appellerons « réseau spéléologique » (ou réseau de cavernes). Il existe donc une dualité du système de vides au sein d'un réservoir karstique (fig.2).

Mais si le réseau de fractures est capacitif, en ce qui concerne les réserves en eau, le réseau de conduit, dont le volume cumulé ne fait que quelque % du volume cumulé des fissures et fractures, est qualifié quant à lui de « transmissif », ne faisant guère que canaliser vers l'exutoire l'eau collectée.

f- Hiérarchisation des conduits .

L'installation d'un réseau spéléologique n'a rien d'anarchique: elle obéit à un principe de base selon lesquels les discontinuités les plus propices à l'écoulement souterrain sont sélectionnées: ce sont à priori les plus ouvertes, mais surtout celles se trouvant les mieux orientées vers le lit théorique du courant

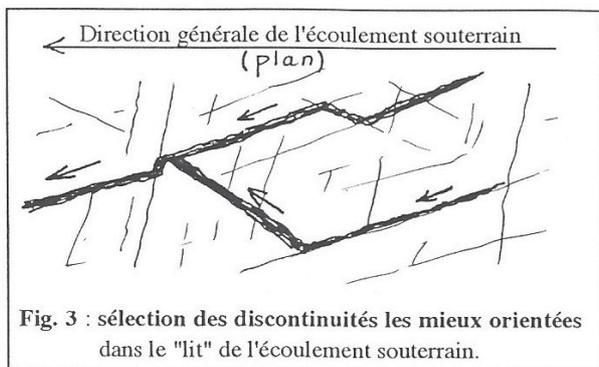


Fig. 3 : sélection des discontinuités les mieux orientées dans le "lit" de l'écoulement souterrain.

(fig.3) tel que le déterminent les lois de la pesanteur. Cette influence primordiale de la pesanteur, le moteur du karst, fera l'objet du chapitre 6.

Dans l'ensemble, les conduits tendent à s'agencer au

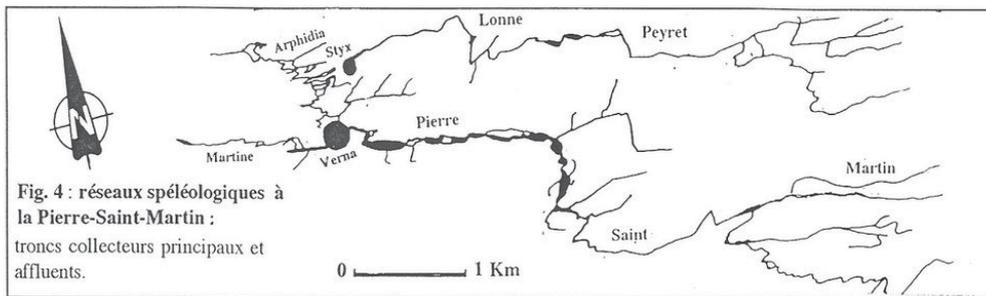


Fig. 4 : réseaux spéléologiques à la Pierre-Saint-Martin : troncs collecteurs principaux et affluents.

sein du karst un peu comme un réseau hydrographique de surface, avec un drain principal (le collecteur) aboutissant à l'exutoire et, en progressant vers les amonts, les affluents de plus en plus nombreux. Les rivières sous la Pierre Saint Martin en donne une splendide illustration (fig.4).

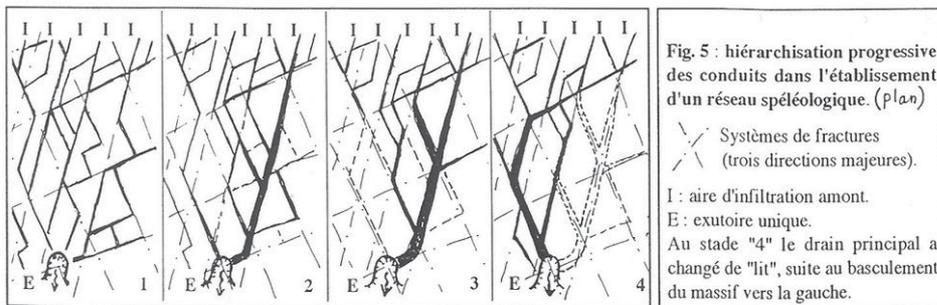


Fig. 5 : hiérarchisation progressive des conduits dans l'établissement d'un réseau spéléologique. (plan)
 X : Systèmes de fractures (trois directions majeures).
 I : aire d'infiltration amont.
 E : exutoire unique.
 Au stade "4" le drain principal a changé de "lit", suite au basculement du massif vers la gauche.

On dit que les conduits sont hiérarchisés d'amont en aval. Ils se hiérarchisent également dans le temps, au cours de l'évolution du karst, les plus actifs prennent petit à petit le pas sur les moins efficaces (fig.5).

Chapitre 6 - LE MOTEUR DU KARST : LA PESANTEUR -PENTE OU PRESSION

Trois principes oeuvrant vers un même résultat:

a- Vulnérabilité de la roche (fissuration et solubilité-notions abordés au chapitre 4 et 5)

Présence d'un vecteur (l'eau) causant une érosion d'abord purement chimique (eau+dioxyde de

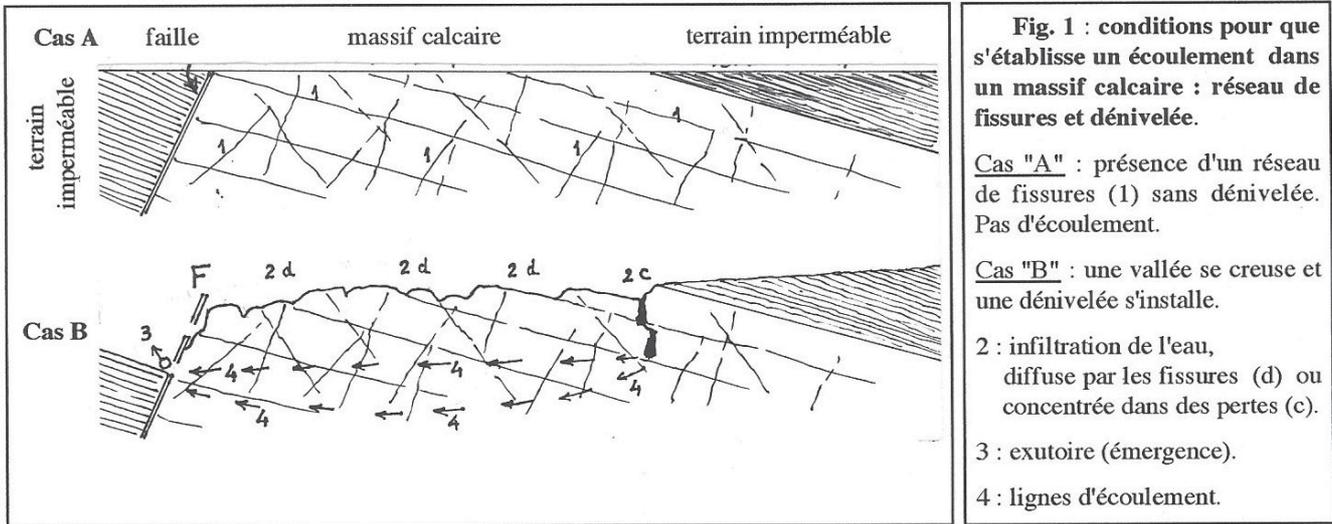
carbone) puis chimique + mécanique (notion abordé au chapitre 5). Enfin, une cause motrice (la pesanteur mise en action par une dénivelée) et dynamique (débit de l'écoulement). C'est ce troisième principe que nous allons considérer ici.

b- Force motrice: l'action de la pesanteur.

L'eau circule sous effet des forces de pesanteur. Au sein d'un massif calcaire fissuré clos de tous côtés par des formations imperméables et sans dénivelées, l'eau ne peut se mouvoir. Le contexte est celui d'un récipient horizontal. Perçons ce récipient vers la base : il se vide. Creusons une échancrure dans l'enceinte étanche du massif : l'eau fissurale se met en mouvement vers le point bas de l'entaille (fig.1).

c- Niveau de base.

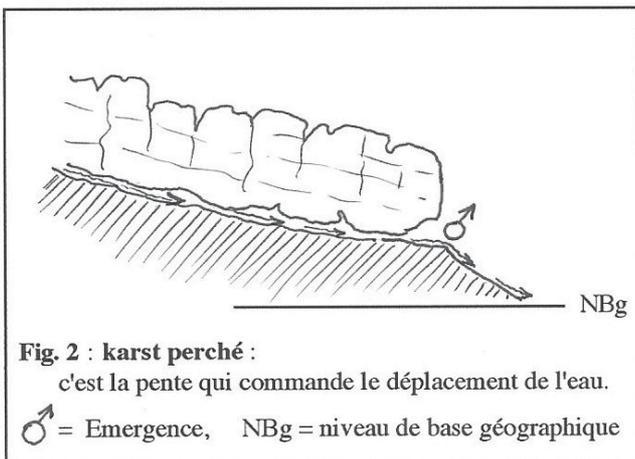
Le niveau de base le plus général est le niveau moyen des mers : c'est vers lui que coulent tous les fleuves. Dans un karst, le niveau de base est celui auquel aboutit l'écoulement souterrain. Ce niveau est défini par la cote des sources pérennes les plus basses. S'il correspond au niveau de la plaine ou d'une large vallée de faibles pentes au fonds plats, on le dit *régional* ou *géographique* (fig.3 cas des sources de Béon ou



Au sein d'un réservoir fissuré ou karstique, l'eau circule en raison de son poids, soit d'un point haut vers un point bas, soit un point de pression élevé vers un point de pression plus basse (c'est l'image du château d'eau) : le mouvement gravitaire (lié à la gravité c'est à dire la pesanteur).

d'Oasis en vallée d'Ossau). En revanche, si la source pérenne la plus basse domine de quelques mètres au moins le niveau de la plaine ou de la vallée (fig.4), on parle de niveau de base *local* ou *karstique*. C'est le cas de nombreux karsts barrés (Mélat- Bétharram).

L'exutoire d'un karst perché ne correspond pas à un niveau de base au vrai sens du terme (même karstique). C'est la vallée en contrebas qui joue ce rôle (fig.2).



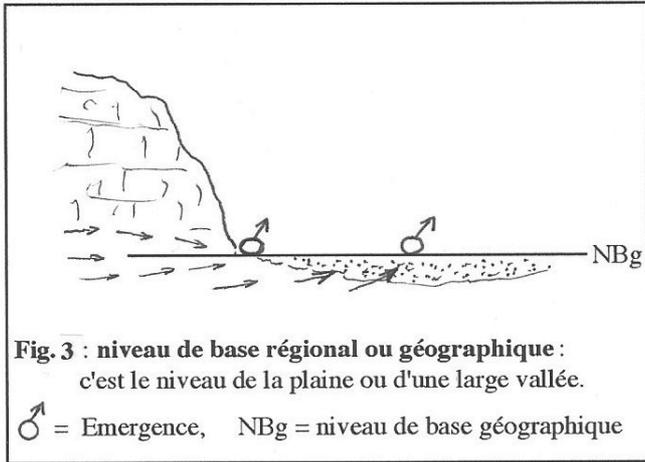
d-Pente ou pression

Nous avons déjà vu que dans un karst perché, comme dans les rivières de surface, c'est la pente du substratum étanche qui induit et contrôle le mouvement de l'eau (fig2).

Au sein de la zone noyée d'un Karst barré, on ne peut plus invoquer de pente : il faut faire appel à la pression de l'eau, tout comme dans un château d'eau. En effet, l'eau qui percole en saison pluvieuse au sein des fissures et des fractures du réservoir karstique ne peut, en raison de l'exiguïté des vides et malgré la grande transmissivité des conduits spéléologiques, s'écouler librement vers l'exutoire. Elle s'accumule en amont de celui-ci, de telle sorte que le niveau de la zone saturée d'eau (zone noyée) s'élève bien au dessus du niveau de base : le réservoir karstique se met en charge. En période de sécheresse, ces réserves continuent de s'écouler vers la source, mues par la pression de l'eau emmagasinée. Cette pression se concrétise par la hauteur du volume des réserves au dessus du niveau de base (fig.4).

D'un karst perché, c'est la pente du soubassement imperméable qui commande (fig.2). C'est le cas le plus courant des rivières de la Pierre Saint-Martin.

Dans la zone noyée d'un karst barré, l'eau s'écoule sous l'effet d'un régime de pressions que nous allons définir en faisant appel d'abord à la notion de niveau de base.



La surface de la zone noyée est matérialisée par la surface piézométrique, qui s'élève ou s'abaisse selon les mises en charge ou vidange du réservoir. La pression de l'eau est fonction de la hauteur atteinte. Lorsque la surface s'élève la pression suit et, en conséquence, le débit et la force du courant augmentent. Lorsqu'elle s'abaisse, c'est l'inverse. Si elle venait à s'abaisser au point de se confondre avec le niveau de base la pression deviendrait nulle et l'écoulement cesserait. C'est l'image du château d'eau.

e- Alimentation du karst

L'alimentation en eau du karst peut n'être due dans beaucoup de cas (Pierre St Martin - Arbailles - sauf Cent-sources -, Jaout) qu'au produit des précipitations. Celles-ci peuvent être suffisamment abondantes et bien réparties dans l'année pour que même un karst perché, sans zone noyée mais doté d'un bon réseau de fissures capacitif, puisse alimenter une source pérenne (partie Est du massif du Jaout). Dans certains karst de montagnes, les ressources sont stockées dans des centaines ou milliers de puits à neige qui restituent au compte gouttes leurs réserves au fil du printemps, de l'été et de l'automne, réussissant à joindre sans désespérer les hivers successifs (Pierre-St-Martin).

Ailleurs, le karst peut être alimenté partiellement (Betharram) ou majoritairement (Oueil du Neez près de Rébénacq) par des pertes de cours d'eau « étrangers ».

f- Importance du débit et de la dénivellée.

Débit et puissance de l'écoulement sont les facteurs essentiels de la karstification, ce qui implique une alimentation conséquente et une dénivellée importante entre la zone d'infiltration ou de mise en charge (surface piézométrique) et le niveau de base. Les agents chimiques ou mécaniques de l'érosion ont un rôle indispensable mais subordonné. Ils sont des outils.

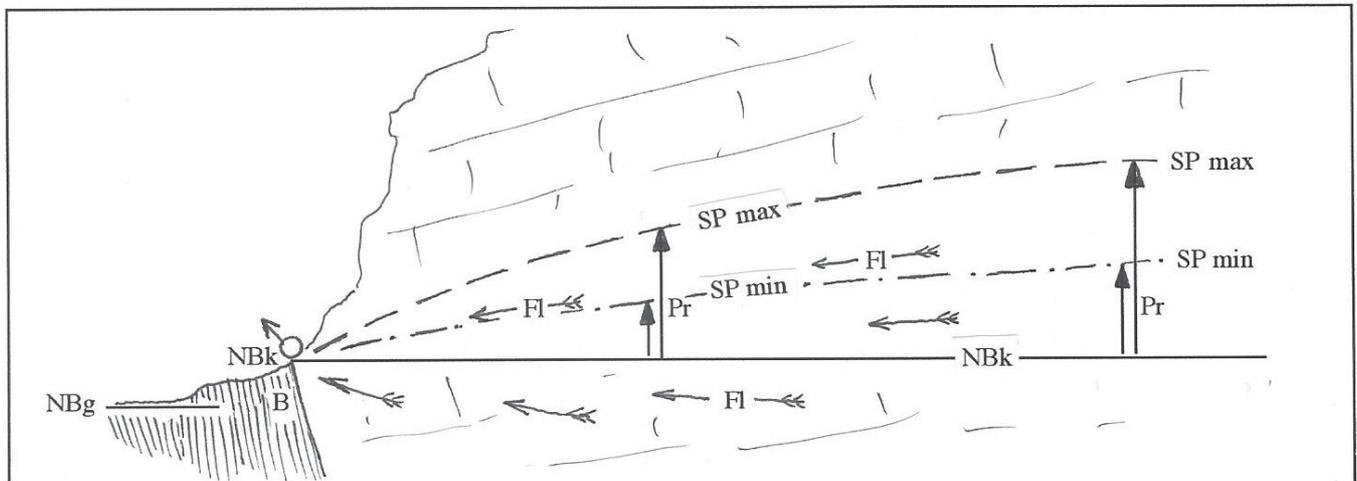


Fig. 4 : écoulement de l'eau au sein d'une zone noyée (exemple d'un karst barré) :

B = barrage par formation étanche, NBg = niveau de base géographique, NBk = niveau de base karstique.
SP = surface piézométrique (SP max = position haute en période pluvieuse, SP min = position basse en période sèche).
Note : la SP, de position plus ou moins élevée à l'intérieur du massif, se raccorde vers l'aval au niveau de base (NBk).
♂ = émergence, ↑ Pr = Pression de l'eau au sein de la zone noyée, illustrée par la hauteur de l'eau au dessus de NBk (= longueur des flèches). ← Fl = lignes de flux ou d'écoulement de l'eau. On remarquera que dans la partie profonde de la zone noyée le courant tend à remonter vers l'exutoire, ce que l'on note dans les émergences "vaclusiennes".

Un peu de karsto pour les spéléos : chapitre 7 et 8

Jacques Bauer

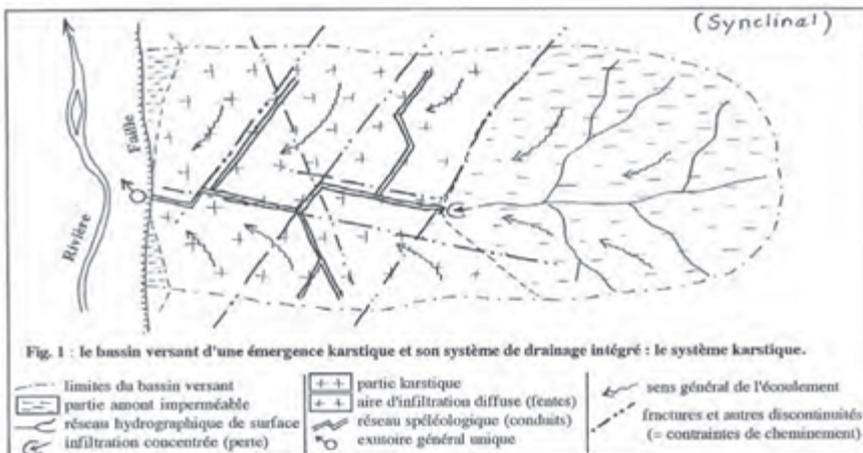
Chapitre 7 - LE SYSTEME KARSTIQUE : UNITÉ DE DRAINAGE AU SEIN D'UN KARST

a- Le bassin versant aire d'alimentation

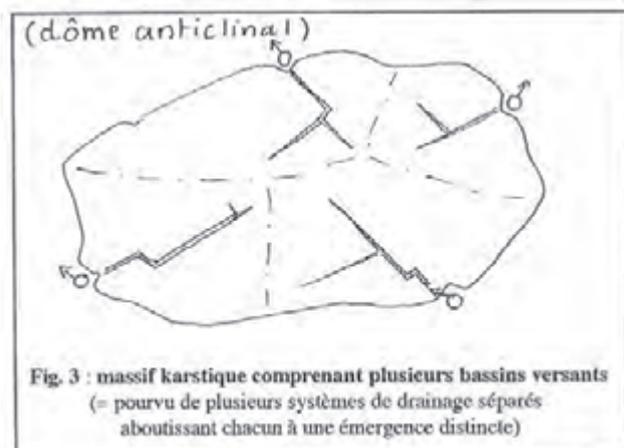
Nous avons vu (chap.6) qu'au sein d'un karst l'eau circule sous l'action de la pesanteur, soit le long d'une pente, comme tout cours d'eau de surface, soit sous l'effet d'un régime organisé de pressions. Dans tous les cas l'eau se meut depuis l'aire d'alimentation ou de mise en charge, jusqu'à un exutoire (généralement unique - et comparable à un bec verseur - pour un système de drainage donné).

La zone d'alimentation est vaste et correspond en principe à toute la surface du karst soumise à l'infiltration des précipitations :

- Si les infiltrations alimentent (en partie seulement) certains karsts par l'enfouissement local (perte) partiel ou total d'un cours d'eau de surface, on parle dans ce cas d'infiltration concentrée (fig. 1).



- Si cette infiltration concerne l'ensemble des fentes de surface, elle est dite diffuse (fig. 2).



b- Système karstique unité de drainage

A une émergence donnée, ou à un exutoire complexe jouant le rôle de « bec verseur » unique, correspond un même système de drainage général intéressant l'ensemble du bassin versant (fig. 1). Un même karst peut cependant comprendre plusieurs bassins versants, donc plusieurs systèmes de drainage séparés, connectés chacun à un exutoire (fig. 3). Le massif des Arbaillies illustre cette situation, d'où le grand nombre de sources karstiques réparties sur son pourtour.

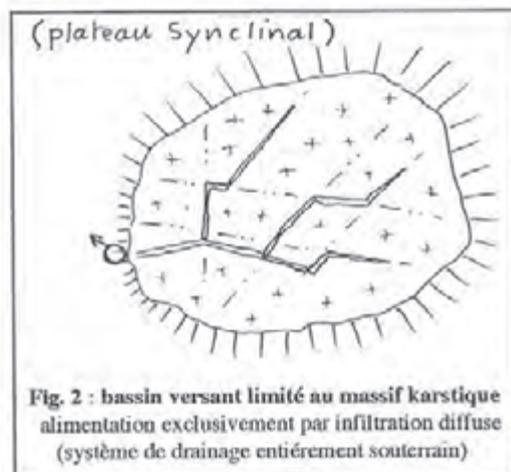
Un système karstique se définit comme l'unité de drainage d'un bassin versant alimentant une même source karstique. Ce système comprend :

- 1) L'ensemble des fissures et des fentes favorisant l'infiltration des précipitations;
- 2) L'ensemble des conduits spéléologiques actifs ou semi-actifs drainant les fissures et les fentes vers un même exutoire;
- 3) Eventuellement le réseau hydrographique de surface intégré au même bassin versant (fig. 1).

Par exemple, la partie Ouest du karst de la Pierre-Saint-Martin comprend deux systèmes karstiques majeurs : le système Saint-Vincent aboutissant à l'émergence Bentia, le système Saint-George aboutissant à Illamina.

Donc, autant de systèmes karstiques que de sources hydrologiquement distinctes.

L'inventaire et l'analyse du fonctionnement des émergences karstiques intégrées à un massif donné sont donc une indication du nombre et de la variété des unités de drainage du système karstique que l'on peut envisager. Couplées



avec une certaine connaissance du contexte géologique (carte B.R.G.M. au 1 : 50 000), ces données peuvent même conduire à une première esquisse des contours des bassins versants souterrains et à mieux appréhender en conséquence les résultats de colorations.

c- Réseau spéléologique

On ne doit pas confondre système karstique et réseau spéléologique. Le second se définit comme l'ensemble des conduits spéléologiques interconnectés (puits et galeries) compris le plus souvent -mais pas nécessairement- dans les limites d'une même unité de drainage.

d- Retour au réservoir karstique

Après révision des chapitres 4 (discontinuité dans un massif), 5 (nature du réservoir karstique) et 6 (moteur du karst), et avec un brin de connaissance du cadre géologique, on peut se faire une première idée de l'orientation (possible) des conduits actuellement actifs. Je précise : « actuellement » car on doit tenir compte du contexte géographique actuel. Il est très difficile de faire des suppositions sur les géographies passées partiellement désorganisées par l'érosion. D'abord, il ne faut jamais oublier que c'est le moteur qui

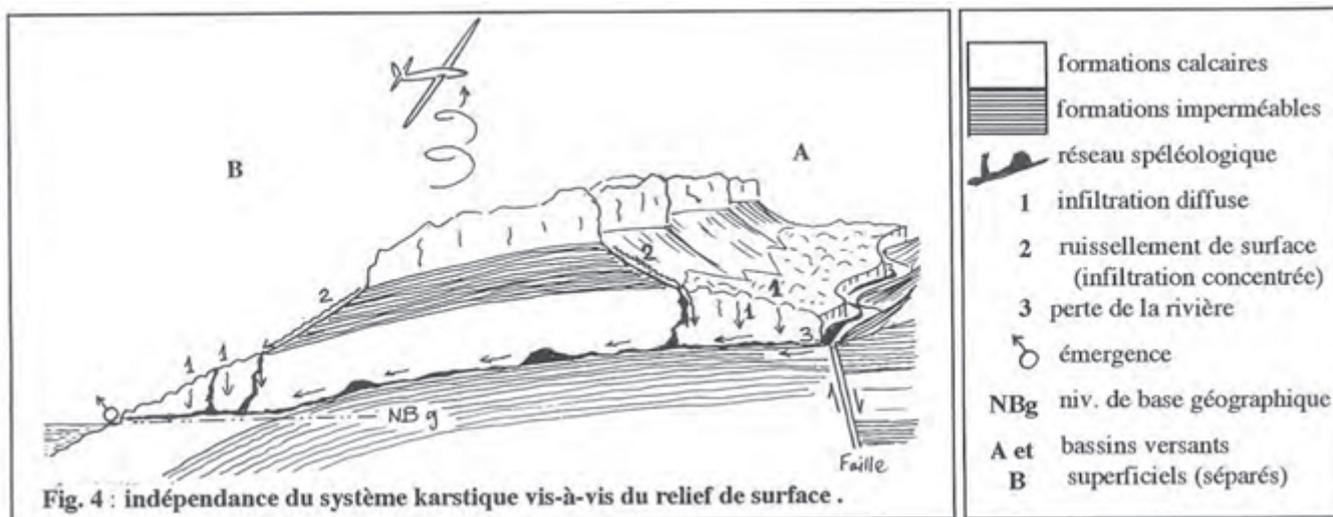
commande. L'orientation de la fracturation vient après !

- Les drains actifs ou récents suivent de préférence les discontinuités contemporaines les mieux orientées par rapport au sens de l'écoulement induit par la pesanteur (chap. 5, Fig. 3).
- Suivant le contexte géographique et la géologie, les forces de pesanteur s'exercent soit par l'intermédiaire d'une pente (hors zone noyée), soit par un régime de pression (en zone noyée). Cette question a été abordée au chapitre 6.
- En résumé l'écoulement est orienté par les forces de pesanteur mais canalisé par les discontinuités les mieux orientées. L'eau cherche sa voie en suivant d'aussi près que possible la voie programmée par la gravité, tout en se conformant aux contraintes de cheminement imposées par l'agencement des discontinuités.

Mais attention :

La disposition du bassin versant souterrain n'a le plus souvent aucun rapport avec le relief de surface (fig 4).

La connaissance de ces principes permet parfois de deviner l'organisation interne d'un karst.



Chapitre 8 - EVOLUTION ET ADAPTATION DU RÉSEAU SPÉLÉOLOGIQUE

a- Une géographie changeante.

Les paysages changent. Là où il y eut jadis la mer se dresse aujourd'hui la montagne. Mais ces changements aux résultats ultimes, parfois drastiques - de la mer à la montagne puis retour à la mer - qui, pour s'achever, se déroulent sur des dizaines, voire des centaines de millions d'années, se font par phases successives plus courtes étalonnées plutôt en milliers d'années.

A l'échelle des temps géologiques, le karst est un milieu extrêmement souple vis-à-vis des modifications de la géographie locale, celles-ci pouvant avoir des causes géologiques et / ou climatiques.

Les phénomènes géologiques ayant le plus d'impact sur le karst sont ceux qui entraînent des soulèvements ou des abaissements de compartiment de l'écorce

terrestre. Les changements climatiques peuvent agir quant à eux sur le creusement ou le remblaiement des vallées (alluvions ou glaciers). Ces processus de surrection ou d'affaissement, de creusement ou de comblement induisent des variations relatives du niveau de base géographique.

Les changements du niveau de base sont entrecoupés de périodes de stabilité plus ou moins longues au cours desquelles s'opère une réadaptation du système de drainage karstique qui tend à se raccorder au nouveau niveau. Une période de stabilité longue de quelques dizaines de milliers d'années seulement suffit en principe pour que s'établisse à ce niveau un nouveau réseau spéléologique. Ainsi doué d'une capacité d'adaptation rapide, le karst est en mesure d'enregistrer les mouvements géologiques ou les fluctuations climatiques qui ont affecté sa région au cours des âges de la Terre.

b- Conséquences immédiates des variations du niveau de base (fig.1).

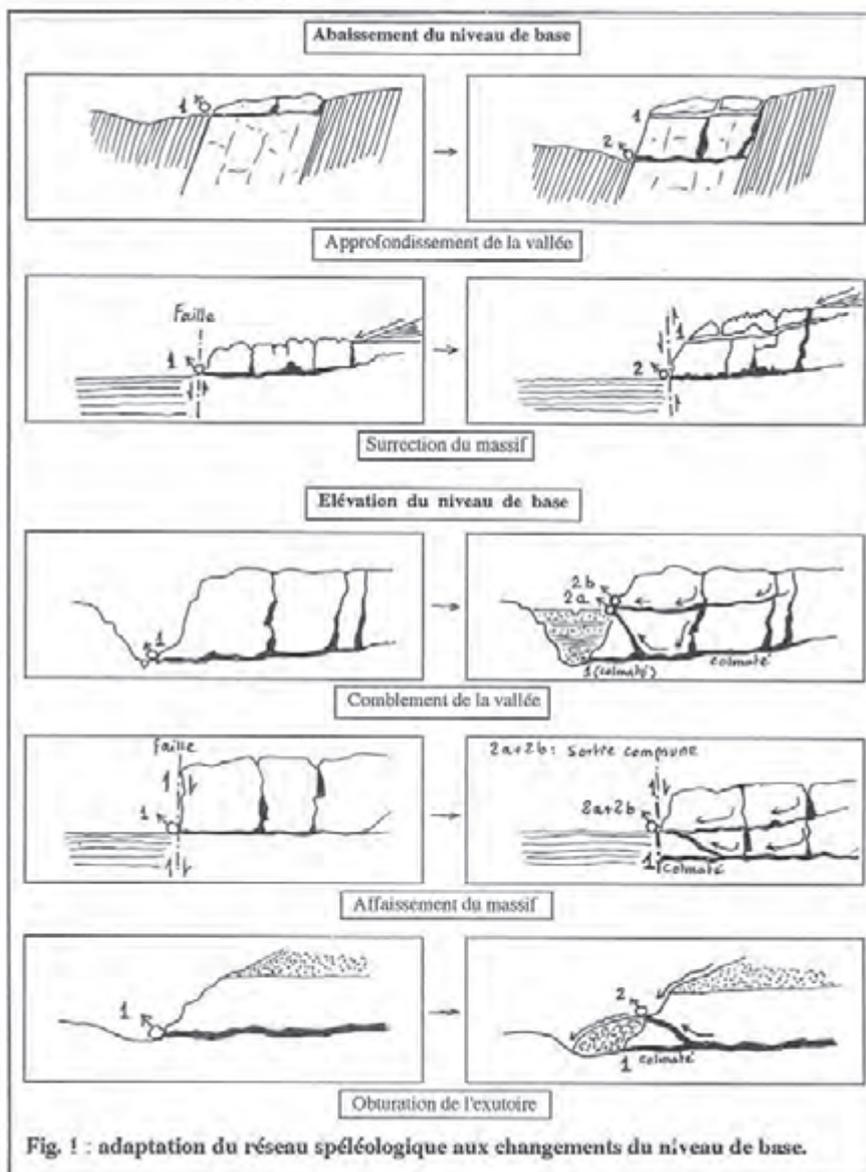


Fig. 1 : adaptation du réseau spéléologique aux changements du niveau de base.

• Abaissement relatif :

Enfouissement du réseau spéléologique qui, pour rester raccordé au niveau de base, doit se reconstituer plus bas, abandonnant un étage désormais «perché».

• Elévation relative :

Colmatage au moins partiel des anciens conduits, qui passent dans la zone noyée. Un nouveau système de drainage s'établit au-dessus. Certaines pertes anciennes peuvent se mettre à fonctionner en émergences remontantes.

Le résultat d'adaptations successives est le développement de réseaux spéléologiques étagés dont l'un des plus classiques est le réseau Trombe (massif d'Arbas, Haute-Garonne). De tels réseaux sont dits «polyphasés» car ils sont l'aboutissement de plusieurs phases distinctes de creusement correspondant chacune à un niveau de base particulier. Ces réseaux polyphasés peuvent redevenir actifs momentanément dans les niveaux supérieurs à l'occasion de crues exceptionnelles (fig. 3).

• Emergences «fossiles» perchées :

Les exutoires «fossiles» aujourd'hui perchés bien au-dessus du niveau de la vallée soulignent donc d'anciennes positions relatives du niveau de base. Ils revêtent de ce fait une importance primordiale dans l'analyse de l'évolution du karst. En conséquence, ils ne doivent jamais être négligés dans les inventaires de cavités et leur cote doit être relevée systématiquement avec précision, même lorsqu'ils sont impénétrables. En effet, certains conduits spacieux peuvent juste avant l'émergence «éclater» en ramifications de faible section, sortant au jour sous la forme de «griffons» étroits multiples.

Les étagements actuels de ces émergences «fossiles» peuvent coïncider parfois avec des surfaces géographiques anciennes d'érosion qui leur sont contemporaines.

c- Diffluences (fig.2)

Lors d'une opération de traçage, il n'est pas rare de voir sortir le colorant en plusieurs endroits distants de plusieurs centaines ou milliers de mètres. On dit qu'il y a eu difffluence. Ce terme désigne un processus d'évolution et d'adaptation plus local du réseau spéléologique. Une difffluence résulte en principe d'une capture : la perte partielle d'une rivière est un cas classique. Les captures souterraines sont souvent difficiles à

Un peu de karsto pour les spéléos

Jacques Bauer

Chapitre 9 - LA STRUCTURE INTERNE DU KARST : L'EXEMPLE D'UN KARST BARRÉ

Ce neuvième chapitre est à la fois un récapitulatif des chapitres précédents et la synthèse sommaire de ce qu'a déjà observé un bon nombre de spéléologues pratiquant régulièrement leur activité dans des contextes géologiques et karstologiques variés.

L'exemple du karst barré de Piémont a été choisi parce qu'il est, en principe, le plus complet, comportant tous les étages du karst, y compris la zone noyée importante généralement absente dans un karst perché (fig.1).

plus ou moins développés :

a- l'épikarst

Il est l'enveloppe supérieure de l'aquifère karstique, immédiatement sous-jacente au lapiaz. Il est caractérisé, à l'approche de la surface, par un dense réseau de fentes ouvertes résultant de la détente tectonique d'infiltration. Libérées par l'érosion de la masse rocheuse qui les tenait relativement fermées, les fissures "éclatent" à l'air libre et s'ouvrent en nombre..

L'épikarst, épais parfois de plusieurs mètres, peut donc constituer un aquifère perché. C'est à travers lui que

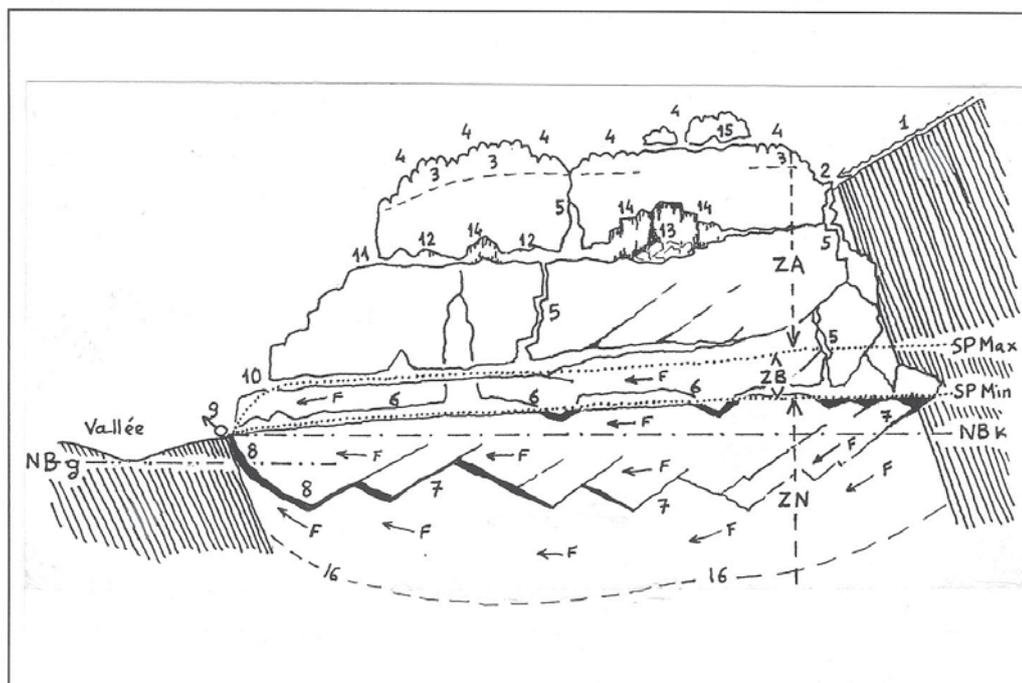
transite l'eau de percolation. S'il existe un fort contraste entre la densité de son réseau de fentes et de celle du réseau de fissures du réservoir karstique profond, l'épikarst peut retenir au sein de son aquifère d'importantes réserves d'eau dont l'infiltration, ainsi retardée, peut s'étaler sur de longues périodes.

b- La zone aérée, ou "non saturée" ou "vadose"

Elle est celle des galeries, des "méandres" et des puits à la faveur desquels l'eau s'infiltré plus ou moins verticalement. C'est, avec l'épikarst qui la coiffe, la zone d'infiltration ou de transfert vertical (de l'eau infiltrée). C'est aussi la zone de l'écoulement dit libre, directement régie par la gravité, c'est à dire par la pente du conduit.

C'est dans cette zone que le réservoir (ou aquifère) karstique exprime avec la plus de netteté sa dualité

"réseau de fissures - réseau de conduits". Car si le transfert vertical de l'eau se fait bien en milieu aéré dans les conduits et les fractures les plus ouvertes, la percolation dans les fissures les plus fines se fait au sein d'un réseau (ou "chevelu") saturé d'eau : l'eau suinte



1: ruissellement de surface; 2: perte ou infiltration concentrée;	aquifère karstique	ZA: zone aérée
3: lapiaz et épikarst (zone de fentes superficielle);	terrains imperméables	ZB: zone de battement de nappe
4: infiltration diffuse; 5: puits et méandres;	NBg: niveau de base régional ou géographique	ZN: zone noyée
6: conduit situé près de la surface piézométrique (alternativement noyé et dénoyé);	NBk: niveau de base karstique (spécifique à un karst donné)	sens de l'écoulement (F = flux)
7: conduit noyé; 8: conduit vauclusien;	SP: surface piézométrique (Max = haute; Min = basse)	
9: émergence active; 10: exutoire de crue;		
11: exutoire inactif; 12: conduit perché inactif;		
13: salle d'effondrement; 14: concrétionnement;		
15: galerie "fossile" tronquée par l'érosion de surface;		
16: limite d'action de la karstification.		

Fig. 1 : coupe synthétique très schématique d'un karst barré (qui comprendrait idéalement tous les éléments du karst).

S'il existe une dénivelée suffisante entre le sommet du massif calcaire et le niveau de base défini par l'exutoire pérenne le plus bas, la structure interne du réservoir (ou aquifère) karstique comprend normalement trois zones superposées séparées par des espaces de transition

parfois de partout dans certaines galeries aux parois éternellement humides.

Dans la zone aérée, l'eau en écoulement "libre" ouvre parfois à la faveur de fractures des passages rectilignes plus ou moins pentus, souvent étroits et hauts, qualifiés à tort par certains spéléologues de "méandres". Il faut se souvenir qu'un vrai méandre se caractérise d'abord, tout comme dans les rivières de surface, par la sinuosité de son cours.

La zone aérée peut être épaisse de plusieurs centaines de mètres. Elle est alors fréquemment le cadre de galeries horizontales perchées, étages inactifs marquant d'anciennes positions du niveau de base (voir chapitre 8, Info EFS n°56).

c- La zone noyée, ou saturée, ou phréatique

Sa limite supérieure est définie par la surface piézométrique basse ou d'étiage (chapitre 6, Info EFS n°55), est le domaine des "conduites forcées" par lesquelles l'eau est drainée vers l'exutoire. C'est la zone de transfert horizontal dite zone de l'écoulement forcé directement régie par l'organisation des pressions entre l'aire de mise en charge et l'exutoire (chapitre 6 et 7, Info EFS n°55 et 56).

Dans ce milieu entièrement saturé d'eau, l'attitude des drains peut être quelconque: les "galeries remontantes" (dans le sens du courant) ne sont pas rares, à l'image de la conduite d'adduction d'eau qui remonte tous les étages d'un immeuble sous la pression existant au départ dans le château d'eau. Dans un karst, une émergence branchée sur un conduit remontant des profondeurs est dite vaclusienne, du nom de la Fontaine de Vaucluse. La limite inférieure de la zone noyée est le plus souvent inconnue. On la suppose marquée par une transition très progressive vers le réservoir fissuré non karstique.

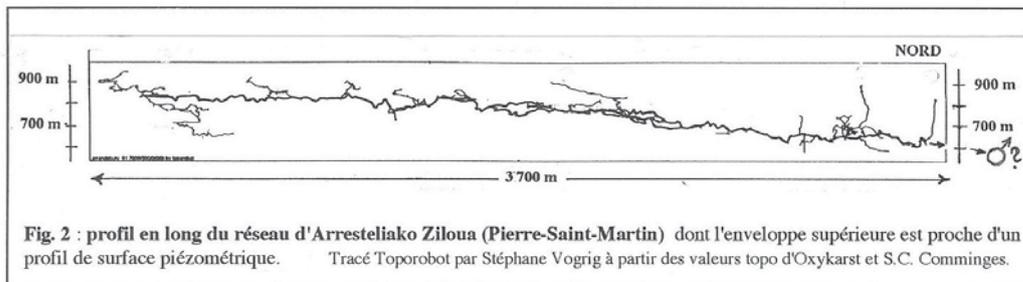
d- La zone de battement de nappe, dite aussi zone "épinoyée"

Elle est l'intervalle au sein duquel l'écoulement est alternativement libre ou forcé : un espace compris entre les positions de crue et la position d'étiage de la surface piézométrique (chapitre 6, Info EFS n°55). C'est l'étage des grandes galeries horizontales semi-actives (actives seulement en crue).

Le profil en long d'une grande galerie horizontale se conforme à peu près au profil de la surface piézométrique, descendant doucement en direction de l'exutoire. Au-dessus de la galerie semi-active, un conduit perché, marqué d'une ancienne position de

base, peut fonctionner à l'occasion en émissaire de crue.

Ces grandes galeries horizontales sont le "pain" quotidien des spéléologues caussenards mais il en existe aussi dans les karsts de montagne (Pène Blanche dans le massif d'Arbas, Haute Garonne (fig.3 du chapitre 8, Info EFS n°56); galerie Aranzadi, réseau de la Pierre-Saint-Martin ; et même, si l'on "lisse" un peu son profil long, la galerie axiale du réseau du Larrandaburu ou Arresteliako Ziloua, également à la Pierre (fig.2).



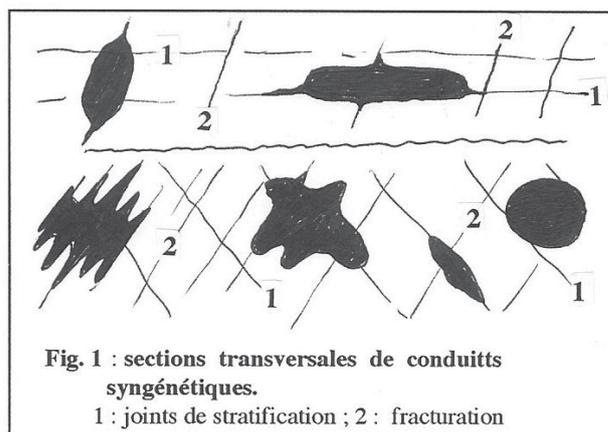
Chapitre 10 - LE CREUSEMENT DES GALERIES : UN TEMOIGNAGE D'UN REGIME D'ECOULEMENT

Il ne sera question ici que des conduits non verticaux (on ne parlera pas des puits). Comme les remplissages, dont il sera question aux chapitres 11 et 12 dans le prochain Info EFS, les formes de galeries sont des indicateurs essentiels du fonctionnement actuel ou passé du karst et de ses réseaux spéléologiques.

a- En milieu noyé permanent ou dominant

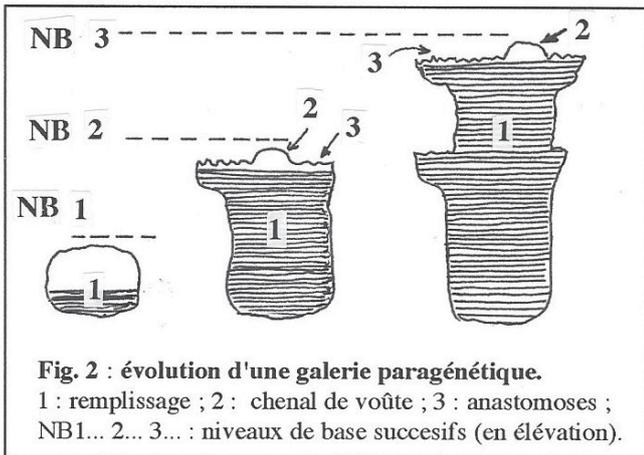
La corrosion est prédominante. Philippe Renault (« La formation des cavernes » page 65 -P.U.F – Collection « Que sais-je » - 1970) distingue le creusement syngénétique et le creusement paragénétique :

- Syngénétique : l'écoulement est trop rapide pour que puissent se déposer des sédiments fins. La corrosion agit donc sur toute la section du conduit qui se façonne plus ou moins en fonction des discontinuités de la roche, pour autant que celles-ci soient assez ouvertes (fig. 1). C'est un régime propice au creusement de conduites forcées, dont la section

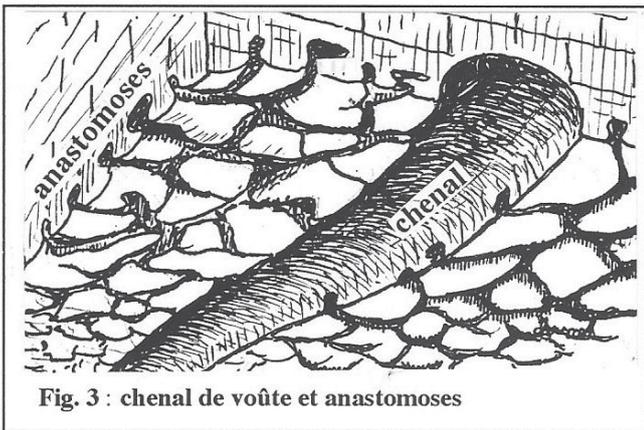


n'est pas toujours celle d'un « tuyau ». Si le courant est très rapide, les parois des conduits sont lisses. Par courant plus lent, peuvent apparaître des coups de gouge (voir ci-après).

- Paragénétique : l'écoulement relativement lent permet le dépôt d'un matériel fin que le courant ne peut plus déloger par la suite. Le colmatage progressif de la galerie force l'eau à se frayer un passage en corrodant la voûte. Une élévation du niveau de base entraîne la poursuite du creusement ascendant (fig. 2). Ce phénomène peut aussi se produire par colmatage soudain (coulée de boue).



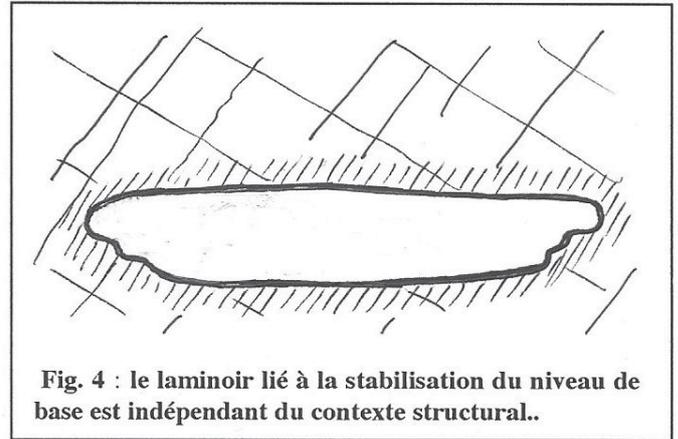
Lorsque l'espace entre remplissage et plafond tend à se resserrer, un « chenal de voûte » se grave dans l'axe du courant tandis que sur les marges l'eau s'insinue à travers toutes les fissures, sculptant des anastomoses ou « lapiaz de voûte » (fig. 3). Les « pendants de voûte » (qui ne sont pas des concrétions !!!) sont comparables à des anastomoses géantes.



b- En milieu semi-noyé (zone de « battement de nappe »),
 Dans ce domaine privilégié des galeries horizontales, l'érosion mécanique et la corrosion agissent de concert, la première pouvant prévaloir en régime de crue. La section transversale d'une galerie creusée dans cet espace dépend de la hauteur de l'intervalle de fluctuations des niveaux de crues (« battement de nappe »). En principe, cette section est plutôt isométrique (aussi

haute que large) et les parois de la galerie avoisinent la verticale.

Pour une stabilité prolongée du niveau de base et de faibles fluctuations de la surface piézométrique, la rivière tend à s'étaler en érodant ses bords, à la manière d'un fleuve divaguant entre ses rives. Ainsi se façonnent de larges laminoirs horizontaux (fig. 4), établis sans aucune relation apparente avec les discontinuités présentes : ils dépendent exclusivement de la position de la surface piézométrique.

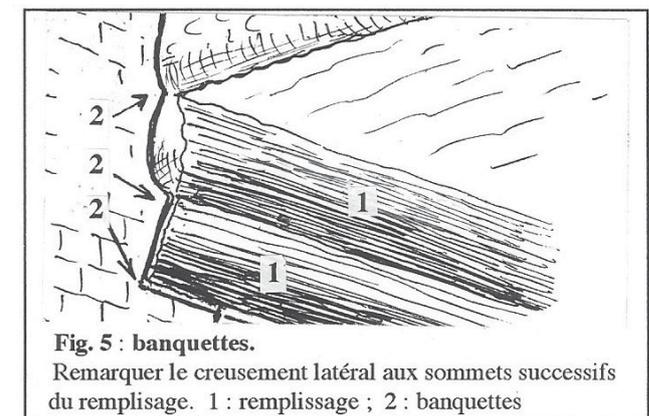


c- Formes de corrosion en milieu noyé et semi-noyé (rivières souterraines).

Outre le chenal de voûte et les anastomoses dont il vient d'être question, banquettes (ou épaulements) et vagues d'érosion (ou coups de gouges) sont des indices importants de l'évolution passée du réseau.

Remarquons d'abord que les banquettes sont des formes de parois habituelles des rivières souterraines de karst tabulaires (Causses) où elles matérialisent l'alternance de bancs horizontaux de sensibilités différentes à l'érosion.

Mais dans de nombreux cas, en pays plissé surtout, les banquettes n'ont rien à voir avec l'attitude de strates : elles marquent simplement des niveaux de stabilisation temporaire de l'écoulement. Si on les observe dans les galeries paragénétiques où elles soulignent souvent d'anciennes surfaces du remplissage détritique (fig. 5), on les trouve aussi dans certains méandres ou canyons de la zone aérienne où elles dessinent les traces étagées d'anciennes positions du lit de la rivière en cours d'enfouissement (« Faille » de Bétharram).



Les vagues d'érosion ou « coups de gouge » (fig. 6) sont des « microformes » de paroi – ou de plafond ! – liées à un écoulement turbulent en régime noyé ou semi-noyé. Elles indiquent le sens du courant qui les a façonnées (amont du côté creux le plus prononcé) et donnent une idée de sa vitesse (courant d'autant plus lent que les vagues sont plus larges). Elles permettent souvent d'identifier d'anciens conduits vauclusiens (grotte Napia dans le massif d'Issaux, Pyrénées-Atlantiques). A ne pas confondre avec les cupules de corrosion, alvéoles dues à la corrosion par aspersion.

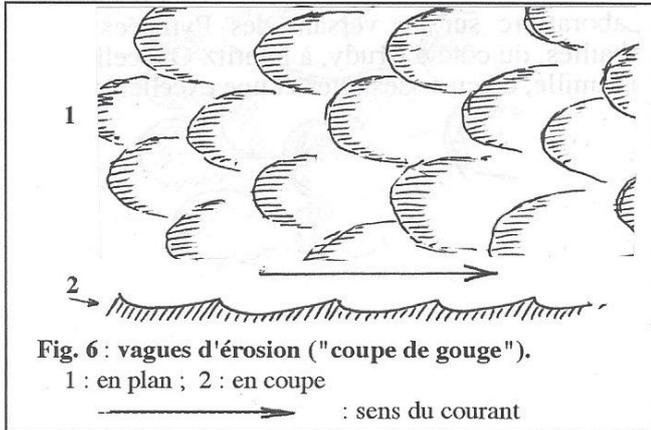


Fig. 6 : vagues d'érosion ("coups de gouge").
1 : en plan ; 2 : en coupe
: sens du courant

Les coupoles de corrosion sont dues à l'action chimique localisée, au plafond ou sur les parois de conduits noyés, d'une eau ponctuellement plus corrosive que celle du milieu ambiant. Une fissure axiale très mince leur est souvent associée (fig. 7). Elles n'ont rien à voir avec les marmites d'érosion situées exclusivement au plancher de galeries du milieu vadose de régime torrentiel.

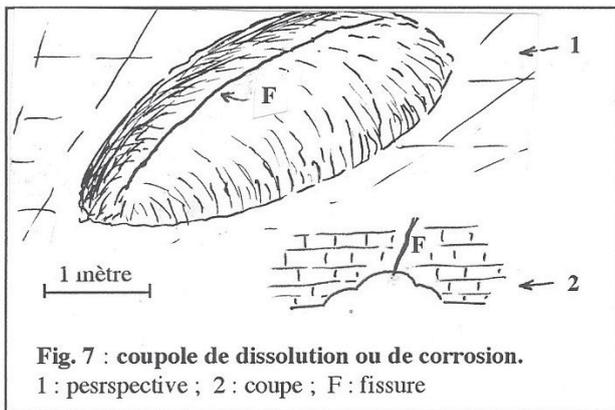


Fig. 7 : coupole de dissolution ou de corrosion.
1 : perspective ; 2 : coupe ; F : fissure

d- Le milieu aéré ou vadose

C'est le milieu où domine l'incision verticale de régime plutôt torrentiel, où l'érosion mécanique prévaut souvent (surtout durant les crues) sur la corrosion. C'est le domaine des canyons et méandres étroits et hauts, des marmites de plancher, des parois marquées de banquettes étagées (Faille de Bétharram ...).

Ce milieu d'eaux rapides et de cascades se développe avec l'abaissement du niveau de base. Le courant impétueux recreuse les alluvions anciennes puis surcreuse la roche en place (fig. 8) pour s'enfoncer

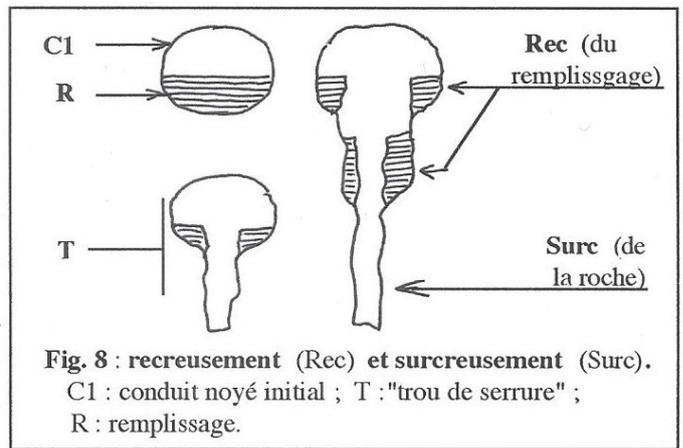


Fig. 8 : recreusement (Rec) et surcreusement (Surc).
C1 : conduit noyé initial ; T : "trou de serrure" ;
R : remplissage.

toujours plus bas et rattraper le niveau de base qui se dérobe sans cesse sous son lit ...

Suite et fin de Un peu de karsto pour les spéléos dans le prochain Info-EFS !

Un peu de karsto pour les spéléos

Jacques Bauer

Chapitre 11- REMPLISSAGES DÉTRITIQUES : DÉBRIS DU DÉMANTÈLEMENT DES RELIEFS

a- Remplissages de « tous bords »...

Les remplissages sont tous les dépôts de matière venue combler plus ou moins les cavités, soit lors du creusement, soit juste après, soit bien après. On distingue les remplissages détritiques terrigènes dont il sera question ici, les remplissages chimiques, dont on parlera au prochain chapitre, les remplissages organiques ou biologiques, comme le guano des chauves-souris, les débris végétaux ou les phosphates et enfin la neige et la glace qui obstruent parfois les trous de haute montagne.

b- Remplissages détritiques terrigènes

Détritique = fait de débris ; débris terrigènes = débris produits par l'action de l'érosion mécanique sur les roches et le relief.

Les remplissages détritiques terrigènes, ou plus simplement « terrigènes », constitués de tels débris, sont donc le produit de l'érosion mécanique. Certains proviennent du karst même, surface ou intérieur : on les dit « autochtones », car « indigènes » à leur milieu de dépôt. D'autres sont venus d'ailleurs, transportés depuis les amonts du bassin versant non karstique ou de beaucoup plus loin : étrangers à leur milieu de dépôt, ils sont dits « allochtones ».

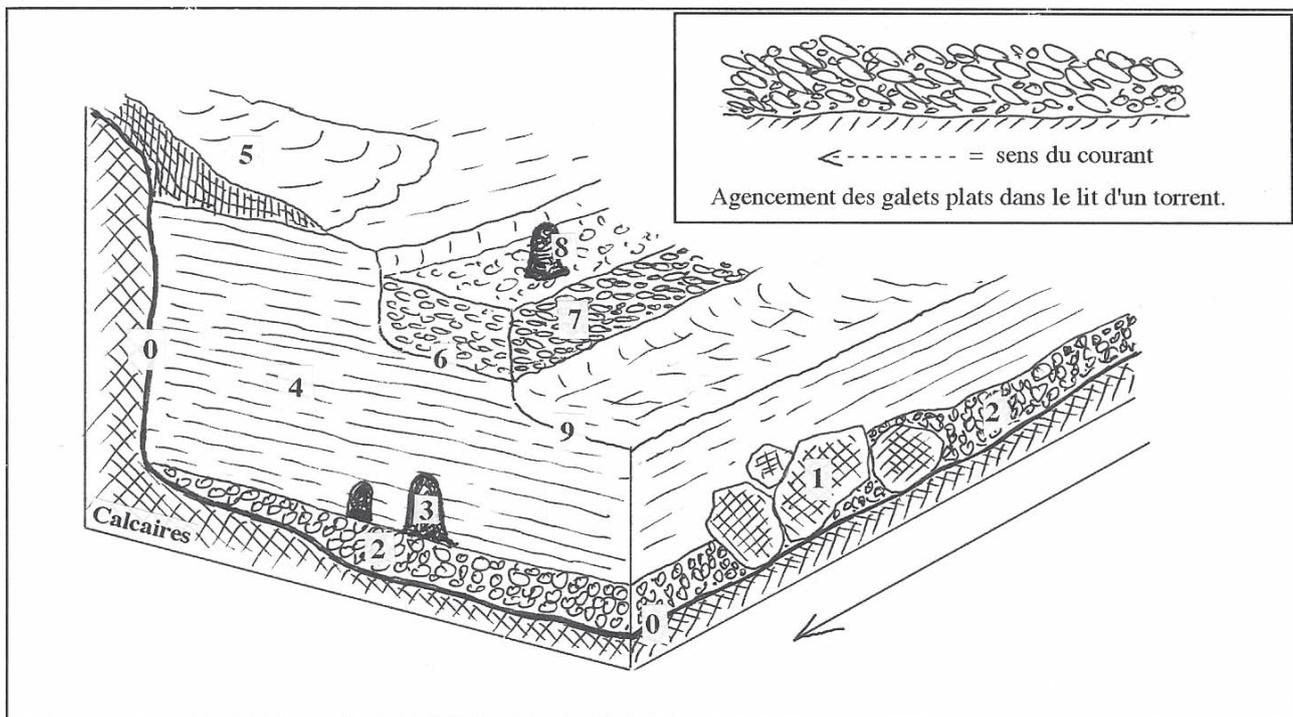


Fig. 1 : Schéma synthétique d'une galerie imaginaire dans laquelle se sont succédé plusieurs phases de remplissage et de recreusement. Le remplissage terrigène domine mais il s'y intercale des événements associés à un remplissage chimique (concrétionnement - voir chapitre 12). ————— = axe de la galerie.

0 : creusement initial de la galerie ; 1 : de gros éboulements se produisent. Les blocs gigantesques sont enrobés dans les alluvions de la phase 2 ; 2 : fonctionnement de la galerie en rivière souterraine avec alluvions torrentielles faites de gros galets ; 3 : dépôt de concrétions à la surface des alluvions : leur âge est de 220 000 ans. Les alluvions "2" sont donc antérieures à 220 000 ans ; 4 : un épais ensemble de dépôts de décantation "varvés" envahit la galerie suite à l'obstruction de son exutoire ; 5 : au terme de cet épisode, une coulée stalagmitique (chapitre 12) recouvre partiellement le dépôt "4". Son âge est de 95 000 ans. Le sédiment "4" s'est donc accumulé entre - 220 000 ans et - 95 000 ans.

6 : un recreusement torrentiel des alluvions "4" se produit, immédiatement suivi par le dépôt d'un lit de galets (7). L'âge de cet événement est antérieur à celui de la stalagmite qui le surmonte (8), datée de 32 000 ans. Enfin, un nouveau recreusement survient (9).

La disposition statistique des galets du remplissage "7" indique que le sens du courant était vers la gauche : dans le lit d'un torrent, les galets plus ou moins plats sont imbriqués de telle sorte que leur partie relevée indique l'aval de l'écoulement, comme l'illustre le médaillon en haut de la figure (← = sens du courant).

- **L'utilité de l'étude des remplissages**

En premier lieu, ces remplissages sont le témoignage de conditions passées dans l'évolution du karst : conditions dynamiques de dépôt (vadose ou noyé, fig. 1), climatiques ou tectoniques (périodes de calme ou au contraire de reprise de l'érosion, surrection du massif et variation du niveau de base ...). Plus précisément, ils peuvent aider à reconstituer les géographies anciennes ayant présidé à l'évolution du karst.

Ensuite, ils livrent parfois des fossiles d'animaux ou des vestiges d'industries humaines donnant une idée des environnements biologiques ou culturels de la préhistoire dont l'âge exact peut, avec quelque chance, être déterminé par la présence d'intercalations stalagmitiques datables (voir chapitre 12).

- **Remplissages autochtones :**

Dans l'origine de tout remplissage, on distingue trois étapes : la production du matériel par l'érosion, son transport (en général par les eaux courantes) et son dépôt.

Le matériel peut être produit sur place, il n'est pas ou peu transporté : ce sont les produits d'effondrement, éboulis de pente et amoncellements de blocs (formant des « trémies »).

À l'entrée de certaines grottes, l'alternance gel-dégel débite la roche fissurée dont les éclats s'entassent sous le porche.

Les fragments calcaires suffisamment légers pour être déplacés par le courant d'une rivière sont roulés, façonnés, arrondis par l'eau, devenant galets et graviers. Le transport reste intérieur au karst : on le démontre par l'étude du matériel transporté, en provenance exclusive du karst.

Le dépôt d'argile ne se produit que par décantation dans des eaux extrêmement calmes, en milieu noyé permanent ou en milieu semi-noyé, à l'occasion d'une lente décrue. Car les argiles sont transportées essentiellement en régime de crue (les eaux se troublent). Mais si l'argile se dépose en régime de courants très lents, pour la déplacer à nouveau il faut des courants de haute énergie car ses particules microscopiques adhèrent très fortement entre elles, d'où les colmatages de nature très fine et généralement difficiles à remobiliser. Le diagramme de la figure 2 établi par un certain Hjulstrom en rend compte.

D'où viennent ces argiles? On parle parfois d'argiles de décalcification (résidus de dissolution du calcaire). Il faut savoir à ce sujet que beaucoup de calcaires massifs ne contiennent que des traces d'argiles. En conséquence, ils ne peuvent donner que des quantités infimes de résidus de décalcification qui n'expliquent pas les colmatages massifs.

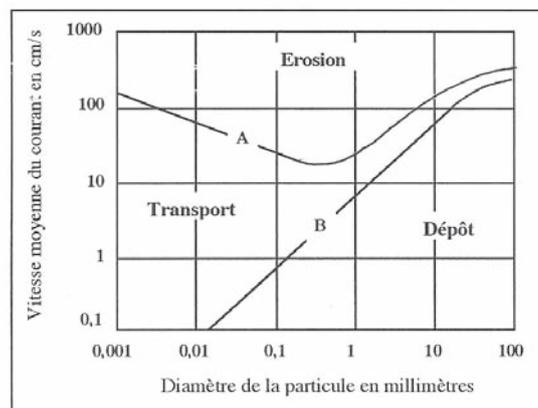


Fig. 2 : Diagramme de Hjulstrom, donnant les relations entre l'érosion, le transport et le dépôt des particules sédimentaires en fonction du diamètre de celles-ci et de la vitesse du courant.

Ce diagramme expérimental (car réalisé à partir de l'observation directe) est divisé par les courbes A et B en trois plages où interviennent respectivement l'érosion, le transport et le dépôt. Prenons par exemple un grain de sable de 1 mm de diamètre : il se dépose dans un courant de moins de 10 centimètres par seconde et pour le redéplacer un courant de 20 cm/s suffit. En revanche, prenons une particule d'argile de diamètre inférieur à 1/100 de mm : elle se dépose dans un courant de vitesse inférieure à 1 mm/s mais pour la déloger, il faut un courant de 80 cm/s. Le sable est donc plus facile à déloger que l'argile.

Les argiles des grottes sont donc souvent, soit le produit du démantèlement d'une couverture argileuse du karst, entraîné par les eaux de ruissellement dans les fentes et les gouffres (dolines), soit celui d'un transport plus lointain, de provenance extérieure au karst.

La galerie Aranzadi du réseau de la Pierre-Saint-Martin recèle un épais dépôt de sédiments fins constitués de « farine calcaire » faite de particules arrachées au massif par l'action de glaciers aujourd'hui disparus. Ce sédiment déposé dans un lac souterrain est fait de lits centimétriques à millimétriques, dits « lamines » ou « varves », dont l'alternance « clair-foncé » témoigne d'une alternance des conditions de dépôt, (saisonnière ?) caractéristique d'une période glaciaire.

- **Remplissages allochtones :**

Ce sont tous les dépôts de provenance plus ou moins lointaine, en tout cas extérieurs au karst.

Torrents et rivières souterrains déposent en régime vadose les mêmes alluvions que leurs homologues de surface (galets, graviers, sable, limons ...). L'analyse des cailloux contenus dans ces dépôts permet de situer le bassin versant d'origine. C'est particulièrement important dans le cas d'un vieux karst coupé, au cours de son évolution géographique, de son plus ancien bassin d'alimentation : une question majeure que pose justement le secteur de Camou dans le massif des Arbaillies.

Certaines cavités peuvent être envahies par des

coulées de boue et de blocs anguleux (grotte de Sare et d'Isturitz-Oxocellaya). Ces invasions plus ou moins massives indiquent un climat froid et humide avec un fort contraste saisonnier (gel-dégel).

**Chapitre 12- REMPLISSAGES CHIMIQUES :
LE CONCRÉTIONNEMENT**

Ce chapitre s'inspire essentiellement d'un article explicite et concis de Paul Dubois intitulé « Approche d'une organisation « dynamique » du concrétionnement en grotte », paru dans les actes de la cinquième rencontre d'octobre du Spéléo-Club de Paris, tenue à Orgnac, les 30 septembre-1er octobre 1995.

a- Un processus de précipitation chimique

Depuis les puissants massifs stalagmitiques jusqu'aux plus fines excentriques, le concrétionnement résulte toujours de la précipitation chimique de sels dissous dans l'eau, le carbonate de calcium étant de très loin prédominant (calcite en tête, aragonite en seconde position). Il existe aussi des concrétions de gypse (sulfate de calcium).

Ce processus est lié à l'eau et à son mode de transit depuis la surface jusqu'à son dépôt en grotte. On distingue trois étapes (fig. 1):

- la dissolution initiale du carbonate, surtout dans la partie supérieure du karst ;
- le transfert de la solution à travers le réseau de fentes et de fissures ;

- le dépôt dans le réseau spéléologique.

Dans le processus interviennent aussi (fig. 1) :

- le climat local (précipitations et température qui contrôlent la quantité de carbonate dissous) ;
- la perméabilité de fissures qui contrôle le débit de l'eau et la vitesse de transit ;
- le climat interne de la grotte qui intervient sur les échanges entre l'air ambiant et l'eau sortant des fissures : avec le départ du gaz carbonique dissous, l'eau devient sursaturée et le carbonate précipite.

Dans tout cela, c'est le débit de l'eau qui est le facteur essentiel (alimentation et transfert, vitesse de l'écoulement).

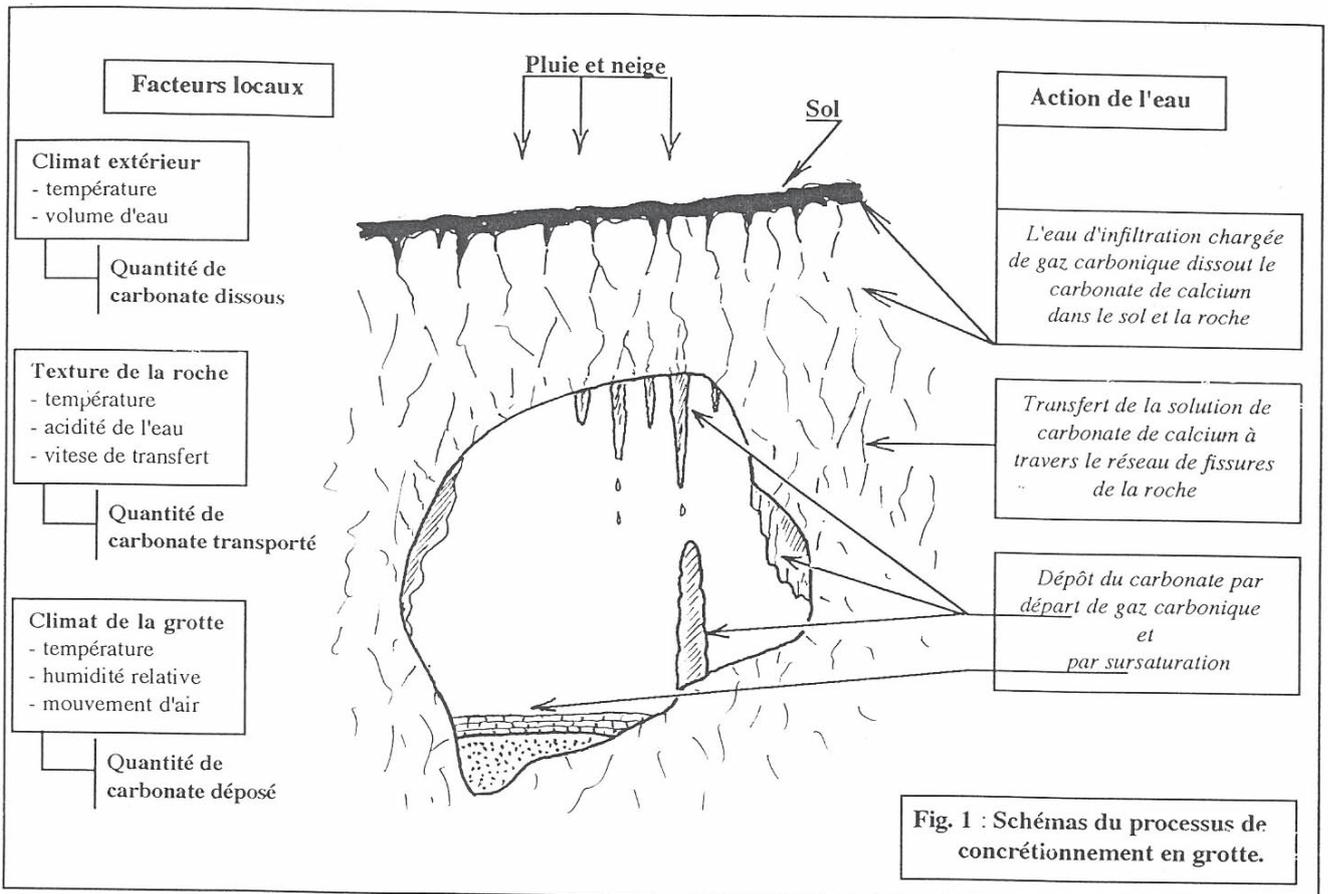
b- L'écoulement est responsable des formes de concrétionnement (fig. 2)

On distingue deux types principaux d'écoulement :

- **Écoulement normal sous l'influence des forces de pesanteur** : le débit et la vitesse sont très variables.

Le concrétionnement lié à ce type d'écoulement comprend les concrétions à croissance verticale ou oblique (stalactites, stalagmites, draperies) et les formes horizontales stratifiées (planchers) :

- écoulement goutte à goutte : stalactites, stalagmites, dépôts de parois et colonnes ;
- écoulement laminaire (= non turbulent) : mêmes formes mais plus puissantes (draperies ...);
- les excès d'eau font des planchers stalagmitiques, des microgours... L'éclaboussement par une eau tombant d'un plafond élevé produit des piles



d'assiettes ou des palmiers ;

- les fistuleuses (macaronis) sont des stalactites monocristallines (= faites d'un seul cristal) fines à large canal central et à croissance rapide ;
- l'écoulement sous pression en fissures laminaires provoque parfois la formation de disques ;
- l'écoulement continu produit presque exclusivement du concrétionnement sur parois (coulées, cascades ...) et sur le sol (planchers stalagmitiques, grands gours avec leur cortège de cristallisations sous l'eau, calcite flottante ...).

- **Écoulement sous l'effet de forces indépendantes de la pesanteur**, comme par exemple la capillarité (capacité de l'eau à s'élever, en dépit de la pesanteur, dans un très fin tube capillaire). Ce type de processus est favorisé par les milieux confinés à très faible perméabilité où la circulation d'eau est extrêmement réduite, avec tendance à l'assèchement.

La nature du support de ce concrétionnement est primordiale: celui-ci doit être très finement poreux pour favoriser la percolation capillaire, à la manière d'un filtre aux orifices microscopiques. Il n'est donc plus question ici de perméabilité de fissures. Cet environnement spécifique est celui des croûtes et des cristaux, des excentriques, des efflorescences.

baguettes et filaments. L'alimentation en eau se fait sous pression à partir du réseau poreux (et non plus de fissures) de la roche ou même des concrétions jouant le rôle de support. La croissance se fait autour d'un très fin capillaire.

c- Le concrétionnement, mémoire du passé.

Le concrétionnement étant influencé par le climat extérieur est donc porteur d'une mémoire géologique. On sait par exemple qu'un plancher stalagmitique compris entre deux ensembles détritiques peut suggérer – à confirmer par analyse – un réchauffement temporaire du climat entre deux périodes plus froides. Sous climat glaciaire ou de haute montagne, les concrétions sont rares à inexistantes. Elles sont abondantes sous un climat chaud et humide.

D'autre part, des concrétions fortement corrodées peuvent traduire une remontée passagère du niveau de base avec réennoiment de la cavité.

Enfin, les concrétions de calcite contiennent souvent des traces d'uranium qui permettent de mesurer leur âge exact en milliers d'années. C'est ce que l'on appelle la datation radiométrique : connaissant l'âge de la plus vieille concrétion d'une salle ou d'une galerie, on peut évaluer l'époque du début du creusement de celle-ci (chapitre 11, figure 1).

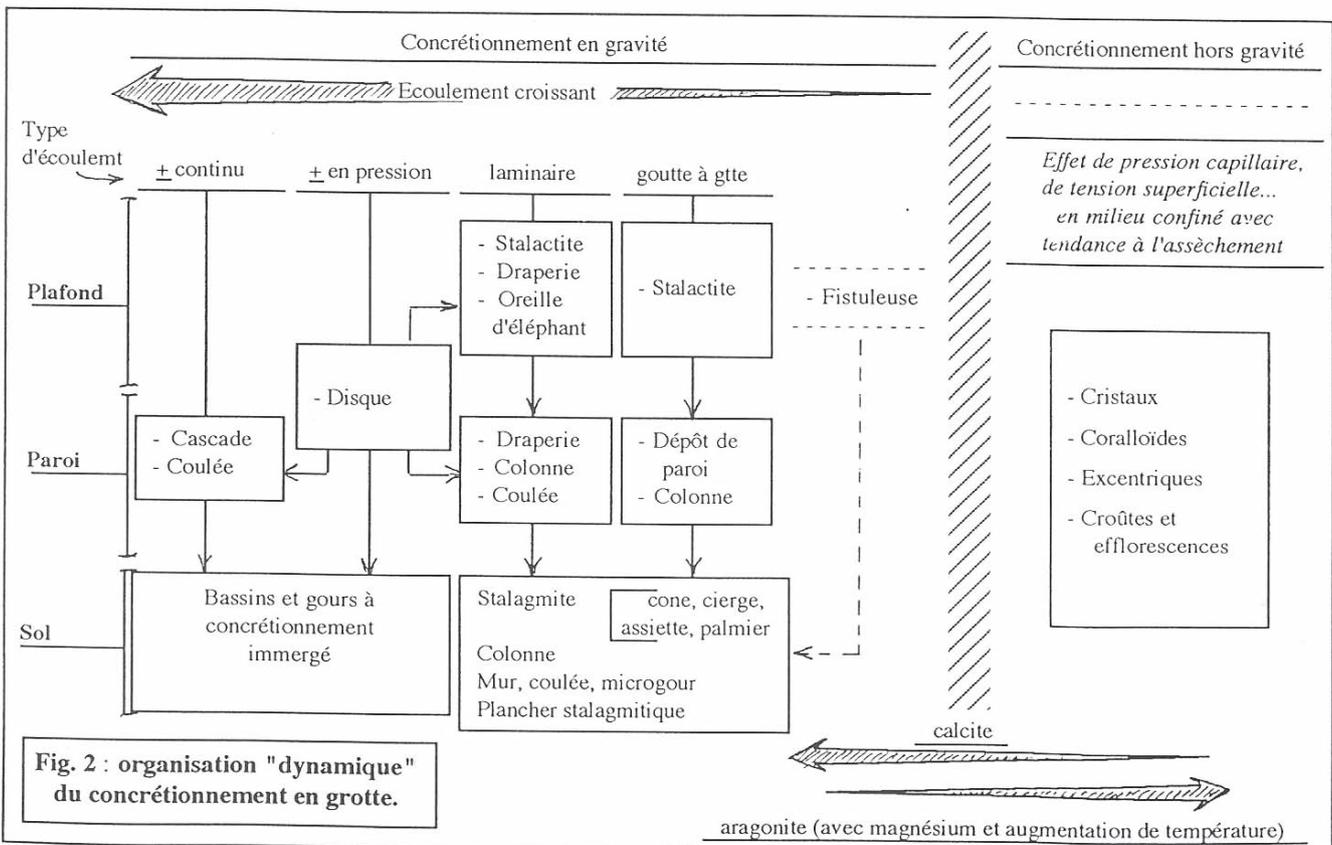


Fig. 2 : organisation "dynamique" du concrétionnement en grotte.

Fig. 1 et 2 tirées de l'article de Paul Dubois (5è rencontre d'octobre du Spéléo-Club de Paris) .
 texte légèrement modifié pour le rendre plus compatible avec les expressions utilisées dans ce cours.

**Retrouvez l'intégralité de *Un peu de Karsto pour les spéléos* sur le site de l'EFS :
<http://efs.ffspeleo.fr>, rubrique « Documentation »**