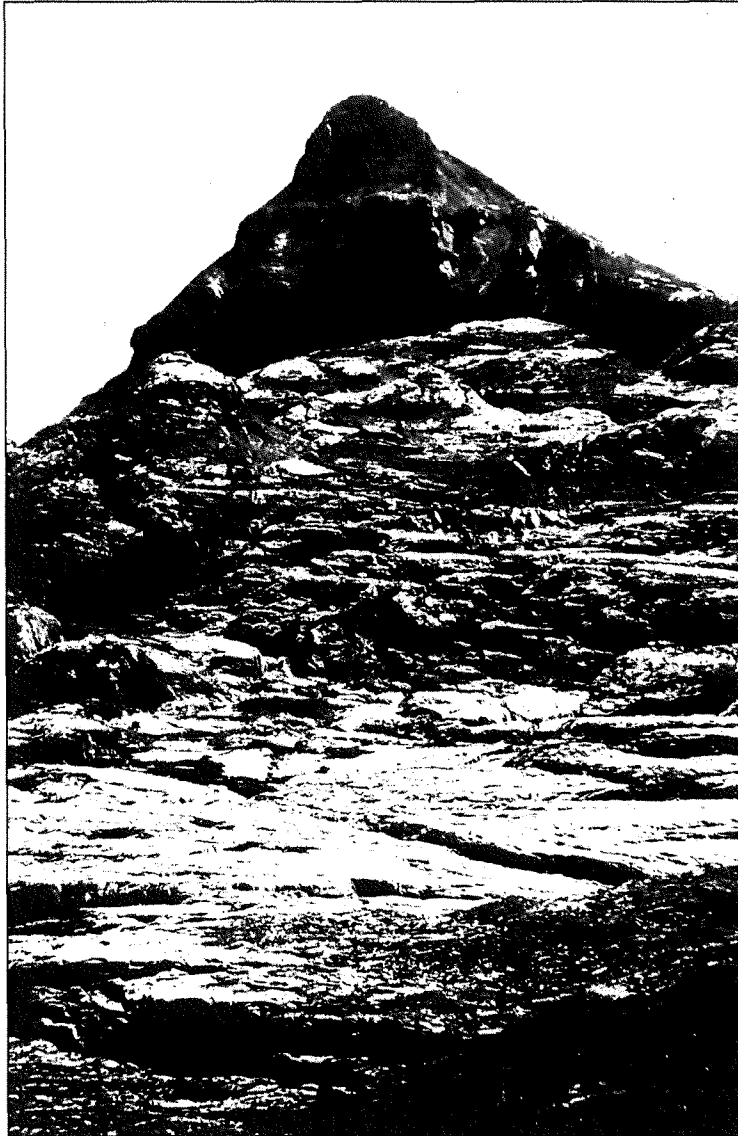


LES CAHIERS DE L'E.F.S.



ISSN : 0990-9060



PRINCIPES DE KARSTOLOGIE PHYSIQUE

Jacques BAUER

A mes amis fidèles, employés des grottes de Bétharram : j'ai appris à connaître en leur compagnie cette caverne splendide où se trouve archivée une véritable encyclopédie naturelle du karst.

Bonjour lecteur !

Ce cours aurait pu s'intituler "Philosophie du karst et de la caverne". En effet, comme il est écrit dans le Petit Larousse Illustré (ed. 1996) *"la philosophie a d'abord été une réflexion scientifique sur la nature et les causes qui font qu'existe l'univers"*.

En ce sens, la très belle approche écrite par Alain Mangin et qui nous sert d'avant-propos est bien une approche philosophique, même si l'emploi de ce terme fait aujourd'hui pas sérieux, ou au contraire prétentieux.

Quoi qu'il en soit, ce cours est dédié au spéléo démuné de toute culture géologique ou karstologique de base. Je l'ai conçu en pensant aux copains qui m'ont dit, découragés, que même les classiques de vulgarisation (cités en référence pages 5 et 6) étaient de lecture difficile. Mon cours veut être d'abord la clé à la lecture de ces ouvrages plus complets et plus denses. Il est avant tout une **initiation**, ou même une invitation à "jouer dans la cour des grands".

L'avant-propos pourra sembler ardu cependant. Qu'il n'en soit pas pour autant source de découragement et raison de ne pas poursuivre: on peut très bien le lire en guise de conclusion.

Mon approche pédagogique est progressive, faite de multiples redites qui pourront paraître à l'initié lourdes et redondantes. Que celui-ci me comprenne et pardonne. J'ai voulu établir, en avançant lentement, **une solide base de départ** couvrant en priorité les **principes dynamiques** de la question. Ainsi sont soumis à la réflexion du lecteur des **concepts élémentaires valables pour tous les karsts du monde**, en usant du vocabulaire indispensable dont il est cependant utile de connaître la synonymie. D'où peut-être parfois certaines lourdeurs répétitives. Mais c'est voulu. Rien n'est à apprendre par coeur. Tout est à assimiler, à la façon dont on apprend à marcher et à parler.

Jacques Bauer, juillet 1996

Je tiens à remercier ici Fabien HOBLEA, Stéphane JAILLET, Rémy LIMAGNE et Richard MAIRE qui ont certainement consacré beaucoup de leur temps à la lecture de l'épreuve originale et m'ont prodigué d'utiles conseils dont j'ai tenu compte avec plaisir.

*Reprise dessins : Vincent VIELLEROBE. Maquette : Rémy LIMAGNE
Page 1 de couverture : le Pic d'Anie, massif de la Pierre Saint-Martin (photo Richard MAIRE)*

Du même auteur :

Éditions du Comité Départemental de Spéléologie des Pyrénées-Atlantiques (CDS 64)

- **La rivière interdite**, exploration souterraine du massif de Bétharram, revue CARST n°6, 1991.

- **Les deux faces de la Pierre**, interprétation spéléo-géologique du massif de la Pierre Saint-Martin, dans le cadre de l'ARSIP (Association de Recherches Spéléologiques Internationales à la PSM), 1994.

- **Le massif des Arbailles**, approche spéléo-géologique, 1995.

- **Lézéa, grotte de Sare, Pays Basque** (en collaboration), 1989.

Chacun de ses ouvrages illustre à sa façon l'approche spéléo-géologique et sa vulgarisation par l'auteur d'un massif particulier.

--- CDS 64, 5 allée du Grand Tour, 64000 Pau ---



Pli dans le flysh à Saint-Jean de Luz (Pyrénées Atlantiques). Photo Jacques BAUER.

PRINCIPES DE KARSTOLOGIE PHYSIQUE

*Une introduction à la lecture des classiques de karstologie pour la culture générale
à l'usage des spéléos amoureux sincères de la caverne.*

SOMMAIRE

1. AVANT-PROPOS	p. 04
1.1. L'esprit d'une approche dynamique du karst	p. 04
1.2. Pour en savoir plus	p. 05
1.3. Un mot sur la démarche proposée	p. 06
2. LE PHENOMENE KARSTIQUE	p. 08
2.1. La préparation du milieu	p. 09
2.2. La préparation du cadre morphostructural, les conditions de base de la karstification	p. 11
3. STRUCTURE ET ORGANISATION DU KARST : SPECIFICITE DE L'AQUIFERE KARSTIQUE	p. 18
4. MISE EN PLACE ET DEVELOPPEMENT D'UN SYSTEME KARSTIQUE : INFLUENCE DES "CONTRAINTES DE CHEMINEMENT"	p. 22
5. LE FONCTIONNEMENT INTERNE DU KARST : INDEPENDANCE DU SYSTEME KARSTIQUE VIS A VIS DE LA GEOMORPHOLOGIE DE SURFACE	p. 25
5.1. Les étages du karst	p. 25
5.2. Indépendance du système karstique vis à vis de la morphologie de surface	p. 28
5.3. Diffluences	p. 30
5.4. Vulnérabilité du karst à toute pollution	p. 33
5.5. Récapitulatif : le potentiel de karstification	p. 33
6. EVOLUTION ET ADAPTATION DU RESEAU SPELEOLOGIQUE : LE KARST POLYPHASE	p. 35
6.1. Le temps et la durée	p. 35
6.2. L'évolution du milieu karstique	p. 36
7. APPRENDRE A LIRE LE KARST	p. 40
7.1. Une bonne topographie d'abord !	p. 40
7.2. Attitudes de conduits et formes de creusement	p. 40
7.3. Remplissages	p. 47
7.4. Observations insolites : un passé hydrothermal ?	p. 55
8. PALEOKARST : LE PASSE ANTERIEUR	p. 57
9. CONCLUSION	p. 58
ANNEXE : Echelle des temps géologiques	

PRINCIPES DE KARSTOLOGIE PHYSIQUE

par Jacques Bauer

"... cette exagération aléatoire du pore qu'est la caverne ..." (Texte de Bernard Férié dans le film de Patrick Cabrol : "La Pierre en Pleurs" - D R A E Midi - Pyrénées ; Service du film scientifique, Paris).

" Le savoir, source de plaisir, se partage l'écrivain scientifique est là pour établir le contact entre l'homme de science et le public et pour rendre ce contact plus facile et plus agréable " (Yves Coppens : " Pré-Ambules " ch. IV - " Origine et évolution de l'Homme. Question de diffusion".)

Le lecteur averti voudra bien pardonner les redondances de cet exposé un peu répétitif : mais le débutant qui ne pourra le lire d'un trait, assimilera et retiendra mieux, ainsi, les éléments et les étapes de la démarche.

(l'auteur)

1. AVANT-PROPOS .

1.1. L'esprit d'une approche dynamique du karst.

Dans un exposé sur l'approche systémique du karst, paru en 1982 (*Reunion Monografica sobre el Karst-Larra*) Alain Mangin montre que la compréhension globale du phénomène karstique est possible - et généralisable - à partir de la connaissance du fonctionnement et de l'évolution de ce qu'il appelle le "système karstique".

Il nous faut donc préciser cette notion de "système karstique". Dans ce qui suit, les passages en italique sont directement tirés du texte de Mangin.

On sait que les roches carbonatées, qui au départ ne possèdent pas une forte porosité, même en faisant intervenir la fissuration, peuvent devenir des aquifères importants, à la suite d'actions physico-chimiques. Ces processus connus sous le nom de karstification, correspondent en fait à l'érosion liée à la circulation des eaux. L'organisation des écoulements dans le karst montre une hiérarchisation de l'amont vers l'aval . Une telle organisation aboutit:

1°) à drainer progressivement les eaux vers un nombre restreint de sources, ou même vers une seule,

2°) à une hiérarchisation des vides comme en témoigne la structure des réseaux spéléologiques par exemple.

Ici apparaît la notion d'unité de drainage, et celle de **Système karstique**, défini comme l'impluvium au niveau duquel les écoulements de type karstique constituent une unité de drainage. Ce système est soumis au processus dynamique que sont les circulations d'eau; l'entrée d'un tel système est représentée par les apports dûs aux précipitations et la sortie par les débits des sources, point d'aboutissement du drainage.

... Il faut remarquer ... que cette définition ne se rapporte pas uniquement à la notion d'aquifère. En effet, en plus des écoulements de type karstique, réalisés dans sa partie carbonatée, le système karstique peut comprendre des terrains non karstiques, avec un ruissellement de surface. Ce ruissellement s'intègre au système dans la mesure où il est drainé, dans sa totalité, par l'aquifère karstique.

... .. La clé qui permet de comprendre le karst se trouve dans la relation entre la karstification et la circulation des eaux ... La karstification conduit à la réalisation d'un système karstique par l'organisation des vides. Ce système peut donc être défini d'un point de vue morphologique: c'est la structure du karst.

Les circulations d'eau, aspect hydrologique du problème, rendent compte du fonctionnement du karst, en tant que système aquifère.

L'énergie mise en jeu pour les circulations d'eau, donc pour la karstification, définie comme étant le "potentiel de karstification", commande l'évolution du karst.

A partir de ces trois caractéristiques : structure, fonctionnement et évolution, il est possible de situer avec précision les divers facteurs qui interviennent ...

1°) ... La karstification est déterminée d'une part par la circulation des eaux, mais aussi par les processus chimiques de mise en solution ... La chimie intervient sous forme de flux d'eau et de gaz carbonique.

2°) Les écoulements sont soumis aux lois très générales ... qui établissent des corrélations entre les valeurs des flux (écoulements) et les forces qui les suscitent (charge hydraulique). Ces lois font intervenir en outre ... la nature de la roche, sa porosité, son degré de fissuration, sa teneur en insolubles.

3°) L'aspect énergétique est déterminé essentiellement, d'une part par les conditions aux limites du système (qui définissent le gradient hydraulique) et d'autre part par le potentiel en eau et en gaz carbonique. On retrouve à ce niveau les conditions géologiques, géomorphologiques et climatiques qui président à la réalisation d'un karst.

Sur ces bases, nombreuses sont les observations qui peuvent désormais être facilement expliquées. En outre, elles offrent un cadre très général qui permet de rapprocher des phénomènes qui, autrefois, paraissaient très éloignés ... (C'est moi qui insiste et souligne).

Mais de plus, par suite du caractère très précaire de l'existence d'un karst, puisqu'il est lié aux apports de l'extérieur et que les caractéristiques externes évoluent, la plupart des karsts montrent la superposition de plusieurs structures. Chacune correspond à la mise en place d'un drainage. On peut en conclure que presque tous les karsts sont polyphasés. Quant à la notion de paléokarst elle est le fait de cet état polyphasé; c'est la plupart du temps un système karstique binaire qui, ouvert au départ, s'est fermé, puis est devenu isolé.

1.2. Pour en savoir plus.

Pour qui désire s'informer sur le milieu karstique sous ses différents aspects physiques, il existe de nombreux ouvrages généraux : pour n'en citer que quelques uns de langue française, assez faciles à aborder grâce au louable travail de vulgarisation réalisé par leurs auteurs, on retiendra :

- 1952 - Félix Trombe : "Traité de Spéléologie" - Payot - ancien mais très intéressant.
- 1965 - Bernard Gèze : "La Spéléologie Scientifique" - Ed. du Seuil ; série "Le Rayon de la Science" - entre autres, excellent aperçu sur les concrétions .
- 1970 - Philippe Renault : "La Formation des Cavernes" - P. U. F. collection "Que sais-je", n° 1400 - comme le précédent, un classique du genre : excellent ouvrage de prise de contact avec le karst.
- 1972 - Jean Nicod : "Pays et Paysages du calcaire", P.U.F. - collection SUP.
- 1980 - Richard Maire : "Eléments de Karstologie Physique" - Spelunca Spécial n° 3 - Un excellent outil de terrain, hélas épuisé.
- 1981 - Maurice Audétat et al. : "Notions de Géologie, Géomorphologie et Hydrologie à l'usage des Spéléologues et Naturalistes" - F. F. S. ; Club Jurassien ; S. S. S. / S. G. H. - Co Enseignement; Dep. Enseignement de l'U. I. S. - Ouvrage didactique très complet, de bon niveau, peut-être un peu statique.
- 1988 - Bernard Collignon : "Spéléologie, Approches Scientifiques" - Edisud - Un ouvrage très moderne, complet, agréable à lire.
- 1990 - Richard Maire : "La Haute Montagne Calcaire" - Karstologia, Mémoires n°3 - Livre II ("fonctionnement et génèse des karsts de haute montagne") - Excellente synthèse, très didactique.
- 1992 - (en hommage à Jean Nicod) : "Karst et Evolutions Climatiques". Presses universitaires de Bordeaux. Recueil d'articles très divers touchant de nombreux aspects du karst : chacun y trouvera ce qu'il cherche depuis longtemps ...
- 1982 à 1995 - et ce n'est pas fini ! - Jacques Choppy : une série de synthèses touchant tous les aspects du karst et de la caverne - Spéleo-club de Paris.
- 1996 - Stéphane Jaillet et Fabien Darne : "Eléments de karstologie" - Ecole Française de Spéléologie, Dossier Instruction. Excellent memo sur l'essentiel de ce qu'il faut connaître.

Etudes approfondies : pour ceux qui veulent aller au cœur du problème, on peut conseiller la thèse d'Alain Mangin (1975) sur la dynamique et l'organisation du karst, et celle de Patrick Cabrol (1978) sur les concrétions, Michel Bakalowicz (1979) sur la géochimie, et Patrick Sorriaux (1982) sur l'approche des remplissages.

Concernant la culture géologique générale, on peut recommander les ouvrages de classe de 4ème et de 1ère des collèges et lycées. Mais pour une information plus consistante on pourra se plonger dans les deux ouvrages suivants :

1989 - J. M. Caron et al. : "Comprendre et enseigner la planète Terre" - Ophrys.

1993 - J. Angelier et al. : "Enseigner la géologie : collège - lycée" - Nathan.

et se munir à l'occasion du très utile "Dictionnaire de géologie" de Foucault et Raoult - Masson.

1.3. Un mot sur la démarche proposée.

Tout d'abord, je voudrais rappeler que l'essentiel de mon expérience est pyrénéenne. De la Pierre aux Arbailles en passant par Bétharram et Isturitz-Oxocellaya, j'ai vu surtout du karst en pays plissé. Sauf à la Pierre où c'est plutôt la "dalle en pente" (surtout à la saison du stage karsto...). Mais la Pierre, c'est aussi un karst de haute montagne, comme dirait Richard Maire.

Et les chaînons calcaires de la zone nord pyrénéenne m'ont enseigné le "karst barré", le plus complet, hydrogéologiquement parlant. C'est là qu'avec la découverte du Mélat j'ai rempli à 38 ans. C'est là que j'achèverai ma carrière.

Dans l'exposé qui suit, j'ai voulu emprunter une approche à la fois **logique** et **dynamique** du phénomène karstique, en tenant bien compte de tous les aspects, physiques et géométriques entre autres, du cadre dans lequel il se produit. Ce choix, lié à la brièveté du temps que laisse aux présentations théoriques le programme de la plupart des stages, m'a conduit à négliger un peu sans pour autant les oublier, des matières plus descriptives, par ailleurs facilement abordables dans la littérature en référence, et sur le terrain avec un guide averti. Dans le chapitre "*apprendre à lire le karst*" nous passerons en revue dans une optique dynamique où causes et effets seront confondus, l'essentiel de ce qu'il est bon de connaître sur les **formes de creusement** et le **remplissage** des cavernes.

Nous commencerons ce cours en évoquant la **préparation du milieu** où va se dérouler le phénomène karstique. Nous analyserons ensuite les **causes "motrices"** et leurs **conséquences** sur l'**organisation du karst**. Cela nous conduira à examiner l'**évolution du système karstique** et son **adaptation aux changements** du cadre **morpho-structural régional**.

Pour débiter, voici quelques définitions concernant des termes qui pourront apparaître tout au long de l'exposé :

Morphostructural : fait intervenir à la fois la géomorphologie (= morphologie ou formes du terrain, c'est à dire le relief) et la structure géologique qui en est au moins partiellement la cause. Exemples : escarpement de faille lié au contact entre un terrain dur et un terrain tendre; colline liée à la présence d'un anticlinal dans une couche de roche dure affleurante; massif calcaire individualisé dans le périmètre d'un compartiment structural; plateau calcaire; versant épousant le pendage des couches ; etc ...

Carbonate: sel formé de l'ion CO₃ et d'un métal : fer (Fe), manganèse (Mn), calcium (Ca), magnésium (Mg)... Le calcaire est fait de carbonate de calcium. La calcite des concrétions est du CO₃Ca pur, la dolomie contient 50% de CO₃Ca et 50% de CO₃Mg.

Carbonaté : A base de carbonate (pur ou dominant) ou en contenant en proportions importantes (calcaires récifaux : 100% ; calcaires marneux 70%, par exemple).

Unité karstifiable, unité karstique : massif carbonaté bien individualisé à la fois sur le plan **stratigraphique** (formation carbonatée bien délimitée à la base et au sommet) et sur le plan **morphostructural** (voir ci dessus). L'**unité karstique** a la propriété de se comporter en **aquifère**. Notons qu'une même unité karstique peut comprendre plusieurs systèmes karstiques (voir ci-après).

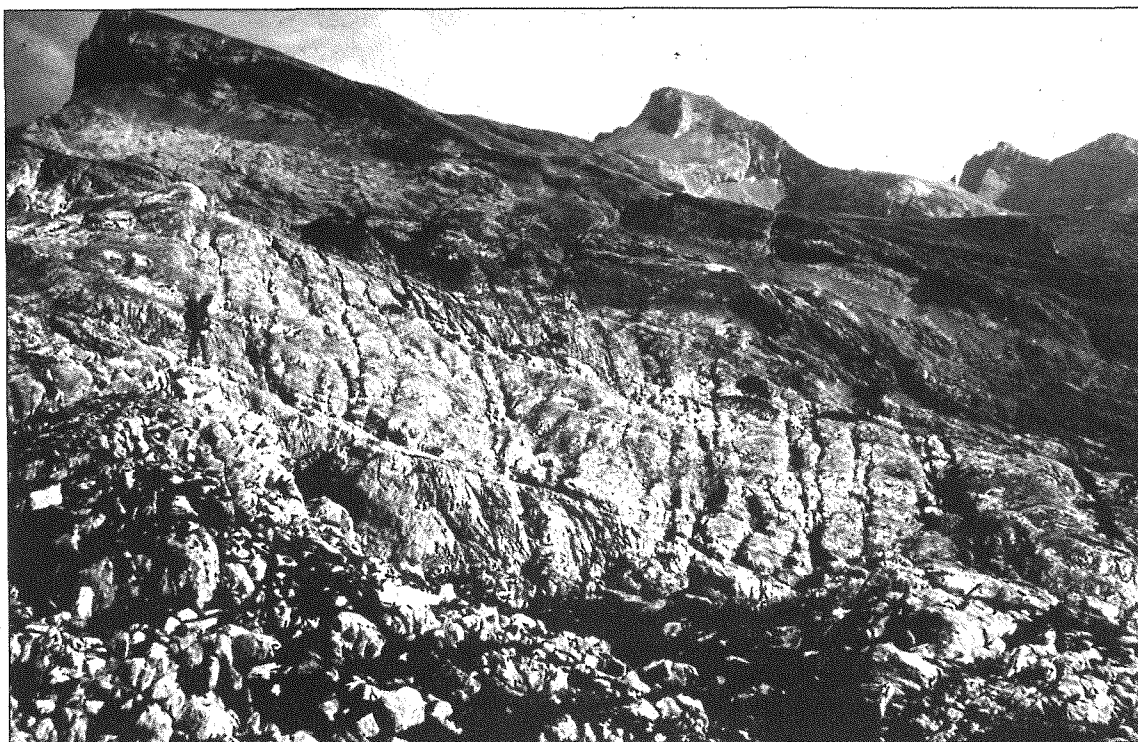
Système karstique : on l'a déjà vu, c'est une **unité de drainage** aboutissant à une zone d'émergences (ou exutoire) unique. Le système karstique est donc compris dans le périmètre d'un **bassin versant** (ou, par extension, **impluvium** - voir ci dessous) bien délimité, comprenant éventuellement, en amont du karst proprement dit ou quelque part à sa surface, des terrains imperméables sur lesquels l'eau ruisselle avant de s'infiltrer en arrivant au contact du calcaire.

Bassin versant, impluvium (d'une source) : **Unité géographique** dans les limites de laquelle l'ensemble du ruissellement provenant des précipitations converge vers ladite source. Valable pour la surface comme pour le karst profond. Note : la notion d'impluvium est moins spécifique, d'où la nécessité d'en préciser le sens. En effet, on peut parler d'**impluvium général** d'une unité karstique, mais en aucun cas de **bassin versant**, terme réservé à la notion d'**unité de drainage**: il faut donc bien respecter la nuance! L'impluvium peut, au sens le plus large, désigner le bassin d'alimentation de l'**ensemble** d'un karst.

Karst binaire * : unité karstique dont l'impluvium (ou système karstique dont le bassin versant) comprend des terrains **imperméables** drainant un réseau hydrographique superficiel, et où opère une érosion essentiellement mécanique.

Karst unaire * : unité karstique dont l'impluvium (ou système karstique dont le bassin versant) est limité aux contours mêmes du massif calcaire dénudé, sans réseau hydrographique de surface adjacent ou superposé.

(* Mangin 1982 : note en référence dans l'avant-propos de ce cahier E.F.S. n°7)



Lapiaz de la Pierre Saint-Martin. Photo Jean-François PERNETTE ("*profils et couleurs*").

2. LE PHENOMENE KARSTIQUE.

"La grotte n'est pas tout à fait un espace; c'est le moment du passage de l'eau" (B. Férié et P. Cabrol : " *La Pierre en Pleurs*" - Op. cit.)

Le phénomène karstique apparaît et se déroule dans un cadre lithologique et morphostructural favorable et prédisposé où doivent être réunies trois conditions :

- un milieu soluble pourvu de **discontinuités** physiques internes (fissures au sens général du terme) **interconnectées** permettant l'infiltration d'un liquide en profondeur.

- l'**apport en quantité suffisante** d'un **agent chimique actif** venu de l'extérieur et y retournant après avoir transité dans le milieu. Dans le cas le plus classique, c'est l'association **eau - gaz carbonique** en solution.

- l'existence d'une "**force motrice**" capable d'entretenir un **écoulement** du solvant à travers le milieu, entre la zone d'infiltration et un ou plusieurs exutoires. C'est la **charge hydraulique**, principe d'un **travail** dont la **puissance** sera fonction du **gradient hydraulique** et du **débit** .

Pas de panique !!! Nous reverrons tout cela au cours de l'exposé, et on se rendra compte que ça coule de source .

Le **système karstique** est une manifestation à la fois **morphologique** et **dynamique** du phénomène karstique. C'est une entité entièrement ou partiellement **hypogée** (souterraine). Il s'agit d'un système **ouvert tant qu'il est actif**, c'est à dire qu'il échange avec l'extérieur à la fois de l'énergie (en particulier de l'énergie chimique) et de la matière (dissociation du CO_3Ca par l'apport de " CO_2 dissous" - c'est en réalité un peu plus complexe mais globalement c'est ça - et par la même occasion évacuation du Ca).

Lorsqu'il cesse d'être actif, le système se ferme et s'isole. Il devient fossile, passant progressivement de l'état de **karst inactif** à celui de **paléokarst** .

A noter que l'état de karst "inactif" est ambigu et souvent difficile à cerner .

Nous ne considérerons dans ce qui suit que le **karst gravitaire**, de très loin le plus fréquent à la surface du globe. L'énergie mécanique qui en assure le fonctionnement est **exclusivement la gravité**. Il existe des **karsts hydrothermaux** dans lesquels l'énergie en jeu est en partie **calorifique**. Mais attention ! Là aussi, les choses sont parfois très difficiles à démêler : les eaux de certains karsts gravitaires peuvent descendre suffisamment profond pour se réchauffer au contact de la chaleur géothermique. Ainsi, beaucoup de sources dites hydrothermales ne sont en fait que des sources karstiques gravitaires "venant de loin", et la distinction entre les deux types de karsts est souvent ardue, d'autant plus qu'il existe nécessairement des types hybrides.

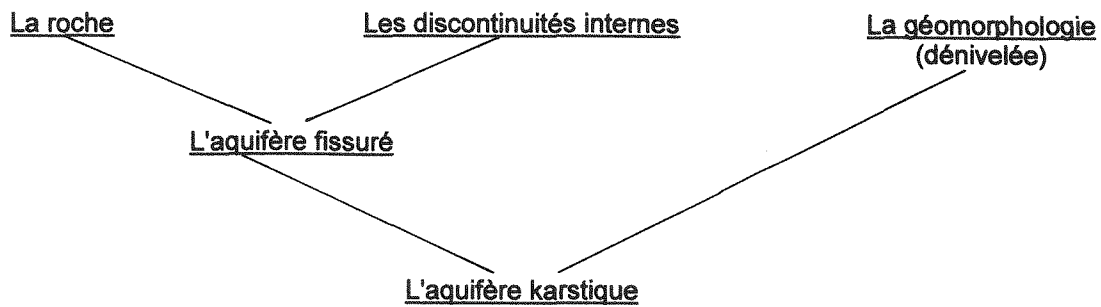
La Nature n'apprécie ni les tiroirs, ni les frontières : elle a trop d'imagination et de fantaisie pour se laisser cloisonner ainsi!

Le **paysage karstique** est caractérisé par tout un ensemble de formes que nous ne décrivons ni n'évoquons ici . Disons simplement qu'il se comporte avant tout comme un domaine à la surface duquel l'eau ne ruisselle que sur de très courtes distances avant de s'infiltrer dans le sous-sol. C'est le pays des vallées sèches, des vallées aveugles, des dolines et autres dépressions fermées . Lorsque la roche est nue, on parle de **lapiaz** et de ses formes d'érosion, les **lapiès**.

En fait, l'érosion agissant surtout dans les premiers dix ou vingt mètres sous la surface, et même plus bas dans un karst de haute montagne, les apparences extérieures sont partiellement sauvées. Miné dans les failles secrètes de son être, le karst n'en garde pas moins bonne et solide allure dans sa carapace qui défie le temps. Il peut ainsi continuer à regarder de haut la vallée vers laquelle s'écoulent loin du soleil ses eaux enfouies.

Le paysage karstique, est analysé de façon très agréable à lire dans l'ouvrage de Jean Nicod cité en bibliographie.

2.1. La préparation du milieu.



2.1.1. Les roches à vocation karstique (fig. 1 et 2).

Au sens strict du terme, un karst est un paysage façonné par l'érosion en milieu soluble. Toute roche soluble soit à l'eau claire soit à l'eau chargée d'un principe chimique actif a donc une vocation karstique. On connaît ainsi des karsts dans le sel (rares, vu la grande solubilité de ce milieu - cf. *Karstologia* n°24) et dans le gypse (cf. *Karstologia* n°17 : Vanoise; n°6 et 16 : Espagne; n°8 : Italie; n°20 : Argentine). Il en existe même dans des grès (*Karstologia* n°16 : Pologne et n°23 : Niger) et dans des quartzites (*Karstologia* n°5, 11-12 : Venezuela et n°9 : Afrique du Sud).

Les cavernes dans la glace ne relèvent pas d'un processus de karstification, mais d'une simple transformation physique par fusion. On ne parlera donc pas de karst en glacier ... Quant aux tubes de laves basaltiques (îles d'Hawaii ou de la Réunion) ce sont simplement des conduits abandonnés par une lave encore fluide alors que l'enveloppe avait durci. Donc là non plus, il ne faut pas parler de karst.

Calcaires et dolomies

Les roches calcaires ou dolomitiques, respectivement carbonates sédimentaires de calcium, et de calcium + magnésium, forment l'immense majorité des karsts du globe. Ces roches sédimentaires ont le plus souvent une origine marine mais il existe aussi des calcaires lacustres. Certaines formations carbonatées se sont déposées à l'état de boues parfois truffées de fossiles, d'autres se sont édifiées en récifs sur la marge de continents (fig. 1) ou sur des hauts fonds. La nature des roches carbonatées est très variée mais pratiquement toutes proviennent d'une activité biologique (animale ou végétale) dont le résultat final est la précipitation de carbonate de calcium - sous forme d'aragonite ou de calcite. Le carbonate initial est donc essentiellement une roche calcaire. La dolomie ne se dépose directement que dans des conditions exceptionnelles.

En effet, celle-ci se forme généralement par transformation plus ou moins tardive d'un calcaire au sein duquel une partie des atomes de calcium est remplacée par des atomes de magnésium. Ce processus qui fait appel à l'imprégnation du substrat calcaire par des saumures magnésiennes est appelé "dolomitisation".

Il existe tous les intermédiaires entre les calcaires purs et les dolomies. On parle alors de calcaires dolomitiques ou magnésiens.

Calcaires et dolomies peuvent être plus ou moins purs. Ils peuvent contenir de l'argile ou du sable. On parle de marne lorsque la teneur en argile se tient entre 35 et 65%, de calcaire argileux ou marneux au dessus, et d'argiles calcaireuses ou marnes argileuses au dessous. Concernant les carbonates plus ou moins riches en sable, on parle de calcaires (ou dolomies) gréseux ou de grès calcaires (ou dolomitiques).

Marnes et calcaires gréseux peuvent être karstifiables.

Carbonates de plates-formes.

La plupart des calcaires et dolomies des grands karsts classiques du monde sont ce qu'on appelle des carbonates de plates-formes. Ils se sont formés dans des mers peu profondes, dans des eaux plutôt tièdes et limpides: calcaires bio-construits (récifs) ; calcaires bio-détritiques ou bioclastiques (truffés de débris organiques, coquilles et autres); calcaires massifs à grain fin (anciennes boues carbonatées); brèches de talus au front des plates-formes et des récifs (les brèches sont des agglomérats cimentés de débris anguleux) ; calcaires oolithiques ; etc ...

L'ouvrage de B. Collignon (voir référence en bibliographie) donne un excellent aperçu sur la classification moderne des calcaires (p. 16 à 22). Voir aussi les traités de géologie générale.

En Europe, le Trias, le Jurassique et le Crétacé sont les grandes périodes de carbonates de plates-formes (pour ne parler que de la France: Alpes, Jura, Pyrénées, Causses, marges du Bassin Parisien ...). Dans les Alpes et les Pyrénées, ces formations sont souvent épaisses et très pures, d'où la "qualité" des réseaux spéléologiques.

Mais de par le monde, d'autres ères furent favorables au développement de carbonates de plates-formes: Chine, depuis le Précambrien (voir *Karstologia* mémoire 4); Afrique du Sud, au Précambrien ; U.S.A., au Permien et au Carbonifère ...

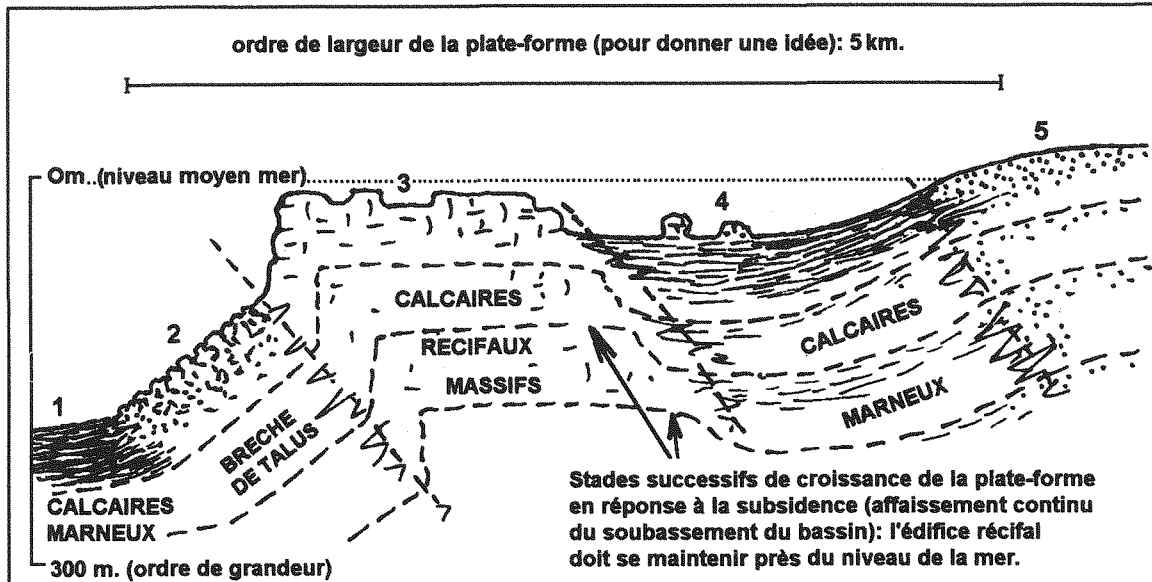


Fig. 1 : Coupe schématique à travers une plate-forme carbonatée récifale.

1 : Bas de talus (bassin): boues calcaires, calcaires marneux; 2 et 3 : Plate-forme externe (plate-forme proprement dite). 2 : talus (brèches calcaires à débris organiques); 3 : récif et zones inter ou périrécifales (calcaires bioconstruits et calcaires massifs à débris d'organismes constructeurs: coraux, rudistes, algues calcaires...); 4 et 5 : Plate-forme interne (arrière récif et plages). 4 : arrière récif et lagon(s) (boues calcaires et calcaires marneux coquilliers); 5 : zone soumise aux marées ou zone intertidale (calcaires et sables coquilliers = lumachelles, calcaires oolithiques...)

2.1.2 Les discontinuités (fig. 2 et 3).

Une fois consolidé en roche, un carbonate est le plus souvent compact et imperméable. Mais la masse carbonatée a la propriété d'être "hachée" de discontinuités de toutes sortes :

- soit précoces, c'est à dire formées durant la sédimentation, ou tout juste après . On dit alors qu'elles sont **syndépendantes**. Ce sont les **joint de stratification**; les fentes de retrait (dessiccation); les fissures et les vides entre les éléments d'une brèche; les effets d'une karstification presque contemporaine du dépôt (émersion temporaire - cas d'une plate-forme ou d'un récif corallien, par exemple)...

- soit plus ou moins tardives, provoquées en général par les événements tectoniques ayant affecté ultérieurement le massif rocheux. C'est la **fracturation** au sens large du terme, avec propension à l'ouverture de fentes perpendiculaires ou sensiblement obliques par rapport à l'axe de la contrainte minimum ; fissures, fentes et diaclases provenant de la déformation des strates (plis, flexures, gauchissement : fissures et fentes d'extrados) ; failles (fractures avec rejet) ; fentes de décollement de versant; brèches tectoniques à éléments disjoints ...

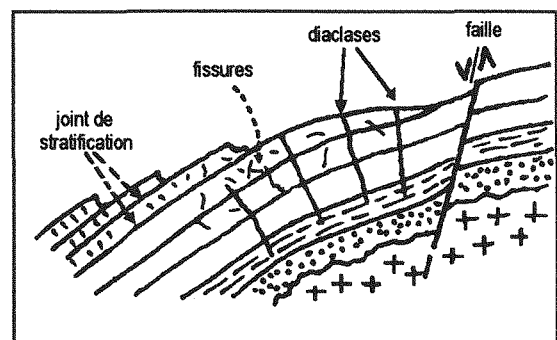


Fig. 2 : Discontinuités dans la roche.

Toutes ces discontinuités contribuent à doter le massif carbonaté d'une "perméabilité en grand" et vont lui permettre en conséquence de se comporter en **aquifère** (c'est-à-dire en réservoir d'eau).

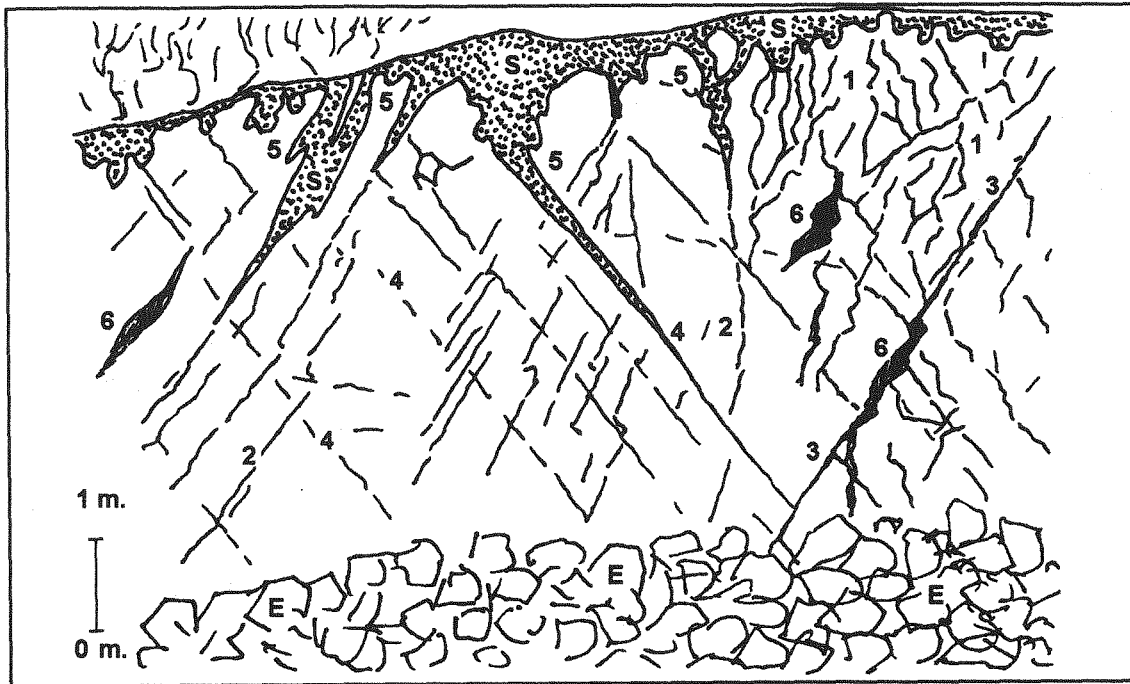


Fig. 3 : Les discontinuités dans la masse calcaire (réseau de fissures ou de fentes).
(d'après un exemple réel : carrière d'Asson, Pyrénées Atlantiques)

1 = fissures ; 2 = diacrise ; 3 = faille ; 4 = joint de stratification (limite entre deux strates) ; 5 = fentes élargies par dissolution en surface ; 6 = petites cavités comblées ; S = humus + sol minéral ; E = éboulis.

2.2. La préparation du cadre morphostructural, les conditions de base de la karstification.

2.2.1. La "mise en forme(s)": Individualisation géomorphologique de l'unité karstifiable - vers le karst.

Pour que l'eau soit entraînée à circuler à travers un massif rocheux à la faveur d'un réseau de discontinuités interconnectées, il faut y "mettre les formes". Or la formation rocheuse élaborée au dessous du niveau de la mer, souvent entraînée à de grandes profondeurs par la subsidence (c'est à dire l'affaissement régional de l'écorce terrestre), recouverte parfois par des milliers de mètres de sédiments plus récents, va être tôt ou tard reprise dans l'éternel processus des déformations qui affectent depuis les origines du monde la surface du globe.

Ces mouvements et leurs conséquences sur l'attitude de l'écorce terrestre sont englobés sous le vocable de tectonique. La **tectonique** est l'étude des déformations de l'écorce terrestre : fractures, failles, plissements, etc... C'est aussi le qualificatif des déformations. Lorsque les choses deviennent plus "sérieuses" et aboutissent à la formation de montagnes, on parle d'**orogénèse** (c'est à dire genèse du relief) et de mouvements orogéniques.

La discipline géologique spécialisée dans l'étude des phénomènes tectoniques et l'analyse des déformations de l'écorce terrestre est la **géologie structurale** : étude de la "structuration" de l'écorce terrestre.

Ainsi donc, reprise dans les mouvements **tectoniques** ou **orogéniques**, la formation carbonatée va être soulevée au dessus du niveau de la mer, découpée en vastes compartiments, basculée, plissée, "maltraitée" avec plus ou moins de vigueur. Dans tous les cas, elle subira une évolution structurale. Simultanément, elle sera progressivement libérée de sa couverture et se trouvera dès lors soumise à l'érosion. La conséquence géomorphologique de l'aventure sera peut-être un massif calcaire aux formes bien faites pour une longue existence de karst.

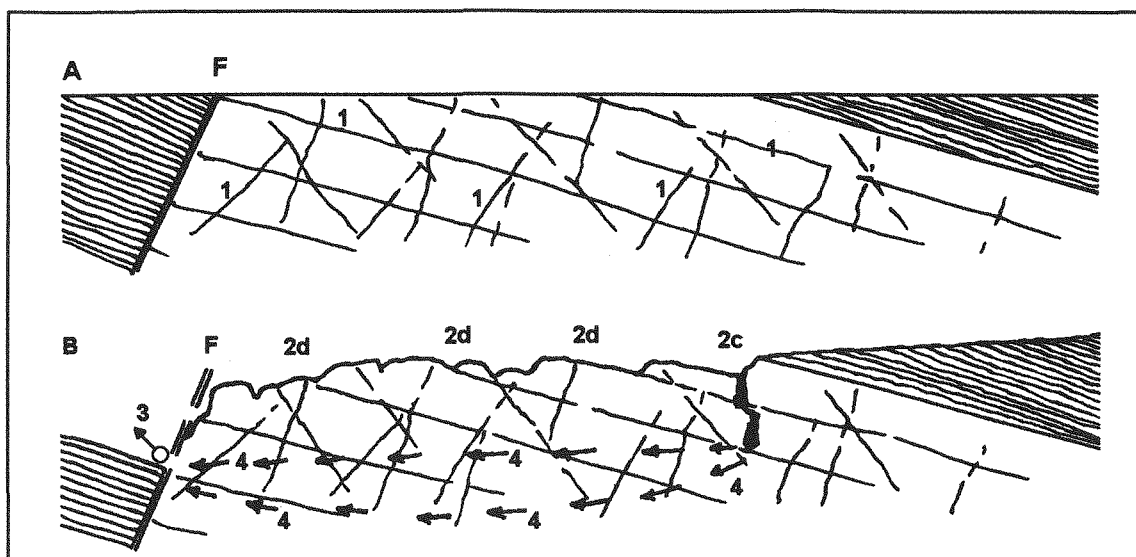


Fig. 4 : Les discontinuités dans la roche : connexions hydrauliques potentielles dans une unité karstifiable = condition préalable à l'établissement d'un écoulement ou flux.

En A, les discontinuités existent et sont déjà interconnectées mais l'absence de dénivelée interdit tout écoulement à travers l'aquifère; en B, le jeu de la faille (F) et le creusement du thalweg ont produit la dénivelée indispensable. L'écoulement s'amorce... 1 : discontinuités interne formant un réseau continu; 2 : zones d'infiltration (c = concentrée ; d = diffuse) ; 3 : zone d'émergence (exutoire) ; 4 : lignes de flux (ou courant).

La figure 4 schématise à l'extrême les conditions géomorphologiques indispensables à l'établissement d'un écoulement (ou flux) au travers d'une masse rocheuse fissurée. Mais la Nature fait preuve d'une imagination infinie.

Selon le contexte géologique (structural) et le cadre géomorphologique façonné par l'érosion (pour être bref et concis, on englobe le tout sous le terme "morphostructural") l'unité karstifiable revêtira des allures de plateau tabulaire plus ou moins horizontal ou penté (causses, Pierre-Saint-Martin), de synclinal (Verneau) - parfois perché (Vercors), de dalle fortement plongeante (désert de Platé, Iseye dans les Pyrénées), de chaînon ou "barre" en pays plissé (chaînons nord-Pyrénéens).

La figure 5 montre quelques exemples d'unités karstifiables individualisées. Leur relief propre, dans le contexte géographique régional, les rend à priori susceptibles de devenir, sous l'emprise d'une circulation d'eaux agressives, des unités karstiques.

Leurs caractéristiques initiales d'aquifère fissuré ("porosité" de fissures) évolueront alors progressivement vers la condition d'aquifère karstique, avec toutes les spécificités qu'implique cette appellation, et d'abord cette dualité entre un intense réseau de fissures faisant du massif calcaire une "éponge" indéfiniment rechargeable au gré des précipitations, et un réseau ordonné de conduits, dit spéléologique, jouant vis-à-vis du massif de rôle de système de drainage.

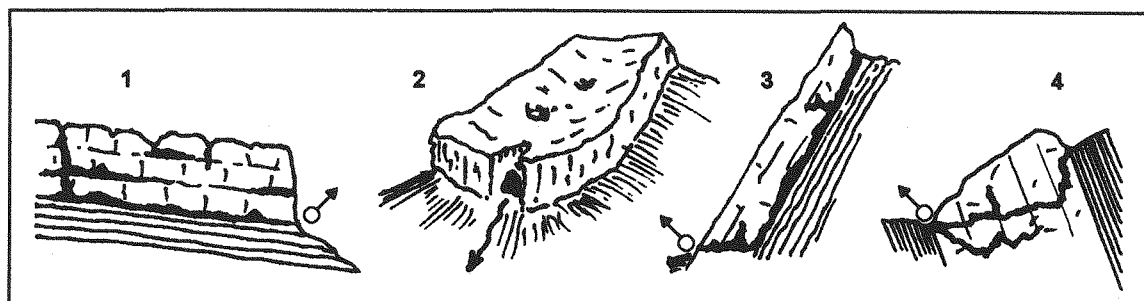


Fig. 5 : Exemple d'unités morphostructurales karstifiables.

1 = Plateau (karst perché) ; 2 = Synclinal perché ; 3 = Dalle pentée ; 4 = Chaînon ou barre calcaire enracinée (karst barré).

Influence du contexte morphostructural sur le développement et la structure de l'endokarst.

On entend par **endokarst** la partie interne du karst, par opposition à **exokarst**, sa surface et plus généralement son enveloppe extérieure. Nous allons tenter d'en comprendre le fonctionnement et le développement. Ainsi apparaîtront déjà, dans une **démarche logique**, les fondements essentiels d'une structure. Il ne nous restera plus alors, dans un chapitre suivant, qu'à compléter l'édifice.

Considérant le **cadre morphostructural** de l'unité karstifiable, on distingue essentiellement deux types de karsts (fig. 5).

- **Le karst perché** : l'unité karstifiable qui repose sur une **semelle imperméable** (= "niveau de confinement" basal) est perchée au dessus des vallées avoisinantes. C'est cette semelle qui **constitue le niveau de base karstique** - voir plus loin. De ce fait, il n'existe pratiquement pas de zone noyée (voir fig. 7).

- **Le karst barré** : l'unité karstifiable **s'enracine sous le niveau de base régional** (voir fig. 7). Dans ce cas, la zone noyée peut être importante.

Une unité karstifiable en forme de synclinal peut appartenir à l'un ou l'autre type de karst selon que son axe plonge sous le niveau de base ou reste au dessus.

Observons une unité karstifiable érigée en relief bien individualisé. Elle domine la scène de toute sa hauteur. Les vallées ou la plaine en contrebas contrôlent un niveau de base **régional** ou **géographique**. C'est le niveau de raccordement de tout le drainage superficiel ou souterrain de la région. C'est aussi en conséquence le niveau des sources pérennes.

2.2.2. Conditions de la karstification.

Dès que les conditions géomorphologiques sont favorables, c'est à dire dès que le bout de calcaire a l'audace d'élever le crâne au dessus des ruisseaux environnants, le massif carbonaté est soumis à l'érosion karstique. Celle-ci, et les spéléos en sont les fidèles témoins, affecte la surface comme le sous-sol profond. En fait, la profondeur atteinte par la karstification sous la surface dépend beaucoup du cadre morphostructural.

Une karstification menée selon les règles de l'art requiert: 1) un réseau de fissures par lequel un solvant puisse circuler de la zone d'alimentation à l'exutoire du système; 2) ledit solvant ou agent chimique actif capable d'"agresser" le milieu et d'y ouvrir un réseau de conduits; 3) une force motrice capable d'entretenir la circulation du solvant entre zone d'alimentation et exutoire.

1) Le réseau interconnecté de fissures: condition indispensable à l'existence d'une "conductivité hydraulique".

Nous l'avons déjà évoqué plus haut: tout commence par l'établissement préalable d'une **connexion** entre zones hautes et zones basses du massif. En effet, pour qu'un écoulement puisse s'amorcer, il faut qu'il existe, comme pour le courant électrique, une possibilité de cheminement continu entre les zones où l'eau s'infiltré et celles où elle doit ressortir (fig.4). C'est cette possibilité d'établir un **flux** entre deux "bornes" de potentiel différent (**potentiel hydraulique**) qui va amorcer le mécanisme. Si j'insiste autant sur ce point, c'est qu'il est primordial. Sans cette **condition initiale**, rien ne se passera et aucun conduit ne pourra s'ouvrir au sein d'une roche rigoureusement compacte!

Nous l'avons déjà appris également : les **discontinuités internes** de l'unité karstifiable forment un **réseau continu**, interconnecté, entre les amonts et l'aval du massif. Ce sont elles qui assureront la "conductivité" hydraulique de la masse rocheuse ou plus exactement sa **transmissivité** (fig. 4 et page 21).

L'infiltration (fig. 4).

L'alimentation hydrique (c'est à dire en eau) de l'unité karstifiable est assurée par les **précipitations** tombant dans le périmètre de l'impluvium de celle-ci (p. 16). Dans le karst binaire, on distingue deux modes d'infiltration :

- des **points spécifiques d'infiltration** concentrée, là où le ruissellement drainant les parties imperméables du bassin versant aborde le terrain karstifiable et s'y perd en profondeur : on parle de **pertes**.
- et sur **toute la surface d'affleurement du karst** (fentes et crevasses du lapiaz), parfois même à **travers une couverture apparemment imperméable**, une infiltration **directe** mais **diffuse**, plus ou moins **différée** selon la perméabilité de la surface du karst.

2) Le solvant du milieu carbonaté : l'association eau - gaz carbonique.

On sait que l'eau des précipitations, pluie ou neige, est légèrement **agressive** vis-à-vis des carbonates en raison de l'**acidité** que lui confère le **gaz carbonique** (CO₂) en solution.

Ce gaz carbonique (ou, dans le jargon technique, "**dioxyde de carbone**"), provient de trois sources d'influence très inégale :

- l'**atmosphère** ;
- l'**activité biologique** au sein des **sols végétaux** à travers lesquels l'eau percole ;
- des **émanations profondes** d'origine variée, souvent volcanique.

La teneur en CO₂ du sol peut être dix à cent fois supérieure à celle de l'atmosphère (0,03 à 2,3 %).

Le gaz carbonique est plus soluble dans les eaux froides (haute montagne, pays circum-polaires) que dans les eaux tièdes (climats chauds ou tempérés).

L'eau froide serait donc en principe **plus agressive** que l'eau tiède. Mais c'est dans les régions tempérées, et à plus forte raison dans les pays tropicaux humides, que les sols sont le mieux développés et le plus riche en dioxyde de carbone. L'eau du ciel trouve donc là de bonnes occasions de s'enrichir en CO₂ en percolant à travers les sols avant de s'infiltrer dans les fissures du calcaire. Elle est de ce fait plus rapidement et plus fréquemment que dans les zones froides, **saturable** en gaz carbonique et, par voie de conséquence, également en **bicarbonate dissous**. Cette relation entre la vigueur du couple eau-CO₂ et le milieu climatique ambiant a une certaine influence sur l'équilibre "dissolution de la roche versus reprécipitation du carbonate dissous" tout au long du trajet de l'eau dans l'endokarst. A tel point que l'importance du concrétionnement est souvent, pour la période quaternaire, un indicateur climatique de réchauffement interglaciaire.

La corrosion chimique : une déstabilisation de l'édifice calcaire.

Le gaz carbonique dissous dans l'eau ne serait pas vraiment agressif si cette dissolution ne produisait ce que l'on appelle des "ions" actifs capables de déstabiliser CO₃Ca, la molécule de calcite dont est fait le calcaire. Ces ions actifs, agents virulents en quelque sorte, sont le produit de la dissociation partielle du dioxyde de carbone et de l'eau réagissant l'un par rapport à l'autre. L'eau (H₂O) libère des ions hydrogène (H⁺) prompts à s'associer aux ions CO₃⁻ du calcaire tandis que le CO₂ se combine à l'eau pour donner CO₃H⁻ qui agit en acide, agressant la molécule de calcite : l'atome de calcium libéré part en solution sous forme de bicarbonate soluble (CO₃H)₂ Ca.

En résumé, on a la réaction réversible : H₂O + CO₂ + CO₃Ca ↔ ((CO₃H)₂ Ca

Autres agents chimiques susceptibles d'attaquer le calcaire.

Le dioxyde de carbone est l'agent chimique le plus habituel de la karstification. Mais d'autres "solvants" peuvent intervenir avec plus ou moins d'impact dans certaines conditions particulières. Leur rôle reste néanmoins très marginal.

Acide sulfurique et dépôt de gypse.

Les roches argileuses sombres parfois associées au calcaires contiennent souvent de la pyrite, ou sulfure de fer FeS₂. Celui-ci s'oxyde selon un processus complexe au cours duquel apparaît l'acide sulfurique SO₄H₂ qui attaque le calcaire en produisant du sulfate de calcium. Celui-ci précipite sur les parois sous forme de gypse (sulfate de calcium hydraté SO₄Ca-2H₂O).

Autre source d'acide sulfurique: les "fuites" d'hydrogène sulfuré (H₂S) émanant de gisements de pétrole ou de gaz ou résultant, dans le même contexte, de la réaction de couches de gypse au contact d'hydrocarbures. En présence d'eau, H₂S s'oxyde en SO₄H₂, agent corrosif. La merveilleuse grotte de Carlsbad, au Nouveau Mexique (Etats Unis d'Amérique) en est l'ouvrage le plus spectaculaire.

Acides humiques.

Ces acides organiques complexes sont le produit de l'activité bactérienne dans les sols. Ils peuvent atteindre dans les eaux d'infiltration des concentrations suffisantes pour jouer un rôle non négligeable dans les processus de karstification.

L'infiltration agressive ouvre la voie, l'érosion mécanique suivra.

L'eau agressive qui pénètre dans les fissures du massif carbonaté va élargir celles-ci au point d'ouvrir des **vides suffisants** pour laisser passer à l'occasion des eaux chargées en **matériaux abrasifs** (sables, graviers, et même plus gros...). Ainsi, l'érosion de l'endokarst débute par une "insidieuse" **corrosion chimique** qui élargit les discontinuités initiales **préexistantes** et peut se poursuivre, surtout en montagne et sous des climats très humides, par un **processus mixte** dans lequel l'**abrasion mécanique** peut devenir importante, voire prépondérante (ouverture de canyons par "marmitage" ou creusement de "marmites de géants").

Notions de "taux d'ablation spécifique" (ou taux de dissolution spécifique)

Il est possible d'évaluer pour un massif calcaire donné la masse de carbonate de calcium évacuée sur une année par le ou les systèmes karstiques en présence. Il "suffit" pour cela de connaître le débit annuel cumulé des sources à la sortie du massif et la teneur moyenne des eaux en calcium ou en bicarbonate. Le "**taux d'ablation**" du karst est donné soit en millimètres par millier d'années, soit en $m^3 / km^2 / an$ (ou mètres cubes par kilomètre carré et par an).

En mm / 1000 ans, on ramène tout à une ablation fictive ne concernant que la surface du karst. Or, si la corrosion est effectivement plus intense dans les quelques mètres ou la dizaine de mètres sous la surface immédiate du massif, elle demeure efficace en profondeur dans les conduits actifs ou arrosés, élargissant galeries, puits et salles. Et dans cette entreprise de démolition, l'abrasion (érosion mécanique) n'est pas en reste!

Il est donc plus réaliste, plus satisfaisant pour l'esprit du spéléo, de parler de $m^3 / km^2 / an$. On évalue ainsi une masse globale par unité de surface du karst, comprenant tout ce qui est prélevé dans l'endokarst.

Mais l'affaire n'est pas si simple. D'abord, on ne prend en compte que la matière dissoute, l'**ablation chimique**, alors que ce qui est enlevé au karst par l'**érosion mécanique** et transporté à l'état solide peut compter pour beaucoup, surtout dans un massif de montagne. Ensuite, il y a les apports extérieurs : 1) par la **pluie** déjà, dont l'eau n'est jamais pure, étant contaminée par des **poussières** ou des **aérosols** divers; 2) dans le cas d'un karst binaire, par les cours d'eau drainant et lessivant la **surface non karstique** du bassin versant. Voir aussi à ce sujet l'encadré page 16 et 17.

D'autre part, le **concrétionnement** fixe dans l'endokarst une partie de la matière dissoute qui échappe ainsi à l'analyse.

Enfin, les conditions climatiques ayant évolué au cours des millénaires et même des siècles, les paramètres concernant le débit annuel et la concentration en carbonates ont forcément varié, d'où une autre inconnue à considérer.

3) Le moteur du système : la charge hydraulique (fig. 6 et 7).

La **force motrice** du karst gravitaire, c'est bien sûr la gravité, plus précisément la **charge hydraulique**. Entre les points d'infiltration et la zone d'émergence existe une **dénivelée** : on verra en abordant la structure du karst que l'eau qui percole à travers le massif traverse d'abord une zone aérée, puis atteint un niveau au dessous duquel tous les vides de la roche sont noyés. A partir de là, l'eau s'écoule au gré du réseau de fissures en suivant un **gradient de pressions** qui la "pousse" des pressions les plus élevées vers le point où la pression est la plus basse.

On appelle "**gradient**" le taux de **variation** d'une grandeur par unité de distance. Par exemple, une pente de 100 m de dénivelée pour 1000 m de distance horizontale a un "gradient de pente" de 10%. Le gradient de température sous la surface du sol est en moyenne de 1°C pour 35 m ... etc...

Le gradient qui pousse les eaux souterraines à se déplacer est le **gradient de pression** ou de **charge hydraulique** entre le point le plus haut de mise en charge et l'exutoire. Plus brièvement, on parle de **gradient hydraulique** (fig. 6 et 7).

En assimilant la charge hydraulique à la hauteur "H" d'une colonne d'eau (poids : 1kg pour une colonne de 10 m avec une section de 1 cm^2 - soit une pression à la base de $1\text{ kg} / \text{cm}^2$) et en appelant "D" la distance entre le point où H est maximum et celui où il est minimum (l'exutoire), le rapport H / D définit le **gradient hydraulique** (fig. 6).

"H" est donc mesuré ou évalué par rapport à la référence que constitue le niveau le plus bas du système, celui où se situe l'exutoire. C'est le **niveau de base**. Car la pression qui fait mouvoir l'eau dans le réservoir est bien la surcharge de liquide existant au dessus de cette base.

La **figure 6** permet d'assimiler le gradient hydraulique à une **pente fictive** sur laquelle ruissellerait l'eau.

Nous verrons en abordant la structure du karst qu'au dessus de la zone noyée, c'est à dire dans la zone non saturée, on peut parler de pente réelle, tandis que dans le milieu noyé, c'est effectivement d'une pente fictive qu'il s'agit.

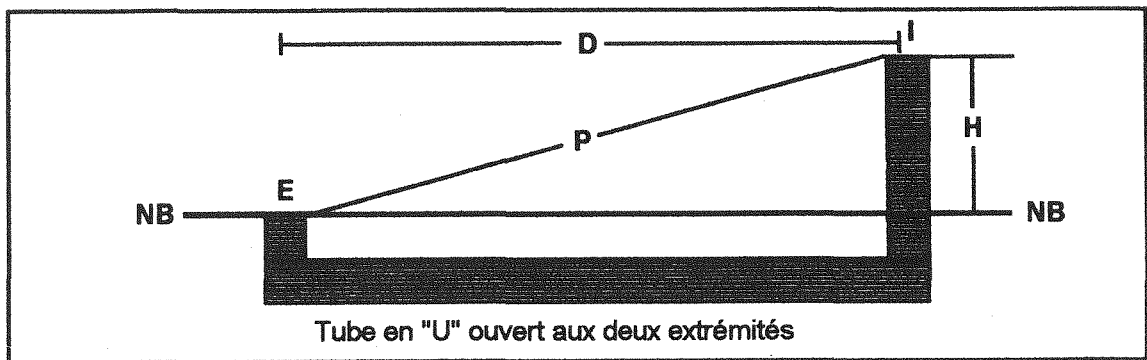


Fig. 6 : Charge et gradient hydrauliques.

Le tube "U" est alimenté en eau à son extrémité "I" (pour "infiltration") et le liquide s'échappe en "E" ("exutoire"). "E" définit le niveau de base "NB" ; "H", la hauteur de la colonne d'eau au dessus de NB, est la charge hydraulique ; "D" = distance horizontale entre "I" et "E". Le rapport H/D représente le gradient hydraulique, assimilable à la pente "P".

Quelques précisions sur un vocabulaire et des notions semés d'embûches ...

(N.B. : dans ce qui suit, l = litres, s = secondes, km = kilomètres, m = mètres, mm = millimètres, ...)

Le volume annuel des précipitations se mesure en hauteur d'eau cumulée (en millimètres) par surface unitaire (m² ou km²). C'est le "potentiel hydrique brut", ou la totalité des ressources alimentant un impluvium donné. 1 mm de hauteur de pluie par m² = 1 l / m² ou 1 million de litres / km² (10⁶ l / km²).

La hauteur cumulée annuelle des précipitations (pluie + équivalent en eau de la neige) est désignée par : **P (mm / an)** = lame d'eau cumulée brute.

Pour simplifier, limitons-nous à un impluvium desservant un karst dont on connaît tous les exutoires et qui ne reçoit aucun apport autre que celui des précipitations immédiates (ni cours d'eau de surface ni sous-écoulement en provenance de l'extérieur). Autrement dit, impluvium et bassin(s) versant(s) de l'ensemble du karst sont confondus.

P ne s'infiltré pas intégralement : la lame d'eau effectivement infiltrée dans le sous-sol (pour nous, le karst), est définie par la formule simplifiée : **I = P - (ETr + Rex)**

- où I = lame d'eau effectivement infiltrée;
- ETr** = évapotranspiration (évaporation directe, sublimation, transpiration du couvert végétal);
- Rex** = ruissellement quittant l'enceinte de l'impluvium sans s'être infiltré.
- (I, ETr, Rex en mm / an)

Théoriquement, on peut connaître I en mesurant la **lame d'eau écoulee (Lec)** cumulée sur un an par l'ensemble des exutoires du karst . En effet, Lec peut être déduit du **module annuel** (= débit moyen annuel) **Qma** de l'ensemble des sources du massif. Qma permet de connaître le potentiel en eau d'un karst. Le rapport I / P ou Q / P définit le coefficient d'infiltration.

A partir de **Qma**, on **pourrait**, connaissant la surface S de l'impluvium, définir également le **débit spécifique q** : c'est le débit moyen annuel par unité de surface de l'impluvium :

$$q \text{ (en l / s / km}^2\text{)} = Qma / S \text{ (km}^2\text{)}$$

Mais la surface d'un impluvium est parfois très difficile à définir, sauf si le massif est bien isolé sur le plan morphologique. On est donc plus souvent amené à calculer S en fonction de Qma et q.

On notera au préalable que **Qma** ou **q** peuvent s'appliquer soit à un massif karstique entier, soit à une émergence spécifique et, de là, au bassin d'alimentation dont dépend celle-ci. Dans un cas comme dans l'autre, connaissant **Qma** (par l'enregistrement continu du débit) et **q** (déduit du calcul de I), on peut donc évaluer soit la surface de l'impluvium alimentant l'ensemble du massif karstique, soit l'aire du bassin versant propre à une source ou zone d'émergence donnée, à partir de la formule fort simple : **S = Qma / q**

Evaluation de la vitesse d'érosion chimique du karst (dissolution spécifique).

Connaissant Q_{ma} ou q , ainsi que la teneur moyenne annuelle en bicarbonates C de l'eau pour l'ensemble des exutoires d'un karst, on peut évaluer la quantité de calcaire dissous évacuée annuellement hors de ce karst : c'est la **dissolution spécifique F** (en $m^3 / km^2 / an$). On parle aussi d'**ablation spécifique** (en mm de calcaire pour 1000 ans).

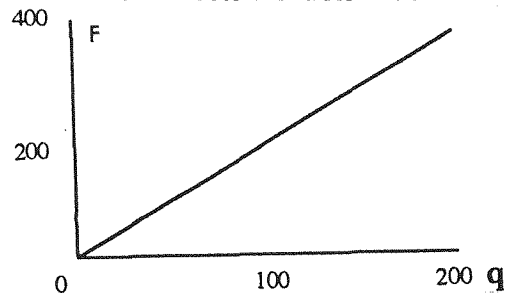
$$\text{Formule générale : } F = Q_{ma} \times C$$

Dans un karst binaire, toute l'eau tombant sur l'impluvium transite à travers le massif calcaire (déduction faite de E_{Tr} et R_{ex}). Q_{ma} comprend donc la partie des précipitations tombant sur les terrains imperméables en amont du karst. Cet apport supplémentaire au débit cumulé traversant les calcaires participe bien entendu à leur dissolution. Ainsi, pour un karst dont la surface S_k ne serait qu'une fraction N de la surface totale S_t de l'impluvium ($S_k = N \times S_t$), considérant la formule $Q_{ma} = q \times S_t$, on obtient la relation $F = q \times S_t \times C$ ou, en ramenant le tout à S_k , puisque $S_t = S_k / N$:

$$F = q \times S_k / N \times C = q \times S_k \times C / N$$

Exemple : pour $N = 0,70$, F est en réalité accru d'un facteur $1 / 0,7$, soit 1,43. C'est facile à comprendre : les 70% de q tombant directement sur le karst entraînent déjà leur part de la concentration C , et les 30 % arrivant du reste de l'impluvium en rajoutent, contribuant de leur côté à entretenir F .

La **dissolution spécifique** est donc **fonction essentiellement de la quantité d'eau transitant dans l'aquifère karstique, donc du module annuel ou du débit spécifique, donc du régime des précipitations**. Car en fait la teneur moyenne C en carbonates dissous (dureté de l'eau) varie peu en fonction du climat (M. Bakalowicz, in "Karst et évolutions climatiques").



Relation entre F (en $m^3/km^2/an$) et q (en $l/s/km^2$) pour un assortiment varié de karsts. D'après M. Bakalowicz "Karst et évolutions climatiques".



Polje d'Elsarreko Ordokia, massif des Arbailles (Pyrénées Atlantiques). Photo Tony LEVEQUE.

3. STRUCTURE ET ORGANISATION DU KARST ; SPECIFICITE DE L'AQUIFERE KARSTIQUE.

Ainsi donc, l'unité karstifiable, hachée et parcourue de toutes les discontinuités qui tendent à en faire un réservoir fissuré, c'est à dire dont le contenant est fait d'un réseau de fissures, destinée par son évolution morphostructurale à devenir un karst, va être dirigée, en fonction de l'orientation "décidée" par la Nature, vers l'option de karst perché ou celle de karst barré.

La **figure 7** schématise ces deux directions possibles proposées par le cadre géologique. Dans la première, nous l'avons déjà vu, en dehors de quelques siphons perchés souvent temporaires, il n'y a pas de zone noyée ... ou très peu.

Dans la seconde par contre, on trouve toutes les figures qu'un karst est autorisé à imaginer. Y compris de profondes zones noyées avec sources vauclusiennes au vrai sens du terme, c'est à dire la présence de conduits remontants allant chercher leur eau à des dizaines de mètres sous le niveau de base.

Nous retrouvons là le schéma de la **figure 6**. Mais, dans l'approche du moteur de l'écoulement, nous pourrions distinguer le karst perché et les amonts non noyés du karst barré d'une part, et d'autre part la zone noyée du karst barré.

Dans le premier cas, l'écoulement s'organise en fonction de **pentés réelles** tout comme pour un réseau hydrographique de surface. Dans le second, le gradient hydraulique dans la zone noyée peut être assimilé à une **penste fictive** orientant le flux vers l'exutoire. Ce n'est donc que dans ce dernier cas que l'on pourra parler de gradient de pressions, **gradient (de charge) hydraulique** : voir ci-après "niveau de base et surface piézométrique".

Le karst barré étant en mesure d'intégrer la plus grande variété de situations, c'est lui qui nous servira de modèle pour la suite de notre démarche.

Structure de l'endokarst : le modèle du karst barré.

Pour simplifier, nous admettrons que cette unité ne comprend qu'un seul système karstique aboutissant à une émergence unique.

L'aquifère karstique est donc barré en aval par une **barre** ou **éponge** imperméable. Dans ce contexte, le point topographique le plus bas de ce barrage matérialise le **niveau de base local**, propre à l'unité karstique, appelé pour cette raison "**niveau de base karstique**". C'est l'**exutoire** ou "**bec verseur**" du système.

Dans les parties hautes du massif s'étend la **zone d'alimentation** où se fait l'infiltration des **précipitations** (pluie et neige) et du **ruissellement de surface** (cas d'un karst binaire).

La **penste réelle** puis, en aval dans la zone noyée, le **gradient hydraulique**, définissent le chemin le plus court entre un point d'infiltration particulier et l'exutoire: c'est la direction et le sens théoriques du courant entre ces deux "bornes" extrêmes. L'écoulement tend à se rapprocher autant que possible de cette règle élémentaire.

Les **lignes de courant** qui forment dans leur ensemble le "spectre" de l'écoulement vont donc être orientées et disposées en fonction de ce **contrôle hydraulique**, entre le secteur assez large où s'opère l'infiltration, d'une part, et la zone plus restreinte du "bec verseur", d'autre part. On peut dès lors, si l'on connaît bien les zones d'infiltration et celle des émergences, établir sur la carte du karst un **spectre théorique des lignes de flux** ou des directions d'écoulement. C'est une première façon d'aborder un karst dont on ne connaît que la topographie de surface et la disposition du ou des exutoires.

Niveau de base et surface piézométrique.

Les notions qui suivent sont illustrées sur la **fig. 8**.

L'eau qui s'infiltré dans l'**aquifère calcaire fissuré** traverse d'abord une zone où l'air peut circuler librement dans le réseau de discontinuités interconnectées. C'est la **zone aérée**, dite aussi **non noyée**, **non saturée** (d'eau), ou encore **vadose** (terme utilisé surtout dans le jargon anglo-saxon mais qui tend à s'affirmer chez nous aussi). On parle aussi, et pour cause, de **zone de transfert vertical**.

A partir d'une certaine profondeur, tous les vides de la roche sont saturés d'eau. C'est la **zone saturée**, ou **zone noyée**, ou encore **phréatique** dans le jargon anglo-saxon.

La limite entre la zone vadose et la zone phréatique n'est pas, contrairement à un usage trop courant, le niveau de base. Celui-ci, rappelons-le, est le **plan horizontal fictif** passant par l'exutoire pérenne du massif. La limite en question se raccorde également à l'exutoire mais elle s'élève à l'intérieur du massif pour se tenir plus ou moins haut au dessus du niveau de base. C'est la **surface piézométrique**.

Son explication est simple. En effet, l'eau qui percole dans le réservoir fissuré est freinée par l'exiguïté des vides du réseau de fissures et la rareté relative des drains, surtout lorsque la karstification est peu avancée. L'eau se met donc **en charge** dans le massif, jusqu'à une certaine hauteur que contrôle l'équilibre entre l'intensité de l'infiltration et le débit à l'exutoire. Si les apports de l'infiltration sont en excédent sensible (pluies fortes et soutenues), la surface piézométrique s'élève. S'ils sont déficitaires, elle s'abaisse.

Les puisatiers connaissent bien ce principe : la surface piézométrique correspond au niveau de l'eau dans les puits. Elle fluctue en fonction des saisons humides ou sèches.

Dans la **zone vadose** ou de transfert vertical, l'eau a donc suivi la pente réelle des discontinuités de la roche, ou éventuellement celle du substratum imperméable du réservoir calcaire (fig. 7). Elle descend au gré de ressauts, suivant une dynamique **torrentielle**. Dans la zone noyée, elle s'écoule plus tranquillement, voire très lentement, dans un **réseau complexe de fentes et de drains**. Pour être exact, c'est dans ce dernier milieu exclusivement, dit aussi parfois **zone de transfert horizontal**, que l'on appliquera la notion de **charge** et de **gradient hydrauliques**. La **charge** ou **pression hydraulique** correspond à la hauteur d'eau entre la surface piézométrique et le plan fictif du niveau de base (fig. 8). Et, nous l'avons déjà suggéré fig. 6, le **gradient hydraulique** peut être assimilé à la pente de la surface piézométrique.

La figure 9 illustre ces notions par un exemple réel tiré du versant oriental du karst de la Pierre-Saint-Martin.

Volume dynamique.

Si la surface piézométrique s'abaissait au point de venir se confondre avec le plan fictif du niveau de base, la charge hydraulique s'annulerait et tout écoulement vers les sources cesserait. L'espace compris entre la surface piézométrique et le niveau de base karstique est, de ce fait, qualifié de **volume dynamique** : tant qu'il est positif, les sources coulent; s'il s'annule, les sources tarissent.

Mais attention! Ce n'est pas là la seule définition du volume dynamique. Dans les karsts de haute montagne comme la Pierre-Saint-Martin par exemple, une bonne partie des précipitations reste perchée l'hiver sous forme de réserves dans les innombrables puits à neige. Cette eau est ensuite restituée tout au long de l'été par la fonte. Il est évident que de telles réserves participent à la constitution du volume dynamique.

La hauteur de la surface piézométrique contrôle la puissance de l'écoulement.

La **surface piézométrique** fluctue de façon irrégulière entre une hauteur maximum lors des périodes de précipitations intenses et prolongées - c'est le **niveau de crue** - et une hauteur minimum lors des périodes de sécheresse - c'est le niveau d'étiage. L'intervalle de fluctuation est dit "**zone de battement de nappe**" ou zone "**épinoyée**" ou encore "**épiphréatique**".

La charge hydraulique varie en fonction de ces montées et descentes du toit de la zone noyée. Or elle a une influence directe sur le débit à l'exutoire, d'où les **débites de crue** et les **débites d'étiage**. D'autre part, une montée importante du niveau de crue peut provoquer l'inondation des conduits normalement inactifs et amorcer des sources temporaires perchées au dessus du niveau de base (fig. 8).

L'aquifère karstique.

Petit à petit, nous nous sommes approchés de la notion d'aquifère karstique. Dans quelques lignes, nous verrons comment il évolue depuis l'état de réservoir fissuré vers celui de karst.

Considérons pour l'instant l'état final de karst évolué tel que le schématise la figure 8.

Dans la masse calcaire parcourue par un intense réseau de discontinuités interconnectées s'est installé un système de drainage fait de conduits plus ou moins spacieux. Dans la **zone aérée** ou **vadose**, il s'agit essentiellement de **conduits descendants** qui recoupent à l'occasion des galeries horizontales, témoins d'une ancienne activité du karst au niveau considéré.

La **zone épinoyée** est l'intervalle où se développent les grandes galeries horizontales.

La **zone noyée** est caractérisée par des conduits aux attitudes capricieuses, montant ou descendant tout en suivant l'orientation générale du gradient hydraulique, et dont la disposition est dictée par la géométrie du **système de fractures** le plus disponible.

En résumé, l'aquifère karstique présente donc une **dualité de vides**:

- 1) un réseau de fissures et de fentes qui font du massif une gigantesque éponge rigide susceptible d'emmagasiner de l'eau;
- 2) une "tuyauterie" ou système de conduits apte à alimenter l'éponge ou à la drainer.

Pour fixer les idées, le volume cumulé des vides du réseau de fissures et de fentes fait entre 2% et 5% du volume total du massif karstique: c'est la "porosité de fissures".

Le volume des conduits ne fait quant à lui que quelques % de cette porosité.

Le réseau de fissures est dit "capacitif" dans la mesure où il constitue le réservoir proprement dit. Le système de drains est dit "transmissif".

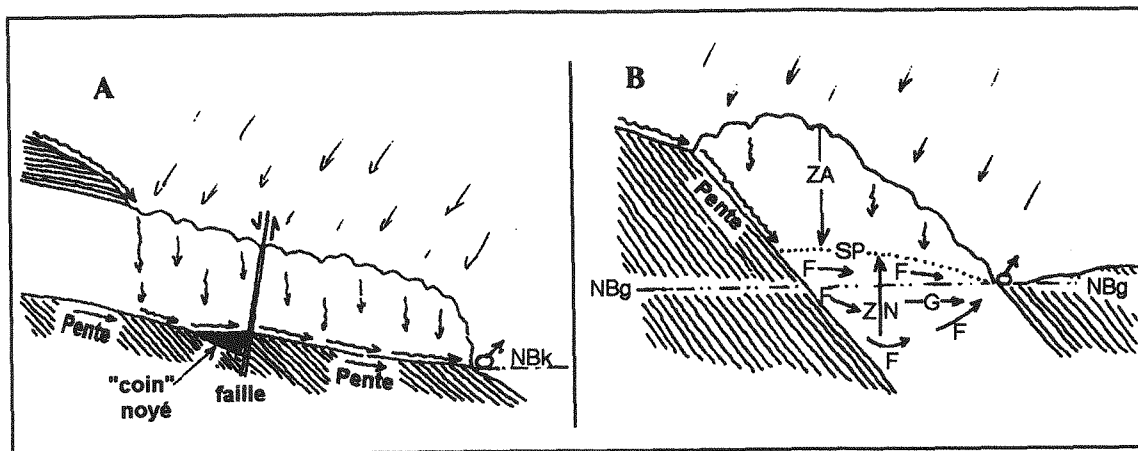


Fig. 7 : Organisation de l'écoulement dans une unité fissurée karstifiable affleurante. A : en situation perchée ; B : en situation barrée. Même légende que la figure 8.

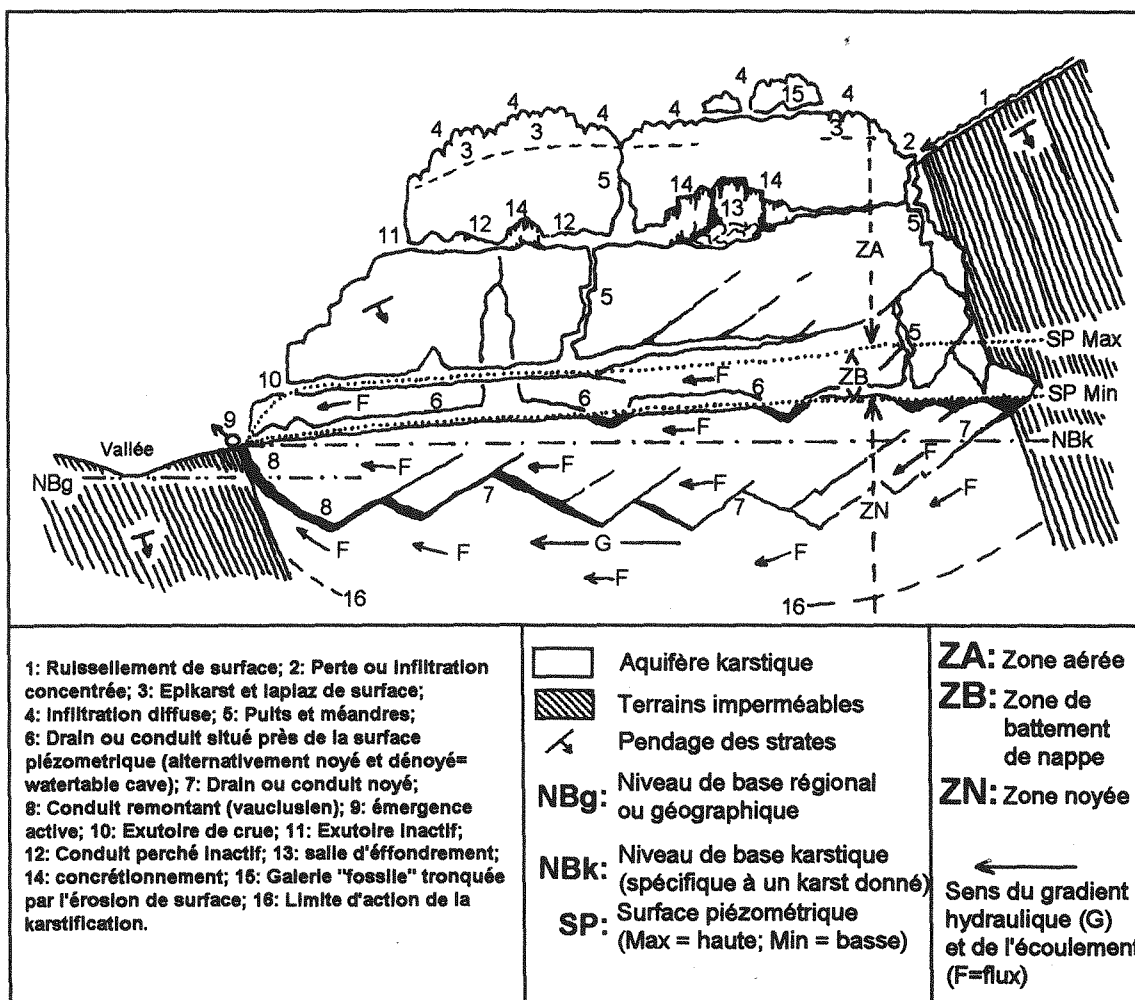
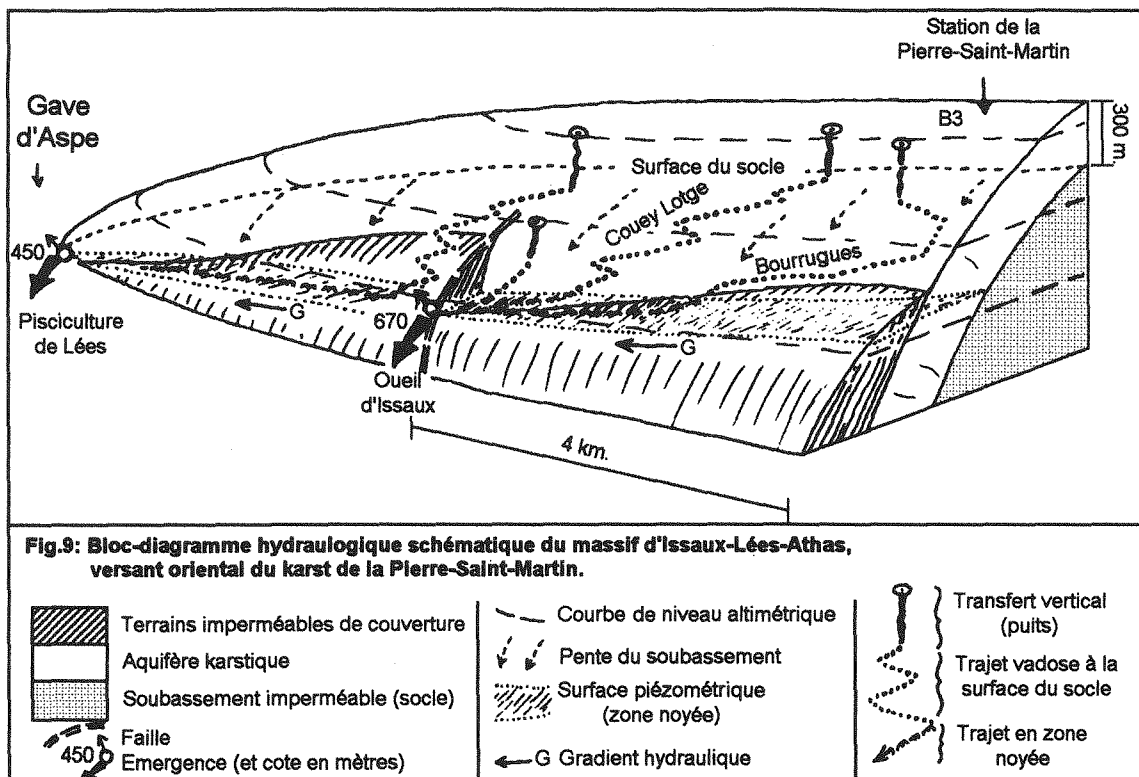


Fig. 8 : Coupe structurale idéalisée, donc très schématique et synoptique d'un karst barré.



Anisotropie et hétérogénéité de l'aquifère karstique.

Les processus de karstification ont donc **sélectionné** une minime partie de tous ces drains potentiels que constituent les discontinuités dans la roche et en ont fait des **conduits privilégiés**. On a vu que la géométrie générale du **réseau** dépend à la fois du gradient hydraulique, "moteur" du **système** et de l'agencement structural des strates et des accidents (fractures diverses). Or celui-ci n'est pas quelconque : il se caractérise par deux ou trois orientations en quelque sorte prédisposées (**fig. 11**).

Ces orientations structurales **préférentielles** donnent déjà au réservoir fissuré et à plus forte raison à l'aquifère karstique une **anisotropie**¹ plus ou moins prononcée dont la conséquence est une direction hydrogéologique **privilégiée** : c'est dans cette direction que l'écoulement est le plus facile; il existe en contrepartie une direction défavorisée dans laquelle l'écoulement est le moins aisé.

Dans l'aquifère karstique, l'**assortiment** des vides et leur **répartition** sont **hétérogènes**. Nous avons déjà évoqué cette dualité page 19. Ajoutons simplement ici que le rapport du volume cumulé des cavernes ou "vides spéléologiques" au volume global du massif karstique définit l'"**indice de cavernement**".

Perméabilité et transmissivité

Le calcaire et la dolomie sont généralement, du point de vue de la karstification, des roches massives. Leur perméabilité ou leur transmissivité sont dues exclusivement au réseau interconnecté de discontinuités qui crée pour l'eau dans le massif une infinité de passages potentiels.

Qualitativement parlant, la **perméabilité** d'un milieu quelconque à un liquide de faible viscosité comme l'eau, se définit par la rapidité avec laquelle ce liquide traverse une épaisseur donnée dudit milieu sous une certaine pression. La transmissivité est la **perméabilité** par unité de surface perpendiculaire à l'écoulement (par m² par exemple). Elle peut donc être évaluée en termes de **débit / m²**.

La transmissivité moyenne d'une formation rocheuse non karstifiée (donc dépourvue de tout système de drainage) est fonction de la **densité** du **réseau de fissures** ou plus généralement de discontinuités internes. En raison de l'anisotropie fréquente du milieu fissuré, elle dépend également de l'orientation dans laquelle on la mesure.

¹ Par anisotropie, milieu non isotrope, on entend ici que l'orientation préférentielle des accidents structuraux donne au réservoir une transmissivité (voir plus loin) qui varie en fonction de la direction géographique considérée.

4. MISE EN PLACE ET DEVELOPPEMENT D'UN SYSTEME KARSTIQUE : INFLUENCE DES "CONTRAINTES DE CHEMINEMENT".

Une question importante de terminologie pour commencer : éviter la confusion entre système karstique et réseau spéléologique.

Un **système karstique** correspond à l'unité de drainage d'un bassin versant. Celui-ci peut être entièrement (karst unaire) ou partiellement (karst binaire) **hypogé** c'est à dire souterrain.

Un **réseau spéléologique** correspond à un ensemble de **cavernes interconnectées** qui peut comprendre un étage actif de zone épinoyée, des drains noyés et tout un dédale de galeries perchées et de puits. Le Réseau Trombe (massif d'Arbas), le Réseau Chevallier (Chartreuse) et celui du Verneau (Doubs) en sont des exemples célèbres.

Le réseau spéléologique n'est donc que l'un des aspects du karst, voire du système karstique, une vision très partielle, même simpliste, n'en déplaie au spéléo d'exploration amoureux de son massif et avide de "premières". Pourtant, réaliser une topographie précise de ce réseau dans les trois dimensions de l'espace, l'habiller de toutes les observations possibles, et enfin le rattacher correctement au cadre extérieur du massif, est le premier pas de la science spéléologique, un pas qui fait d'abord de la caverne un observatoire du karst souterrain, mais ouvre bien au delà de ce premier horizon, une fenêtre sur l'histoire de la Terre. Nous y reviendrons.

Hiérarchie des deux principes de base : pente et gradient hydraulique d'abord ; discontinuités dans le massif ensuite.

Pente réelle du substratum imperméable de l'unité karstifiable dans le cas du karst perché ou plus généralement en milieu vadose, **pente fictive** du **gradient hydraulique** en milieu noyé, sont la **cause première** de l'écoulement gravitaire (sous le propre poids du liquide). En conséquence, la première tendance d'un filet d'eau infiltré à la surface du massif sera d'abord de rejoindre verticalement le substratum ou la surface piézométrique, puis de se diriger vers l'exutoire par le plus droit chemin. C'est d'ailleurs ce qui se passe dans un milieu de perméabilité intergranulaire (sable, alluvions de rivière). Dans une roche où le maillage du réseau de vides interconnectés est infiniment plus lâche, il en va tout autrement.

C'est là qu'interviennent les "**contraintes de cheminement**": le rôle de la pente ou du gradient hydraulique reste prépondérant mais l'écoulement est canalisé par les discontinuités internes du massif. Plus celle-ci sont espacées, plus l'eau aura du mal à trouver sa voie, et plus son parcours sera hésitant et en zig-zags. L'eau est **contrainte** de se frayer un **chemin** au gré des passages les plus faciles. C'est, après pente et gradient, la **seconde raison** de l'orientation des conduits.

Les discontinuités dont l'orientation se rapproche le plus de la pente ou du gradient hydraulique sont les plus favorables à l'ouverture de conduits. Or, un système de fractures n'est jamais quelconque. Il traduit la réponse du terrain aux **déformations tectoniques**. Il apparaît ainsi des directions structurales préférentielles suivant lesquelles se développent les "familles" de failles ou de fractures les plus importantes. Entre en compte aussi, bien sûr, le degré d'ouverture de ces accidents.

La relation entre pente ou gradient d'une part, contraintes de cheminement d'autre part, est illustrée **fig.10** (karst de la Pierre-Saint-Martin).

Enfin si le réseau de discontinuités est dense et homogène (roche très fissurée, par exemple) on se rapproche de la perméabilité intergranulaire et l'eau pourra y percer "à l'emporte-pièce" un tunnel axé sur l'orientation du gradient.

Mise en place du système de drainage : hiérarchisation des conduits.

Dans le développement du karst, la mise en place d'un système de drainage évolué fait appel à la **sélection progressive** des passages les mieux adaptés à devenir les drains principaux.

Certaines discontinuités privilégiées, bien situées et favorablement orientées, vont petit à petit prendre l'avantage tandis que d'autres garderont le rôle d'affluent. Ainsi s'établit d'amont en aval, des zones d'infiltration jusqu'à l'exutoire, à force de captures successives, une **organisation progressive** du système depuis le chevelu très ramifié des "têtes de réseau" jusqu'à l'axe de drainage principal branché sur l'exutoire. On peut parler d'une **hiérarchisation** du système de drainage ou du réseau de conduits (**fig. 11**).

Cette image rappelle au demeurant celle d'un système hydrographique de surface, sauf que dans le cas du karst le système de drainage s'établit dans un volume de terrain et fonctionne en conséquence dans les trois dimensions de l'espace (existence de déversoirs étagés de trop-plein, d'un réseau noyé doublant celui de la zone épinoyée...).

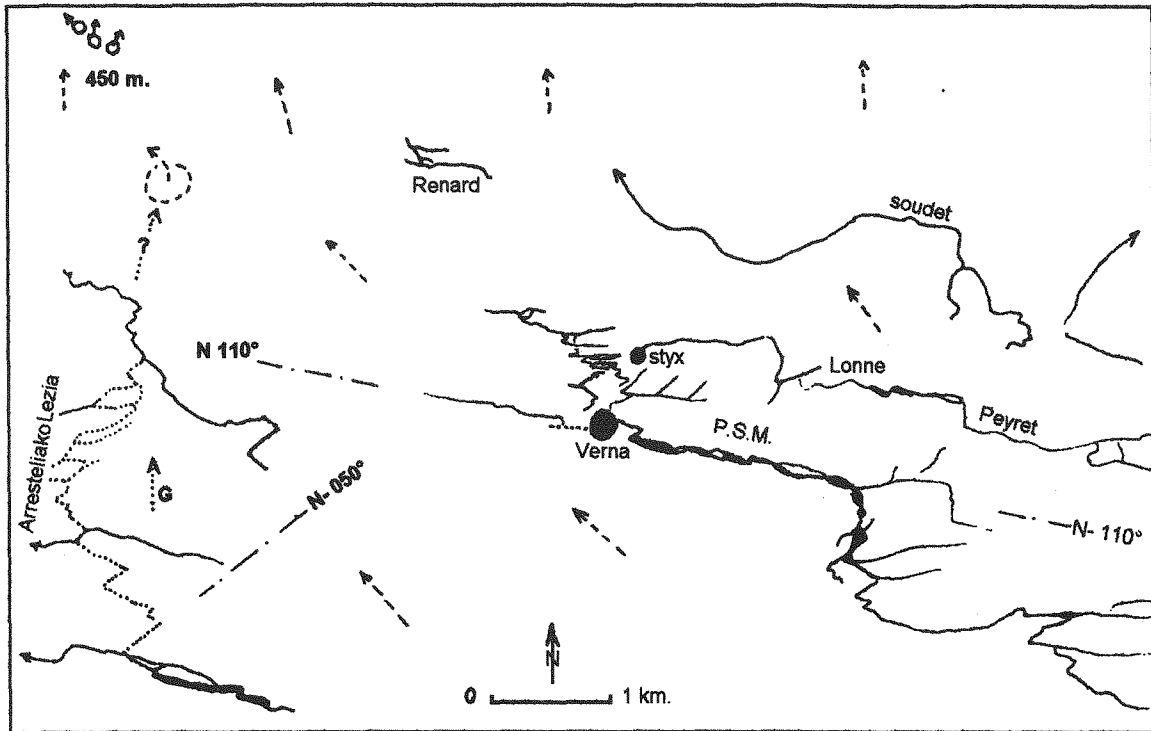


Fig. 10 : Contraintes de cheminement dans le massif karstique de la Pierre Saint-Martin.

En trait plein : Réseaux spéléologiques actifs (rivières actuelles coulant à la base des calcaires crétacés, sur la surface pentée du soubassement, ou socle paléozoïque) \dashrightarrow sens de la pente \odot exutoire actuel du massif (cote)

En pointillés : Etage ancien, aujourd'hui inactif, de Kakouetta ou du Rateau (Arresteliako Lezia) . Cette branche "subfossile", perchée au sein des calcaires bien au-dessus du socle, doit son orientation générale au gradient hydraulique d'une ancienne zone noyée en marge ouest du massif. $\cdots \dashrightarrow$ Ancien gradient \odot Exutoire fossile

La direction des fractures principales (diaclasses importantes et failles) sont autour de N-110° et N-50° respectivement.

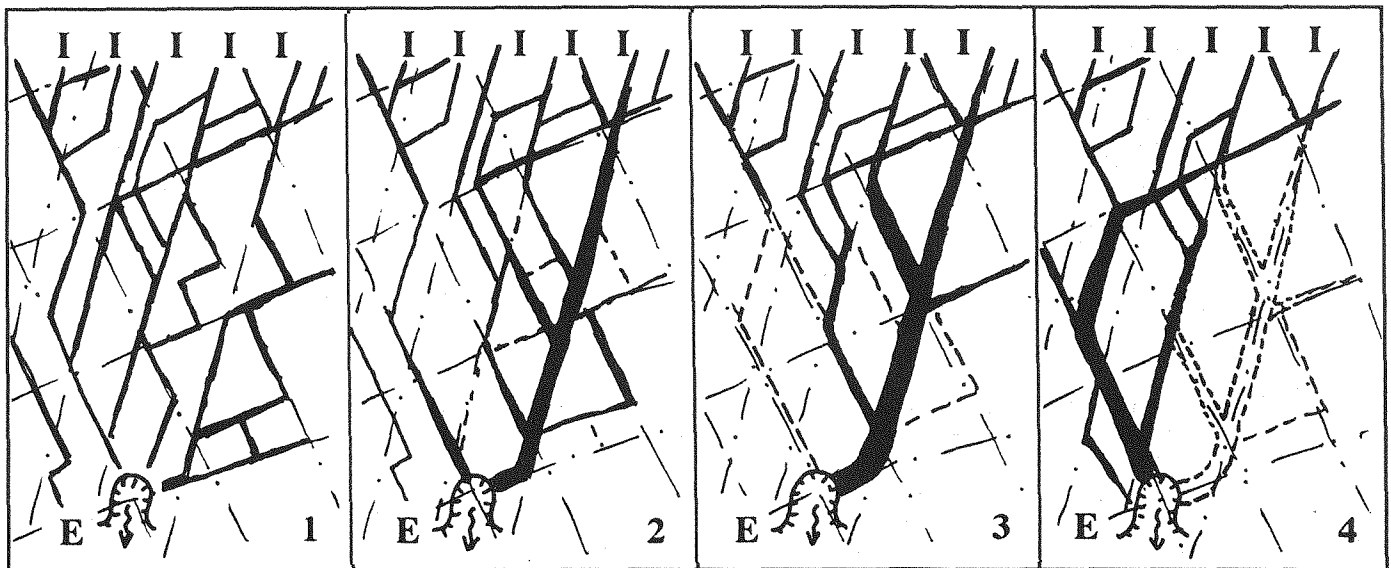


Fig. 11 : Hiérarchisation progressive des conduits dans l'établissement d'un système karstique.

----- Système de fractures I : Zone d'infiltration en bordure du massif E : Exutoire
 En 4 le drain à changé de "lit" à la suite d'un basculement du massif vers la gauche.

Certains types de discontinuités sont-ils à priori plus aptes que d'autres à former des conduits ?

Non. Cette aptitude est avant tout fonction du cadre structural. Dans un milieu tabulaire de calcaires bien stratifiés (causses), les joints de stratification joueront un rôle primordial mais les drains majeurs se localiseront de préférence sur les lignes d'intersection entre le plan des strates et les fractures importantes et de grande extension.

Dans un calcaire massif ou en milieu de montagne où la fracturation est dominante, ce sont les discontinuités d'origine tectonique qui seront le plus sollicitées. Mais il existe même au coeur des chaînes intensément plissées (Alpes et Pyrénées) des calcaires bien lités dont les interbancs sont très favorables à la spéléogénèse, d'où la présence dans certains massifs de puits obliques creusés dans le pendage des strates. (Iseye, dans les Pyrénées).

Attention! ce n'est pas parce qu'un accident structural est apparent sur les photos aériennes qu'il sera forcément favorable à l'ouverture de puits ou de galeries. C'est d'abord son orientation par rapport à la direction potentielle des lignes d'écoulement qui importe. Et on connaît beaucoup de conduits spéléologiques axés en partie ou en totalité sur des fractures absolument invisibles en surface. Les grottes de Bétharram au pied des Pyrénées en sont un bel exemple.

Influence de la densité du réseau de fissures sur l'attitude de la caverne.

Les figures 12 et 13, tirées d'un article de D.C. Ford paru en 1978 dans *Canadian Journal of Earth Sciences* rendent compte de ce concept que nous avons pu vérifier dans certaines cavités, comme la grotte de Sare, en Pays Basque, entre autres.

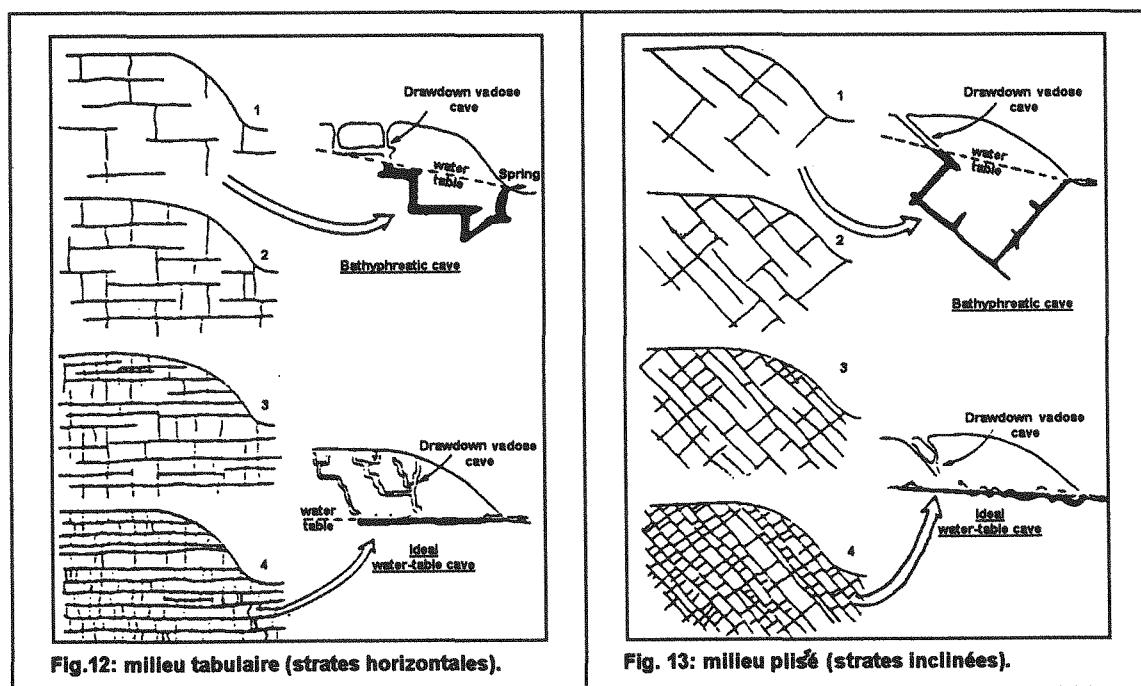


Fig. 12 et 13 : Influence de la densité du réseau de fissures sur l'attitude de la caverne.

Note: "water-table" = surface piézométrique; "drawdown" = transfert vertical ou infiltration; "bathyphréatique" = phréatique profond. (Tiré de D.C. Ford, *Canadian Journal of Earth Sciences* -1978).

Exemple: au sein d'un karst barré pourvu d'une zone noyée, la tendance de la spéléogénèse est d'établir de longues galeries horizontales dans l'intervalle épinoyé, plus précisément au contact de la surface piézométrique d'étiage. C'est en quelque sorte le profil d'équilibre de la rivière souterraine, comme il existe un profil d'équilibre dans les réseaux hydrographiques de surface. Cet état idéal est atteint le plus rapidement lorsque les contraintes de cheminement sont faibles, c'est à dire lorsque la transmissivité du milieu est grande et, par la densité du réseau de fissures, se rapproche d'une perméabilité intergranulaire (voir page 22 : pente et gradient...).

5. LE FONCTIONNEMENT INTERNE DU KARST ; INDEPENDANCE DU SYSTEME KARSTIQUE VIS-A-VIS DE LA GEOMORPHOLOGIE DE SURFACE.

5.1. Les étages du karst. (compléments au chapitre 3)

La structure interne du karst telle qu'elle est représentée sur la **fig. 8** est un concept bien connu et bien assimilé dans le milieu spéléologique. Le spéléo de base est en mesure d'en vérifier le bien fondé au cours de chacune de ses "descentes".

Mais au delà de sa géométrie spécifique, **cet assemblage implique un fonctionnement** dont il est d'ailleurs l'aboutissement. C'est l'histoire de la poule et de l'oeuf, sauf que dans le cas du karst, c'est bien une certaine dynamique dans un certain milieu qui est à l'origine de l'architecture interne du système. Deux schémas tirés de la thèse d'A. Mangin (1975) nous aideront à approcher ces notions.

La **figure 14** est la représentation globale d'un système en milieu tabulaire, ce qui n'a pour but que de simplifier le dessin: en terrain plissé, le fonctionnement serait le même. On distingue principalement la zone vadose ou d'infiltration (I) et la zone noyée (II). Tout en surface s'étend l'épikarst (voir aussi **fig. 8**) dont nous parlerons comme d'un étage à part car il peut avoir son fonctionnement propre.

La **figure 15** schématise les échanges entre le karst et le milieu extérieur et ceux au sein de l'édifice.

On remarquera que, pour générale qu'elle puisse paraître sur le terrain ou dans la littérature, la trilogie des étages du karst idéalisé **fig. 8** n'est pas systématique. La zone vadose ou non saturée peut faire défaut ou presque dans un contexte de très bas plateaux comme en Floride. Et nous avons déjà vu que dans un karst perché (**fig. 7**) la zone noyée est pratiquement inexistante, sauf siphons perchés.

La zone vadose, espace du temps figé.

Lorsqu'elle est présente et bien développée, la **zone vadose** ou **non saturée**, dite aussi "**de transfert vertical**" ou encore "**à écoulement libre**", assure le transit de l'écoulement entre la surface ou éventuellement l'aquifère épikarstique, et le karst noyé. Selon que la transmissivité verticale est essentiellement fissurale ou faite de puits, de diaclases et de méandres, le transit sera lent et retardé ou au contraire rapide (**fig. 15**). Dans une vision complète de la circulation karstique, il importe de bien garder à l'esprit l'image de **cette infiltration à deux vitesses**.

Pourquoi "espace du temps figé"? Parce que dans cette zone de transfert vertical ou l'écoulement, sauf en des points très particuliers, est temporaire, la corrosion est minimale ou même arrêtée. C'est au contraire, dans un karst de basse ou de moyenne altitude où le couvert végétal est présent voire abondant, le domaine du "redépôt", du concrétionnement.

C'est pour le spéléo, en dehors des puits et méandres arrosés, le domaine du grand calme que l'on dit improprement "fossile".

Le karst noyé.

Avant de nous intéresser à la surface du massif, poursuivons notre cheminement dans le sens de l'écoulement.

Sur les **figures 14 et 15**, il n'est pas fait mention de zone épinoyée (**fig. 8**). Il est tout simplement admis que la frontière du sous-système noyé fluctue en fonction des apports de l'infiltration et qu'il existe en conséquence un espace d'inondation temporaire.

Pourtant, cet interface fluctuant est de la plus haute importance? car il dessine en fait le **profil d'équilibre du système karstique contemporain**. Et ce profil d'équilibre, qui se tient plus près du niveau d'étiage que du niveau (moins fréquent) des hautes eaux, est aussi celui des **grandes galeries horizontales**.

Ajoutons qu'à ce niveau la corrosion reste plus ou moins active, dépendant de l'état de saturation du solvant, mais en tout état de cause elle ne concerne de façon sensible que les conduits actifs ou semi-actifs, dont la fameuse "Grande Galerie Horizontale" qui à mon avis est de loin l'élément le plus important du karst sur le plan de son histoire..

L'espace épiphréatique (p. 16 et **fig. 8**) et le haut de la zone noyée pérenne sont donc sous l'influence de courants de crue et de décrue, un peu à l'image des marées sur le littoral marin. Voyons l'effet de ces marées irrégulières et aléatoires d'abord sur le remplissage (en eau) du karst, puis sur sa "spéléomorphologie".

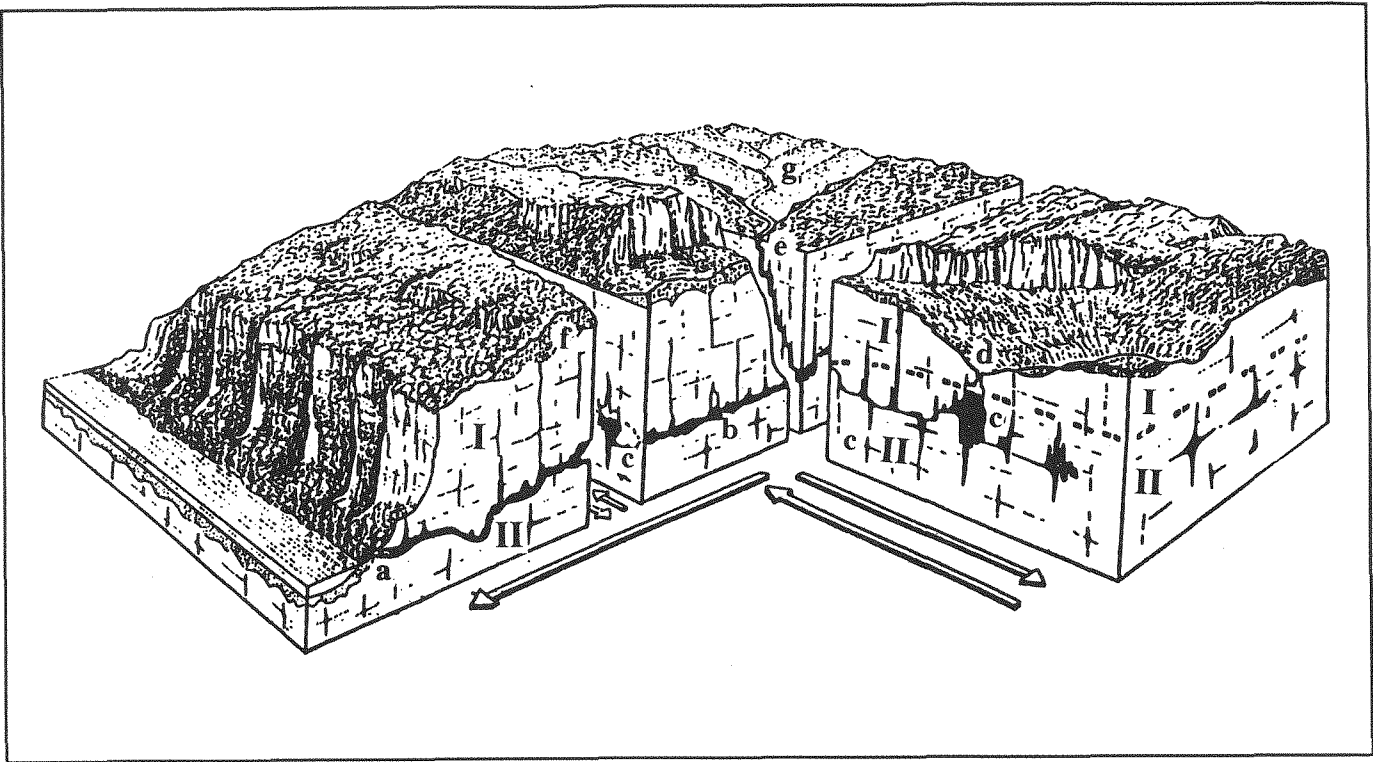


Fig. 14 : Représentation schématique d'un système karstique.

I = zone d'infiltration ; II = karst noyé ; a = exutoire principal du système ; b = drain principal ; c = systèmes annexes ; d = exutoire de trop-plein ; e = ponor (perte) ; f = aquifère épikarstique ; g = terrain non karstique appartenant au système (karst binaire). Les flèches indiquent le sens de l'écoulement dans le karst noyé (va et vient de crue et de décrue vers les systèmes annexes).

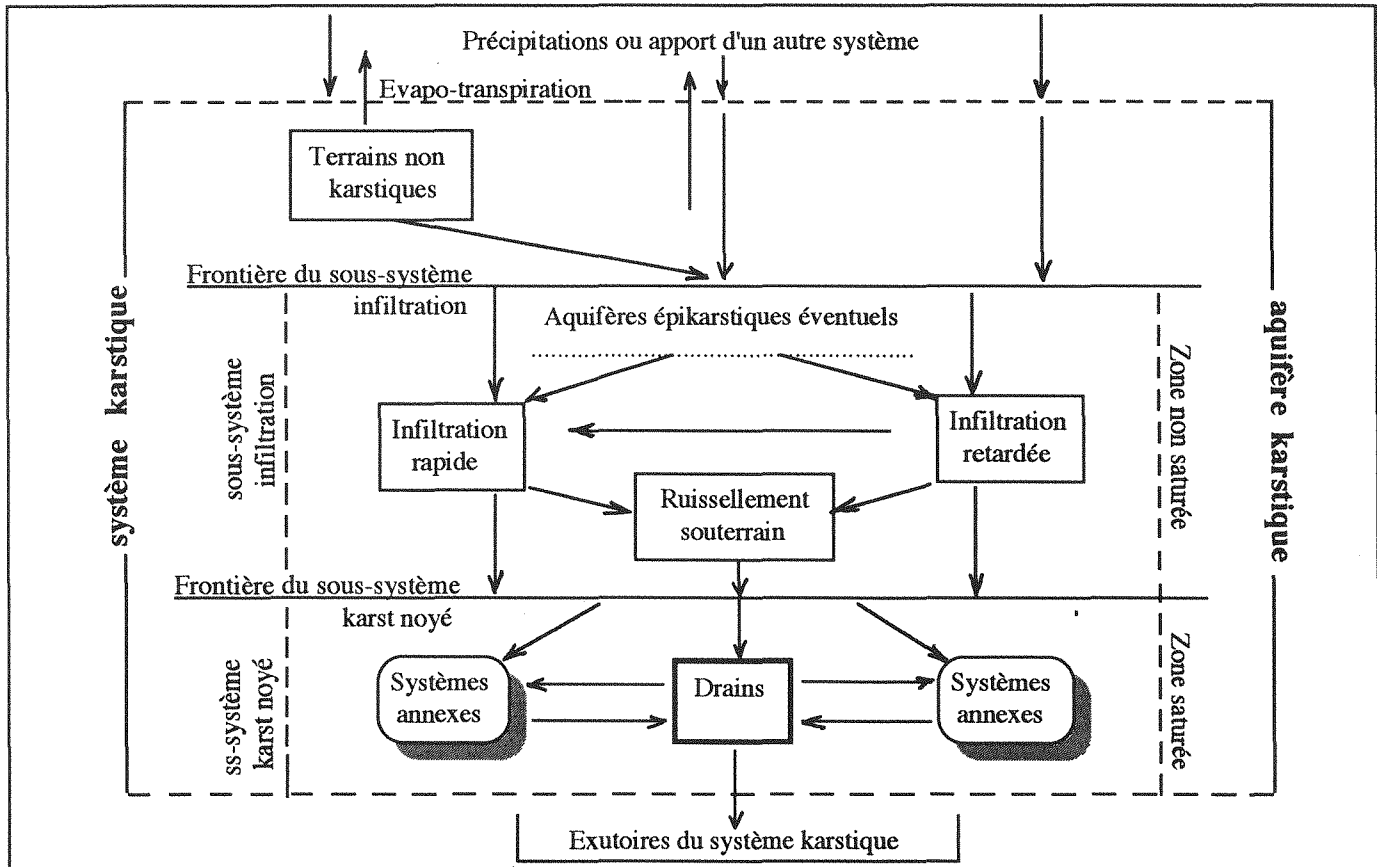


Fig. 15 : Articulations hydrogéologiques d'un système karstique.
(Alain Mangin, thèse, 1975)

Remplissage et vidange de l'aquifère karstique.

La figure 16 illustre comment le réseau de conduits transmet au sein du réservoir fissuré ces variations de niveau. Les drains sont la tuyauterie du karst : ils permettent une circulation rapide lors des crues ou de la décrue. La mise en charge de l'aquifère est quant à elle beaucoup plus lente, le réseau de fissures et de fentes n'offrant que d'étroites voies de pénétration à l'eau.

Un orage violent mais très passager, même s'il déverse des trombes d'eau, aura donc peu d'effet sur le remplissage du réservoir karstique. Pour cette opération, il faut des pluies soutenues et prolongées. C'est d'ailleurs exactement la même chose pour la recharge des nappes phréatiques classiques en milieu alluvial : les pluies d'orages ne font que ruisseler en surface, entraînant la terre arable vers les rivières. Dans un karst, elles ne font que "ruisseler" en torrents déchaînés dans les conduits.

La figure 16 schématise la mise en charge progressive, donc différée, d'un aquifère karstique. Les courbes numérotées sont censées illustrer l'évolution de la surface piézométrique - de 1 à 5 - au voisinage du drain, lors de l'invasion du réseau de fissures, puis lors de la décrue. Notons ici que la lente et progressive restitution de réserves considérables par un système de drainage efficace fait tout l'intérêt du réservoir karstique et explique les débits pérennes souvent importants des sources les plus basses.

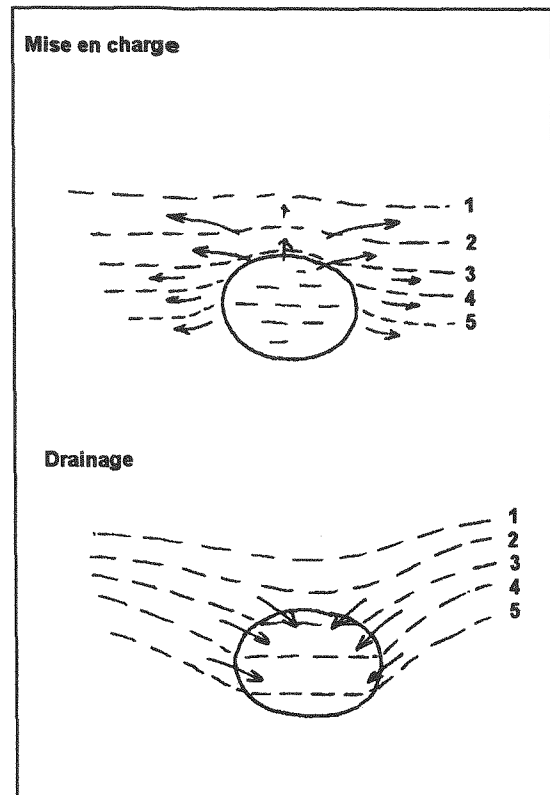


Fig. 16 : Mise en charge et drainage d'un réservoir fissuré karstique au niveau d'un conduit.

Systemes annexes.

Le va-et-vient des flux de crue et de décrue et le mécanisme illustré fig. 16 favorisent la mise en place d'un cavernement qualifié par Mangin de systèmes annexes (fig. 14 et 15). Ces systèmes attenants au drain principal peuvent comprendre de très grands vides qui constituent une partie importante du volume capacitif (ou contenant) du karst, participant de façon significative à la mise en réserve de ses ressources hydriques. N'étant par ailleurs pas sur le passage du drainage principal dont le cours peut être parfois torrentiel, ils restent à l'abri de la sédimentation grossière, galets par exemple, et sont essentiellement le siège de dépôts terrigènes fins de décantation.

Karst noyé profond.

L'organisation des conduits relève exclusivement du gradient hydraulique et des contraintes de cheminement. C'est le domaine des galeries "syngénétiques" (Ph. Renault) dites parfois, à tort ou à raison, "conduites forcées", d'où aussi l'appellation de zone d'écoulement forcé.

Une grande partie de la zone noyée étant située sous le niveau de l'exutoire, les conduits s'y organisent essentiellement en fonction de lignes de flux potentielles qui, vers l'aval, tendent à remonter vers la source pour s'y raccorder. Ces conduits se développent donc indifféremment dans les trois dimensions de l'espace, comme si la gravité n'existait plus. Seule subsiste dans l'animation de l'écoulement la "volonté" de sortir au plus vite du massif. La pente réelle ne joue plus, comme l'affirment les tronçons de galeries ascendantes et la fréquence des émergences "remontantes" dont certaines, venant de grandes profondeurs, sont dites "vaclusiennes" (fig. 8).

Jusqu'où descend le karst profond ? Seuls les plongeurs peuvent l'établir. Toujours est-il que dans les régions de montagne, les conduits vauclusiens descendent à des dizaines, voire quelques centaines de mètres sous le niveau de base. La question est de savoir s'ils sont hérités de temps anciens où ce niveau de base était plus bas (voir le chapitre sur l'évolution de karst) où s'ils sont vauclusiens d'origine. On connaît dans les Pyrénées des conduits ascendants qui ont certainement fonctionné ainsi dès leur origine.

Quoi qu'il en soit, il doit bien exister à une certaine profondeur une limite de la karstification, comme tente de le suggérer la figure 8.

L'épikarst.

Interface entre l'atmosphère ou le sol végétal d'une part, et le karst profond d'autre part, épais selon le cas de quelques mètres à plusieurs dizaines de mètres, l'étage **épikarstique** (ou **épikarst**) assure les échanges avec la surface. En raison de la détente tectonique, les ouvertures y abondent. C'est à ce niveau que la corrosion agit avec le plus de vigueur et d'uniformité.

Ford et Williams indiquent page 119 de leur ouvrage² que 70% - en moyenne - de l'ablation chimique par infiltration directe se font au sein de l'épikarst, avec une fourchette de 50 à 90%.

L'épikarst peut être nu ou couvert par un sol. Dans un **épikarst nu** de haute montagne (lapiaz) la dissolution est entretenue durant une longue partie de l'année par la fusion lente des réserves nivales (puits à neige). Ici, la corrosion serait plus importante dans la zone de transfert vertical que près de la surface (B. Collignon, 1988, p. 36). R. Maire (1990) évalue la part de la dissolution sur les lapiaz nus (Désert de Platé par exemple) à 15%. Dans l'**épikarst couvert**, c'est bien au contact du sol et juste au dessous que se produit l'essentiel de la corrosion.

L'étage épikarstique se comporte souvent en aquifère perché temporaire ou de transit dans lequel, comme dans le karst profond, existent des voies d'absorption rapide et un réseau de fractures moins transmissif où l'infiltration est différée.

Remarque sur la figure 15.

Notons que dans le schéma d'A. Mangin existe un léger risque de confusion sur le plan de ce que l'on peut qualifier de "**sous-système**". En effet, cette appellation est appliquée à l'étagement du karst. Personnellement, je préfère la réserver à la notion de "**système affluent**" bien individualisé de l'axe principal du système karstique. Ainsi, à la Pierre-Saint-Martin, le **système** Saint Vincent comprendrait les **sous-systèmes** de la P.S.M., du Lonné-Peyret, du Soudet et d'Harrigoyena, dont l'exutoire commun est l'émergence de Bentia.

5.2. Indépendance du système karstique vis-à-vis de la morphologie de surface.

La coloration du Trou du Toro qui a permis à Norbert Casteret de révéler le trajet souterrain de la Garonne avant sa résurgence au Goueil de Jouéou en a été l'une des plus belles, des plus percutantes démonstrations³.

Car la partie souterraine du bassin versant d'un système karstique n'est pas calquée sur les conditions de surface : son aire de drainage se développe indépendamment du relief superficiel. Les illustrations les plus classiques de cet état de choses sont données par le cours hypogé des pertes partielles de rivières dont la résurgence dans un autre bassin versant est l'origine d'un cours d'eau "neuf". Exemples: pertes du Doubs et naissance de la Loue; pertes du gave d'Ossau et naissance du Neez (Pyrénées atlantiques).

Mais il existe des situations plus complexes, comme celle du massif de la Pierre-Saint-Martin dont toutes les eaux collectées sur la partie occidentale se retrouvent sur le côté français (fig. 10). La fig. 18 est la représentation schématique imaginaire d'une telle situation.

² Derek Ford & Paul Williams : Karst geomorphology and hydrology - Chapman & Hall, London - ed. 1992

³ Norbert Casteret : Dix ans sous terre - p. 231 - Librairie académique Perrin, Paris - 1945.

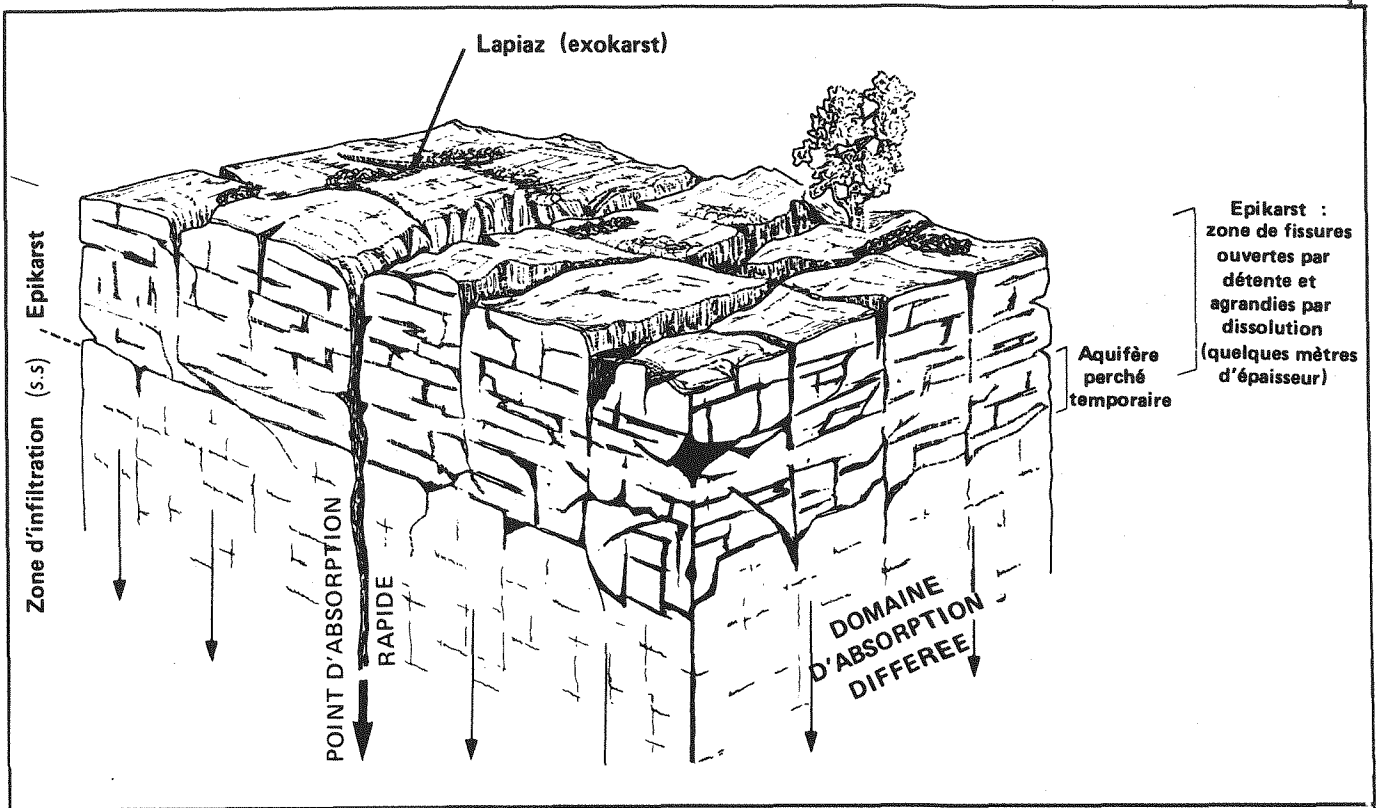
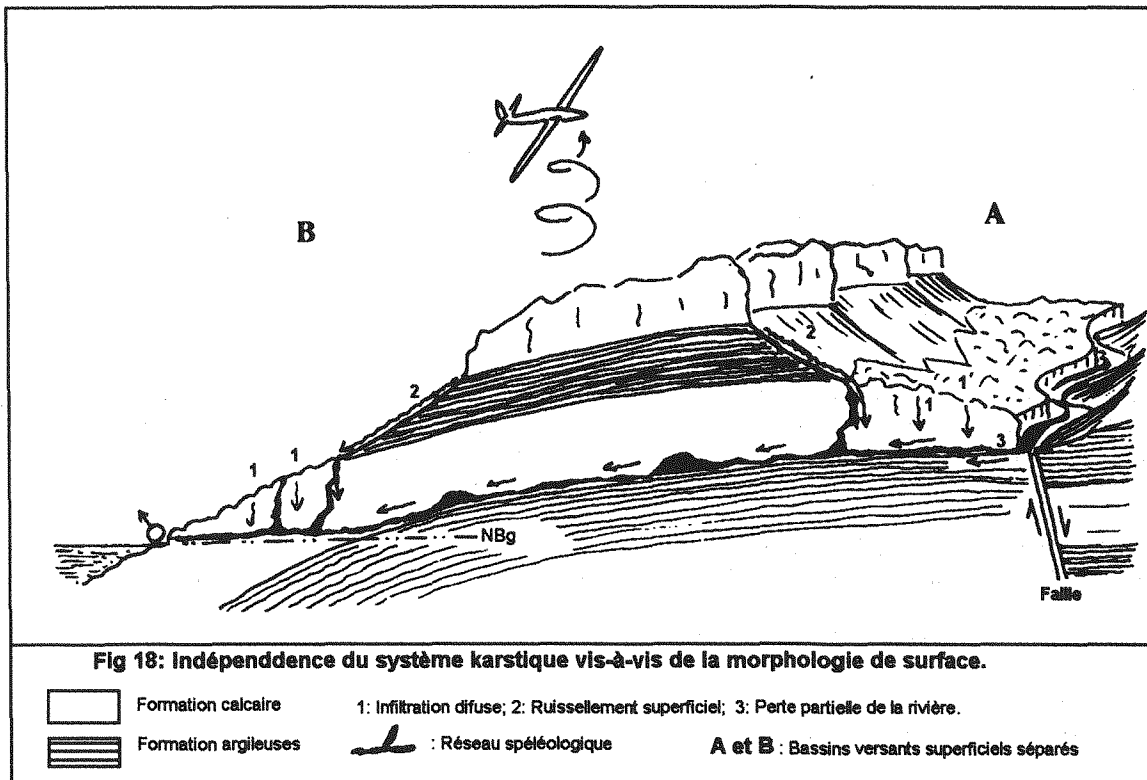


Fig. 17 : Représentation schématique d'un aquifère épikarstique dans la zone d'altération et de fracturation superficielle d'un karst. (A. Mangin, thèse -1975- légende complétée par le service exploration de la société Elf-Aquitaine).



5.3. Diffluences.

Lors d'une opération de traçage effectuée à partir de la perte d'un cours d'eau ou de la tête d'un réseau spéléologique, il n'est pas rare de voir le colorant sortir en plusieurs endroits séparés de centaines de mètres, voire de plusieurs kilomètres, dont on ignorait les relations souterraines.

On dit qu'il y a **diffluence**.

Alors ? Vraie ou simplement apparente ?

En réalité, l'affirmation n'est pas immédiate. Par exemple, le traceur peut effectivement n'être ressorti qu'en un seul point dans le lit d'une rivière puis s'être réinfiltré quelques centaines de mètres plus loin pour colorer une émergence qui n'a rien à voir avec le système étudié. Dans ce cas, il y a simulacre de diffluence. Et le fait de n'avoir pu détecter le traceur sur son bref parcours sous le soleil entretient la confusion.

La perte partielle d'une rivière est un cas classique de diffluence (**fig. 18**). Un très bel exemple en est donné par le système "gave d'Ossau - sources du Neez" dans les Pyrénées Atlantiques⁴. Le gave, barré sur son cours ancien par la moraine frontale du glacier d'Ossau, s'est trouvé deux échappatoires: vers l'ouest, il s'est taillé une gorge dans les calcaires; vers le nord il a préféré creuser un tunnel ... qui donne naissance au Neez (**fig. 19**).

Les diffluences souterraines sont souvent plus difficiles à cerner. Les colorations effectuées dans le massif du Ger⁵ (Pyrénées Atlantiques), entre Gourette et les Eaux Chaudes suggèrent d'importantes diffluences, en particulier depuis Cinda Blanque ou Cotche (**fig. 20**).

La littérature karstologique est remplie d'exemples de diffluences encore plus complexes. c'est un phénomène extrêmement courant que le spéléo d'exploration doit savoir expliquer au mieux ! Alors, capture ? ou simple débordement ?

Il y a diffluence **temporaire** lorsque celle-ci résulte du simple **débordement de crue** d'un drain actif perenne vers un conduit semi-actif.

Il y a diffluence "**chronique**" lorsqu'une partie du débit d'un axe de drainage est détournée au profit d'un autre drain. Il existe tous les degrés, depuis la simple diffluence très localisée entre deux bras rapprochés d'un même réseau qui vont se retrouver un peu plus loin (**fig. 21a**), jusqu'à la diffluence entre deux systèmes de drainage distincts (**fig. 22**). Il peut exister également des diffluences entre deux réseaux spéléologiques d'un même système karstique, cas intermédiaire entre les deux extrêmes précédents (**fig. 21b**). Mais quel que soit son degré, une diffluence **chronique**, annonce toujours une **capture**.

Un karst étagé dans lequel des galeries inactives surmontent le réseau actif est le résultat d'une évolution longue et complexe (voir plus loin le chapitre "Evolution et adaptation...").

Au cours de l'évolution du karst suivant les fluctuations du niveau de base en fonction duquel il s'organise, un système de drainage obéissant à un champ de potentiel hydraulique donné (A sur la **fig. 22**) peut tomber progressivement sous l'emprise d'un autre champ de potentiel, divergent par rapport au précédent (B sur la **fig. 22**).

Entre la phase durant laquelle le système obéit totalement au champ A et celle où il se conforme entièrement au champ B, s'écoule une période de transition au cours de laquelle les événements accompagnant la réorganisation progressive du système sont particulièrement propices à l'apparition de diffluences. Au début, il ne s'agit que de modestes infiltrations au profit du champ B, à partir d'une diaclase, d'une faille, d'une discordance ou de tout autre accident susceptible d'assurer un contact hydraulique. Plus tard, l'eau ayant élargi le passage, le champ B prélève l'essentiel du débit, au point que le champ A n'écoule plus que les excédents de crue et, à plus long terme, plus rien du tout.

Dans cet ordre d'idées les pertes du gave d'Ossau (**fig. 19**) pourraient se développer un jour jusqu'à détourner l'essentiel du cours d'eau pyrénéen ou même la totalité de son débit vers le Neez.

Il est donc bien question de **captures dans un milieu en constante évolution**.

⁴ J. Bauer, G. Oller et R. Sabrier - Karstologia n° 19 - 1992

⁵ P. MEUS - Le drainage karstique des plis déversés du massif de Ger (Eaux Bonnes, Pyrénées atlantiques) à partir des résultats d'expériences de traçage - Annales scientifiques de l'université de Besançon, mémoire hors série n° 11- 1992.

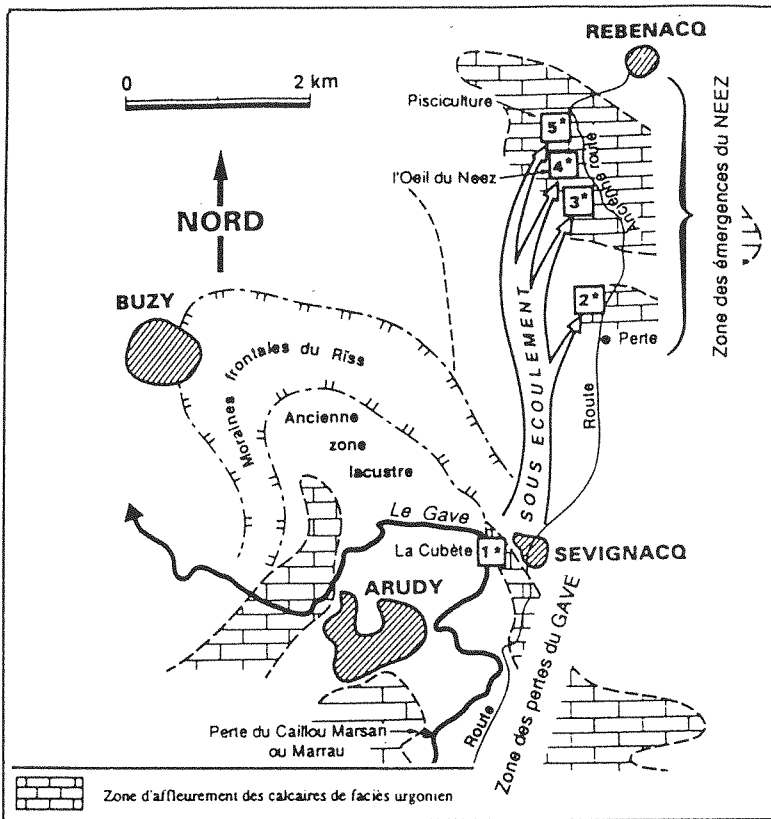


Fig. 19 : Diffiusion du Gave d'Osseau à Arudy (64)
 1* = perte de la Cubète ; 2* à 5* = émergences

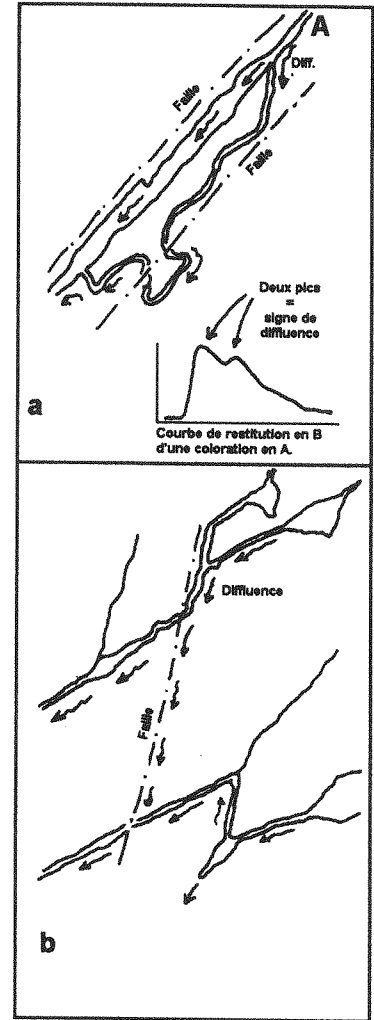


Fig. 21 : Diffiusions dans un même système karstique.

A : entre deux branches rapprochées d'un même drain.

B : entre deux réseaux spéléologiques distincts.

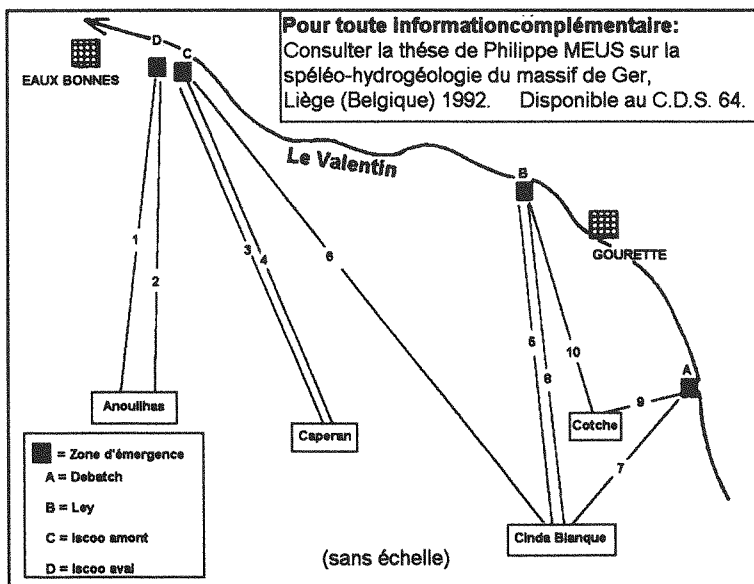


Fig. 20 : Traçages sur le massif de Ger (64)

Les sites d'injection sont encadrés. Remarquer les "traversées" 5,6,7,8, provenant de Cinda Blanque : la "traversée" 7 pourrait être en réalité l'indication d'une contamination via le lit du Valentin. (Ph. Meus, 1992)

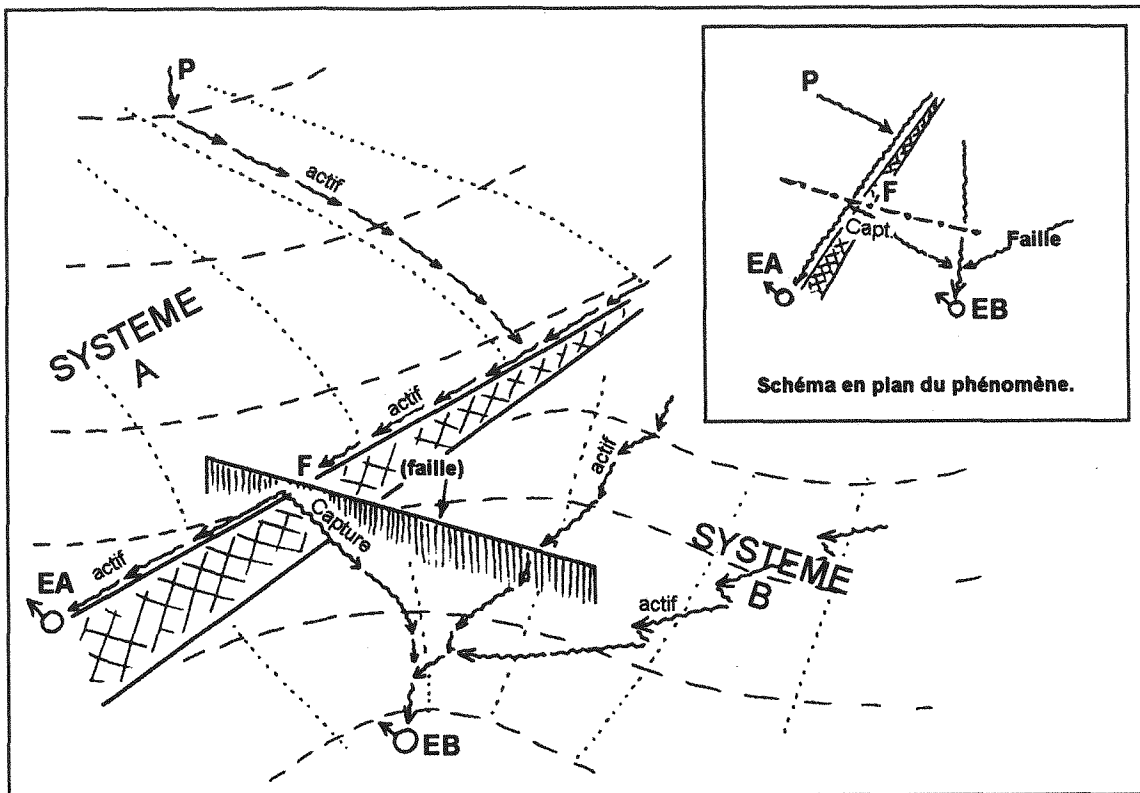


Fig. 22 : Capture progressive d'un système de drainage par un champ de potentiel hydraulique différent.

P = point d'infiltration concentrée dans le système A

♁ = exutoires EA = exutoire du système A, plus haut que EB, exutoire du système B

Le système A s'organise suivant le champ de potentiel A ; le système B suivant le champ de potentiel B.

F = point de capture sur un accident (faille), mettant en communication hydraulique le système A et le système B.

--- = courbe de niveau isopotential (hydraulique)

... = ligne de potentiel (hydraulique)

▒▒▒▒▒ = Limite aval du champ de potentiel A (confinement lithologique ou simplement hydraulique).

La capture en F est d'abord discrète, puis s'affirme de plus en plus jusqu'à désorganiser complètement le système A en aval du point F. L'amont de ce système est ainsi détourné au profit du système B. Durant la période transitoire au cours de laquelle s'opère la réorganisation, F demeure un point de diffluence au niveau duquel le champ B prend progressivement l'avantage sur le champ A.

5.4. Vulnérabilité du karst à toute pollution.

L'un des grands mérites d'Edouard-Alfred Martel fut d'entreprendre la sensibilisation du public au risque de pollution des émergences karstiques. Sa traversée du réseau de Bramabiau (Gard), depuis la perte du ruisseau du Bonheur, en apporta l'une des premières démonstrations.

La transmissivité élevée du karst en fait, de par son système de drainage, un milieu de transit rapide, sans possibilité de filtration. A la rigueur, une importante zone noyée susceptible de ralentir considérablement l'écoulement peut favoriser non seulement la décantation des boues (et par là le colmatage du réseau!!!) mais aussi la capacité d'**autoépuration** de l'aquifère vis-à-vis de sa contamination bactérienne. Ce processus naturel résulte de l'épuisement de la nourriture dont se gavent les bactéries, mais il implique un long séjour de l'eau sous terre (un bon mois), ce que la plupart des aquifères karstiques sont loin de réaliser .

Pour ce qui est des polluants chimiques et des hydrocarbures, il n'existe guère de remèdes naturels.

D'autre part, l'**hétérogénéité** de l'aquifère (au sein duquel le réservoir fissuré et les systèmes annexes sont rapidement alimentés et drainés en tous points du karst par le réseau de conduits) et son **anisotropie** rendent son approche difficile sans une très bonne connaissance de l'hydrologie du massif. Dans ces conditions, vouloir préserver la qualité d'une source karstique par un périmètre de protection trop limité est une plaisanterie de mauvais goût (surtout pour le consommateur!). La protection des eaux d'un karst exige **une étude globale et approfondie**.

Un exemple caricatural de pollution, par la communauté, d'un grand aquifère karstique nous est donné par la station de ski de la Pierre-Saint-Martin dont la station d'épuration des eaux usées est sous-dimensionnée et inopérante (fig. 9 page 21). Les effluents de toutes sortes, fuel et W-C se retrouvent en concentration appréciable dans le réseau du B3 aux multiples siphons, et ressortent invisibles dans les eaux claires des Oueils d'Issaux que le promeneur assoiffé est tenté de boire avant d'aller visiter l'Eco-musée du village de Lourdios.

Plusieurs tracés ont été réalisés. Le trajet à vol d'oiseau entre la station d'épuration et les Oueils d'Issaux est de 4,5km; temps de parcours : 120 heures. Pas de quoi affamer les bactéries qui se portent bien, comme l'ont montré les analyses.

En conclusion, tout projet d'exploitation ou d'aménagement d'un massif karstique (carrières, routes, industrie agro-alimentaire, urbanisme ...) doit faire l'objet d'**études d'impact** préalables sérieuses, globales et prolongées. Les habitants du massif et de son pourtour, mais surtout les élus locaux doivent rester très vigilants.

Cela n'empêche pas la communauté spéléologique de s'investir en observant et en portant l'information aux responsables de la gestion du site et aux usagers.

Et puis il y a aussi la pollution esthétique, celle qui dénature indûment le paysage. Ici, c'est de la fragilité du karst dont il est question.

Le spéléo a là aussi son mot à dire, même s'il pense n'avoir aucune influence sur le cours des événements. Comme l'a fait Martel avant lui, il peut toujours porter la juste parole susceptible de sensibiliser.

5.5. Récapitulatif : le potentiel de karstification.

Rappel : facteurs et paramètres de la karstification.

Nous avons vu tout au long des pages qui précèdent que les paramètres de la karstification peuvent être répartis en trois groupes :

1) Les **caractéristiques physiques** du milieu karstifiable: lithologie (nature de la roche) et pétrophysique (porosité, perméabilité, densité du réseau de fissures). Ces paramètres définissent ensemble la **fragilité** du milieu.

2) La **quantité d'eau** disponible ou le **débit** (c'est le vecteur) et sa **concentration en agent chimique actif** (gaz carbonique ou autre).

3) L'**énergie mécanique du système**: la **dénivelée** (qui définit une énergie potentielle), la **charge hydraulique** (autre aspect de l'énergie potentielle) et le **gradient hydraulique**.

Entrons un peu dans le détail :

1) **La lithologie** : Calcaire ou dolomie sont d'autant plus solubles qu'ils sont plus purs et moins argileux (calcaire urgonien, par exemple). On a vu d'autre part que la dolomie était moins soluble que le calcaire. Sur le plan de la **pétrophysique**, on sait que la fragilité de la roche est fonction de son degré de fracturation.

Concernant la notion de pureté du calcaire, on parle souvent d'argiles de décalcification. Or de telles argiles ne peuvent être produites que par un calcaire qui en contient, ce qui n'est pas le cas des calcaires purs. Nous reparlerons de cette question dans le chapitre sur les remplissages.

Mais il existe des carbonates plus ou moins argileux. Le produit de leur altération, la véritable argile de décalcification, peut gêner par colmatage les processus de la karstification dans une partie de l'endokarst, jusqu'à les arrêter. Il faut pour l'évacuer un débit d'eau suffisant (et une vitesse de courant importante). Nous y venons.

2) **La quantité d'eau disponible** : elle est connue par le **débit moyen annuel** ou **module annuel**, ou encore le **débit spécifique** (voir la définition de ces termes sur l'encadré de la pages 16 et 17). Le débit "instantané" est celui que l'on évalue ou, mieux, que l'on jauge à un instant donné. C'est une grandeur immédiatement perceptible par l'observateur occasionnel qui peut constater qu'il est d'autant plus efficace dans le transport de matières en suspension qu'il est plus élevé. On en déduit que certaines périodes sont plus favorables que d'autres à l'érosion, corrosion chimique et abrasion mécanique prises en compte.

En fait, cette observation est à étendre au débit moyen annuel. Car c'est la quantité d'eau qui passe à travers le karst qui en contrôle au premier chef l'érosion. La concentration en agent chimique actif, acide carbonique ou autre, vient au second plan.

Or l'**apport en eau au karst**, que mesurent le module annuel ou le débit spécifique, est un paramètre **climatique**. C'est donc sous les climats où la pluviosité et le volume d'eau infiltrée sont les plus importants, que la karstification est la plus intense, comme le suggère le graphique page 17. L'eau sert de vecteur non seulement à l'agent chimique mais aussi au matériel abrasif (sable, gravier, galets ..) dont use l'érosion mécanique pour faire son travail. Ce rôle primordial du vecteur eau est donc facile à appréhender.

Les climats à forte pluviométrie se trouvent bien entendu sous l'équateur et dans les pays tropicaux humides, mais ils existent aussi en zone tempérée et dans certaines régions périglaciaires. Ils ne sont donc pas exclusivement fonction de la latitude. Par contre, en pays montagneux, il existe souvent un gradient de pluviosité, celle-ci augmentant sensiblement avec l'altitude (versants exposés).

3) **L'énergie mécanique** : La quantité d'eau disponible est une **force potentielle**. La **dénivelée** (zone vadose) ou la **charge hydraulique** (zone noyée) font mouvoir cette force et la transforment en travail. Plus la pente ou le gradient sont forts, plus ce travail sera rapide, et plus la **puissance** du système sera grande... au point de favoriser l'érosion mécanique au détriment de la corrosion si le matériel abrasif transporté est suffisant.

L'énergie mécanique dépend donc à la fois du climat et du relief. C'est un paramètre **géomorphologique et climatique**.

Potentiel de karstification.

Ce concept a été développé par A. Mangin. Il intègre qualitativement (faute de pouvoir le faire quantitativement) l'ensemble des paramètres réglant la karstification, soit:

Fragilité (lithologie + pétrophysique)
x (Débit spécifique + agent chimique actif)
x (Puissance mécanique du vecteur eau)
= Potentiel de karstification.

6. EVOLUTION ET ADAPTATIONS DU RESEAU SPELEOLOGIQUE : LE KARST POLYPHASE .

"...une photographie de l'histoire du Monde ..." (P. Cabrol et B. Férié : " La Pierre en Pleurs " - Op. cit.)

6.1. Le temps et la durée. Une échelle des temps géologiques est donnée en annexe.

"Il était *une fois* une princesse...". C'était "*dans le temps*...". La princesse appartient au *temps passé*. Allez savoir *quand* c'était... Après tout, ce qui compte le plus, c'est qu'ils "*furent heureux et eurent beaucoup d'enfants*". Or pour avoir *beaucoup* d'enfants, il faut une certaine durée et aussi, dans une vie, une longue *succession d'évènements*.

.....
"...mais il reviendra, le *temps* des cerises". Bien sûr, il reviendra: il *revient* chaque année. Il est *cyclique, périodique*.

.....
"...mais il est bien court, le *temps* des cerises ". C'est vrai! ce *temps-là* est court. Il est à la fois un *évènement* et une *durée*. On l'appelle le printemps. Et pendant toute la durée du printemps on peut faire tout plein de choses.

.....
Les glaciations du Quaternaire revinrent elles aussi de façon cyclique de temps en temps et à chaque retour elles durèrent un temps. Allez vous y retrouver dans tout cela....

.....
Temps et durée sont des notions capitales en géologie. Pour être mieux perçue, la notion de durée doit être rattachée à celle de "**phénomène géologique**". L'**unité de temps** la plus appropriée pour "chronométrer" ou "filmer" un phénomène naturel et son influence sur le milieu ambiant est bien entendu fonction de la durée de vie et de la vitesse d'évolution dudit phénomène.

Une "**catastrophe**" géologique à l'échelle **planétaire**, avec extinction massive de la faune, est en réalité une **accélération** particulièrement **sensible** des processus de **modification du milieu naturel** au point que beaucoup d'espèces et même de familles animales ou végétales ne peuvent pas s'adapter au changement et disparaissent. Les grandes catastrophes du passé ont tout de même pris quelques centaines de milliers ou deux ou trois millions d'années pour se dérouler (passage du Paléozoïque au Mésozoïque avec disparition de 70 à 80% des familles animales marines; passage du Mésozoïque au Cénozoïque avec disparition de 40% des familles marines - dont les ammonites - et des dinosaures marins et terrestres...).

La catastrophe géologique la plus rapide de l'histoire de la planète - catastrophe entendue au sens de **modification drastique du milieu** - se passe actuellement sous nos yeux et dure déjà **depuis le début du Néolithique** (soit 6000 ans). Le phénomène géologique à l'origine de ce changement qui **s'accélère** depuis le début des temps modernes (XVIème siècle) est pour la première fois dans l'histoire de la Terre un phénomène géologique **conscient et "réfléchi"**, un peu "apprenti sorcier" sur les bords, **capable d'organiser délibérément** pour le meilleur ou pour le pire le cours des évènements.

Vous l'avez deviné : **Nous** sommes ce nouveau phénomène. Cette image **n'est pas une allégorie**. C'est la pure **réalité scientifique**.

Echelle de durée et de temps.

L'échelle des temps géologiques figure en âges "absolus" au début de cet ouvrage. L'unité de temps de cette échelle est le **million d'années**. A l'opposé, pour évaluer la rapidité des changements actuels dus à l'intervention de l'homme, l'unité de temps devrait être la **dizaine d'années**.

A l'**échelle humaine**, nous vivons les éruptions volcaniques, les séismes ou les cyclones comme des catastrophes plus ou moins localisées. On en mesure le déroulement en **minutes**, en **heures**, en **jours** ou en **mois**. Ce ne sont pourtant que des **crises** très passagères dans la **dynamique géologique** par ailleurs **relativement continue**.

Voici pour fixer les idées trois ordres de grandeur d'unités de temps géologiques ; trois "échelles de référence" pour chronométrer des évènements géologiques de durées très inégales :

- **Mouvements tectoniques** : ouverture et évolution des océans, formation des montagnes, surrection ou affaissement de compartiments de l'écorce terrestre: l'**unité de temps** est la **centaine de milliers** ou plutôt le **million d'années**, pour des phénomènes dont la durée peut être comprise entre 10 millions et quelques centaines de millions d'années.

- **Changements climatiques** (pour le Quaternaire plus spécialement) : l'unité de temps est le millier d'années ou le siècle, selon que l'on s'intéresse aux cycles majeurs globaux de 25000 à 100000 ans, ou aux évolutions régionales beaucoup plus rapides (désertification du Sahara par exemple).

6.2 L'évolution du milieu karstique.

La notion de durée est donc toute relative. La rapidité d'évolution du milieu karstique par rapport à celle du cadre extérieur nous en donne une image.

Considérant un taux d'ablation de 100 mm pour 1000 ans correspondant à $100 \text{ m}^3 / \text{km}^2 / \text{an}$ (B. Collignon, "Spéléologie...", p. 33), on peut aisément concevoir qu'un système de drainage puisse installer son réseau de conduits dans un "laps" de temps de 20000 à 50000 ans. Cela est d'autant plus plausible que l'érosion mécanique ajoute ses effets à ceux de la corrosion dès que le réseau de conduits est assez spacieux et que le flux d'eau est suffisamment puissant.

D'autre part, en particulier dans un karst de forte dénivelée (haute montagne, entre autres) le potentiel de karstification peut être sélectif et favoriser les conduits les mieux disposés à recevoir un maximum de débit. B. Collignon (op. cit.) citant R. Maire dans le tableau de la p. 36, montre ainsi que les drains verticaux ou pentés d'un karst de haute montagne sont beaucoup plus touchés par la dissolution que le lapiaz de surface.

On peut donc mesurer la progression d'un réseau de cavernes à l'unité du millier d'années. Cela suggère que la rapidité d'évolution du karst donne à ce milieu une exceptionnelle capacité d'adaptation à toute modification du cadre extérieur (tectonique ou climatique) et lui permet en conséquence d'enregistrer, donc d'archiver les étapes de ces changements.

Les transformations du karst dans la mouvance morphostructurale. (Fig 23)

Prenons le cas du karst barré qui va nous permettre de suivre entre autres l'évolution d'une zone noyée. Car ce qui impose les changements les plus radicaux dans le fonctionnement et en conséquence la structure de ce type de karst, ce sont les fluctuations du seuil de débordement de la zone noyée, c'est à dire le niveau de base karstique. Ces fluctuations sont généralement commandées par les variations du niveau de base régional ou géographique.

Abaissement du niveau de base régional :

- **Causes géographiques ou climatiques** : approfondissement des vallées. Ce phénomène peut être dû à un abaissement général du niveau moyen des mers lié à une glaciation : une bonne partie des eaux marines est figée dans les calottes glaciaires qui étendent leur emprise tandis que les rivages s'exondent et deviennent perchés. Ces variations globales du niveau marin sont dites "eustatiques".

- **Causes tectoniques** : surrection relative du massif (chaînons nord-pyrénéens); surrection générale de la région provoquant l'encaissement des vallées (causses).

- **Conséquences**: enfouissement du système de drainage qui, pour rester raccordé au niveau de base, abandonne l'étage devenu perché. La partie supérieure de l'ancien réseau phréatique devient épiphréatique et son cours se réorganise suivant le nouveau profil d'équilibre propre à cette zone, ou alors elle s'assèche entièrement. Dans le premier cas, la réorganisation peut s'accompagner d'un surcreusement en "trou de serrure" des anciens conduits noyés. Le changement du régime des contraintes qui passe de la pression hydrostatique à la pression atmosphérique provoque des éboulements du plafond ou des parois.

Au sein de la zone noyée se creusent éventuellement de nouveaux conduits.

Élévation du niveau de base régional :

- **Causes géographiques ou climatiques** : comblement des vallées, ennoyage des rivages (grotte Cosquer) suite à la remontée eustatique du niveau marin en raison d'un réchauffement postglaciaire.

- **Causes tectoniques** : affaissement relatif du massif; affaissement régional provoquant le remblaiement alluvial des zones basses.

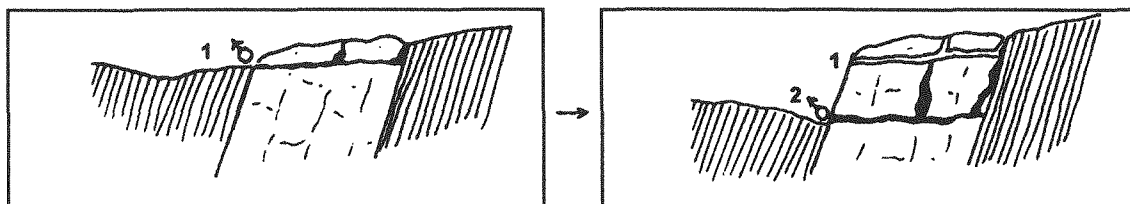
- **Conséquences** : colmatage progressif au moins partiel des conduits qui fonctionnaient en régime seminoyé et qui passent dans la zone noyée permanente; de nouveaux drains s'ouvrent plus haut, en particulier dans la nouvelle zone épiphréatique. A l'opposé, les conduits les plus profonds de l'ancien réseau noyé peuvent devenir "marginaux" par rapport au flux hydraulique et se colmater entièrement. L'ancien exutoire peut se trouver bouché, ou au contraire continuer à fonctionner en source "vaclusienne" profonde perçant à travers le recouvrement alluvial. D'anciennes pertes deviennent émissives en permanence. Mais l'eau a pu aussi s'aménager une sortie de secours remontante toute neuve dans les fissures de la masse calcaire, jusqu'au nouveau niveau de base.

C'est également dans ce contexte d'élévation du niveau de base que se creusent au plafond les galeries "paragénétique" tandis qu'au plancher s'épaissit le remplissage alluvial (voir plus loin).

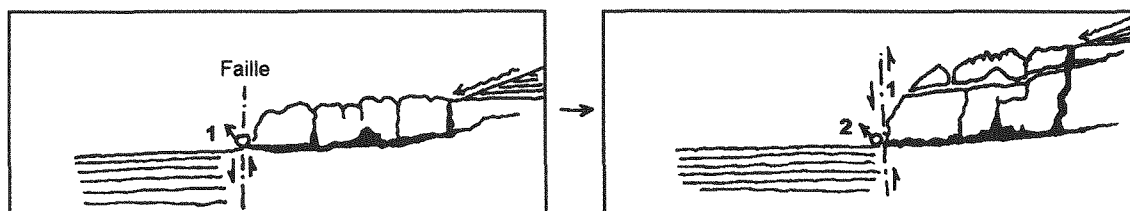
Élévation du niveau de base karstique :

- **Causes géomorphologiques :** colmatage de l'exutoire par un glissement de terrain, une coulée de boue, la mise en place d'un glacier...
- **Causes tectoniques :** rejeu d'une faille obstruant l'exutoire. L'eau se trouvera vite un autre passage.
- **Conséquences :** réennoiment temporaire d'une partie du réseau sur une hauteur de plusieurs mètres à quelques dizaines de mètres, avec corrosion des concrétions et éventuellement creusement de conduits remontants, de galeries paragénetiques ...

Abaissement du niveau de base

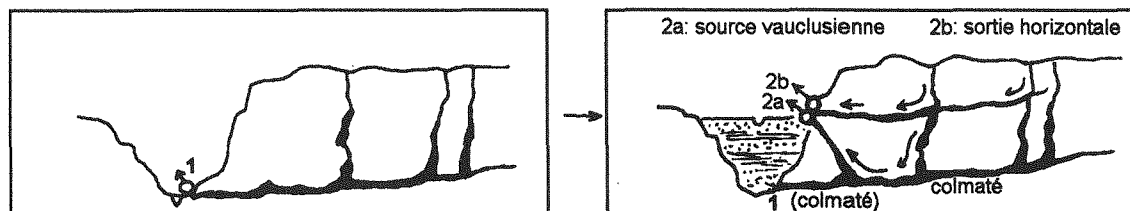


Aprofondissement de la vallée

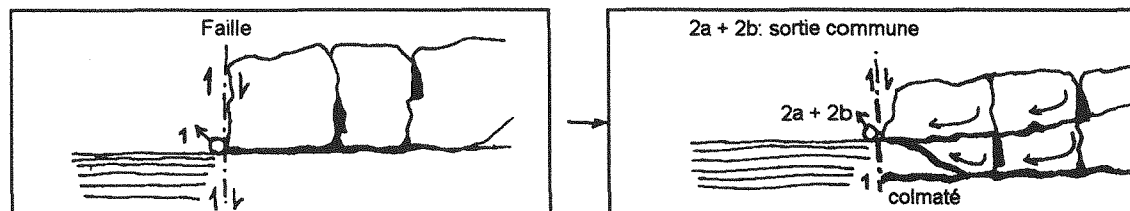


Surrection du massif

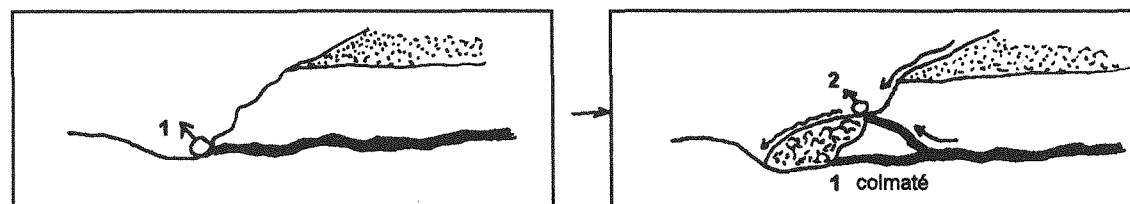
Élévation du niveau de base



Comblement de la vallée



Affaissement du massif



Obturation de l'exutoire

Fig. 23 : Adaptation du karst et du réseau spéléologique aux changements du cadre extérieur.
Les variations du niveau de base régional ou géographique induisent celles du niveau de base karstique.

Conséquences des variations du niveau de base sur la structure interne du karst : réseaux spéléologiques étagés (polyphasés) ; émergences "fossiles" perchées.

Le résultat de tous les événements que nous venons de passer en revue - et la liste des causes n'est pas exhaustive - est la **superposition**, dans un même massif, des différentes étapes ou **phases** de l'évolution d'un réseau spéléologique. On dit d'un karst qu'il est polyphasé lorsqu'il comprend plusieurs étages de réseaux correspondant à **des étapes successives** de son développement.

Dans un karst polyphasé, on tentera donc de séparer l'étage devenu totalement inactif (fossile diraient improprement certains spéléos, car le terme "fossile" est réservé au paléokarst : voir plus loin cette rubrique), de l'étage actif, la rivière, que chacun veut atteindre. Mais entre les deux, il y a les émissaires de trop-plein qui, comme à la Luire (Vercors) peuvent se trouver perchés plusieurs centaines de mètres au dessus de l'actif d'étiage. A la Pierre-Saint-Martin, lors des crues de l'automne 1994, le réseau Arphidia, considéré inactif au niveau de la salle Threutard, s'est mis en charge sur 250 m. Il ne faisait pas bon y bivouaquer !

En fait, c'est là que les choses sont difficiles à démêler, car du fait de l'**évolution progressive** du karst, tous les réseaux anciens ou modernes restent **interconnectés**. Et bien malin est le spéléo qui sait à coup sûr faire la part, dans le **réseau spéléologique polyphasé**, entre ce qui est actif, ce qui ne l'est vraiment plus, et ce qui l'est " p'tet ben qu'oui, p'tet ben qu'on"...

Retenons simplement qu'en raison de leur rapidité d'adaptation aux changements extérieurs mais aussi de leur vie longue et heureuse (car remplie de surprises), bien rares sont les karsts "**monophasés**", si même ils existent. La question peut se poser pour la Floride et le Yucatan.

Seuls, en fin de compte, peuvent être considérés sans hésitation comme tels le récif ou la plate-forme carbonatée qui pour la première fois émerge de la mer et récolte sur le visage les premières gouttes de pluie. Délicieuses à faire fondre de plaisir le plus coriace des calcaires.

Le réseau Trombe (massif d'Arbas Haute-Garonne) qui se rendit célèbre à la fin des années quarante par le gouffre de la Henne-Morte, est l'un des plus remarquables karsts polyphasés d'Europe (fig. 24 ci-dessous).

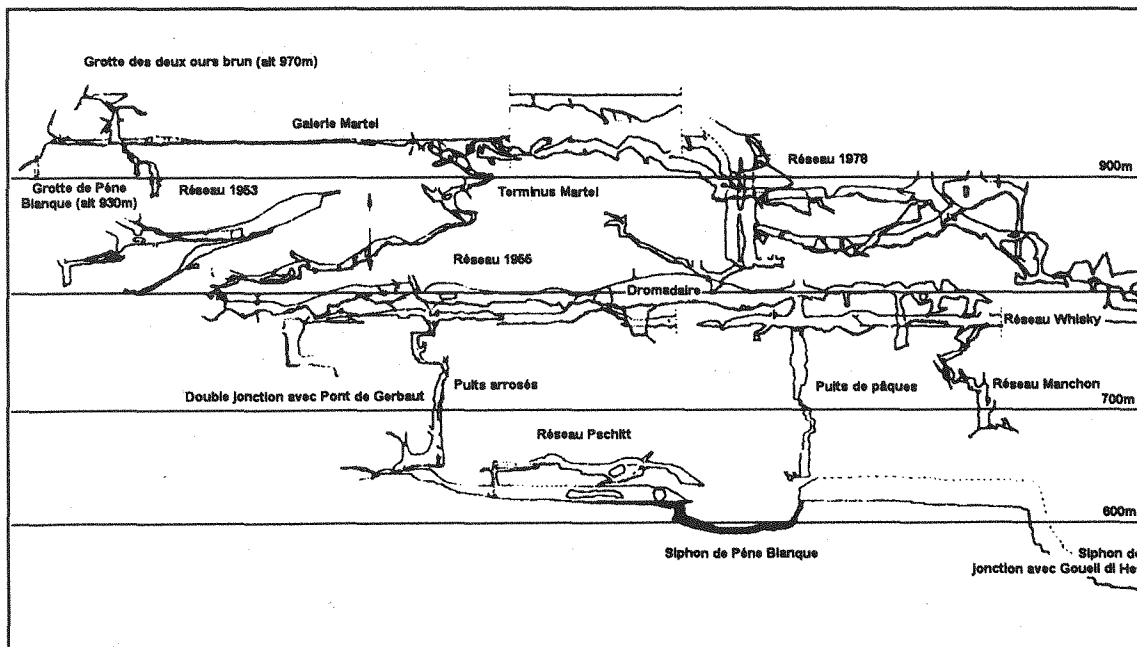


Fig. 24 : Etagement de réseaux - karst polyphasé : Réseau Félix Trombe, massif d'Arbas, Hte Garonne.

Extrait de « la Coumo d'Hyuemedo », de Maurice Duchène et Pierre-André Drillat - (Groupe Spéléologique des Pyrénées - Toulouse 1982)

Emergences "fossiles" perchées.

Ces exutoires du passé, maintenant perchés bien au dessus du niveau actuel de la plaine ou du fond de la vallée, s'étagent suivant **certaines cotes** topographiques correspondant à d'anciennes positions du niveau de base (fig. 25). Il est donc impératif, dans la synthèse karstologique d'un massif, d'en faire le relevé systématique avec un bon altimètre, sans en négliger aucun, qu'il s'agisse d'un porche majestueux ou d'un trou de blaireaux. Car les trous de blaireaux sont parfois groupés comme autant de **griffons** d'un delta souterrain fossile.

La disposition et l'aspect général de ces exutoires fossiles dépendent plus ou moins de trois facteurs: 1) leur situation dans le réseau actif du moment (galerie horizontale, conduit vaclusien...), 2) du contexte climatique de l'époque (dimensions liées à l'importance des débits...) et 3) de leur préservation dans le cadre morphologique actuel (bonne intégrité ou érosion partielle par recul du versant).

Les "trous de blaireaux" (et attention! je sais d'expérience qu'il peut effectivement y loger une famille de blaireaux) correspondent parfois à d'anciennes émergences légèrement remontantes derrière lesquelles, pas très loin, se développe l'ancienne galerie épiphréatique ou le conduit noyé de l'époque, aux parois taraudées tapissées de boue de décantation.

Mais dans tous les cas, si leur préservation est bonne, les anciennes émergences conservent quelques signes morphologiques qui permettent de les identifier.

Raccordement des étages et émergences "fossiles" aux surfaces régionales du passé.

C'est l'exercice le plus difficile mais il n'est pas interdit de le tenter. La réussite n'est de toute façon pas assurée.

Le panorama d'un piémont offre souvent à perte de vue une morphologie douce dans laquelle les sommets de collines se tiennent à peu près au même niveau, ou s'organisent suivant un plan en très légère pente dans une direction donnée. Cette surface "imaginaire", échancrée aujourd'hui par des vallons encaissés, a sans doute eu une réalité dans le passé, formant alors un "glacis" continu, un niveau d'érosion ou de remblaiement. Son altitude de raccordement à un relief karstique peut expliquer la présence dans celui-ci, à tel niveau, d'un étage de cavernes ou d'émergences: c'est un ancien niveau de base régional.

D'où l'intérêt de savoir bien utiliser la carte topographique I.G.N. au 1 : 25 000 qui donne toujours une excellente image de la morphologie.

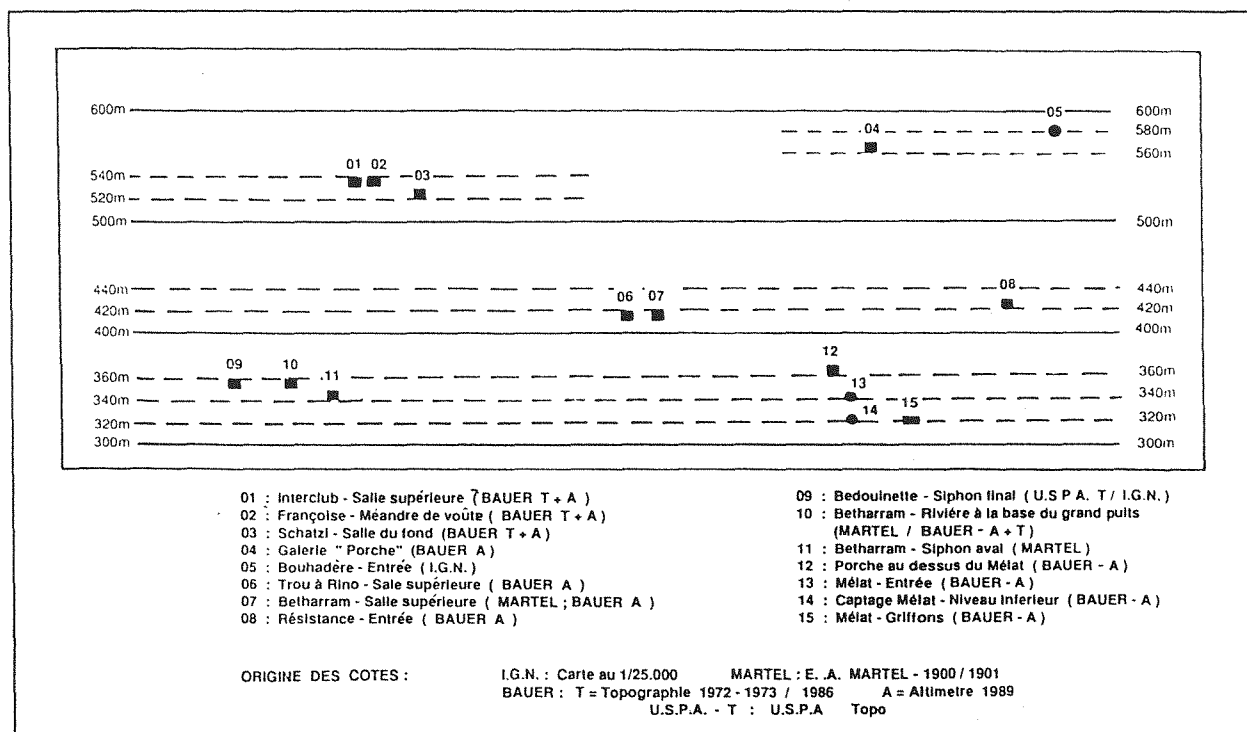


Fig. 25 : Tableau altimétrique d'émergences fossiles et de cavités étagées.
Le chaînon Aptien de Betharram, Pyrénées Atlantiques et Hautes Pyrénées.
Jacques Bauer, « La rivière interdite », C.D.S. 64, Pau - 1991.

7. APPRENDRE A LIRE LE KARST.

" La grotte, c'est du temps fossile ... car la Terre est creuse et parle des Origines ... " (P. Cabrol et B. Férié).

Dans ce qui suit, nous nous limiterons à quelques remarques et observations de base généralement essentielles à la compréhension d'un réseau spéléologique et à son insertion dans le cadre régional. Nous serons loin d'être exhaustif. Il est donc inutile de chercher dans ces pages une encyclopédie.

7.1. Une bonne topographie d'abord !

Détachées de leur portée et éparpillées sur une feuille blanche, les notes du plus harmonieux morceau de musique ne sont que signes noirs ou blancs inutiles. Tout juste reconnaîtra-t-on leur nature d'éléments de l'alphabet musical.

Il en est de même des observations faites dans un réseau spéléologique si celles-ci ne sont pas "pointées" sur une bonne topo. Et que l'on se souvienne: pour qu'une topo soit qualifiée de "bonne" il ne suffit pas qu'elle "ferme" bien en X et Y, mais il faut qu'elle soit cotée en Z avec une bonne précision, et qu'elle soit rattachée au cadre extérieur du massif auquel elle s'intègre.

A la limite, une bonne polygonale dotée de tous les avantages ci-dessus est préférable à un splendide plan sans autre altimétrie que des cotes relatives, coupé de ses racines, et qu'il est de ce fait impossible de replacer dans son "berceau".

Un exemple de topographie parfaitement utilisable même à l'état de polygonale dans la réflexion spéléo-géologique est celle qu'a réalisée l'association "Oxykarst - s.c. Comminges" pour le réseau de Kakouetta, alias Larrandaburu ou Arresteliako-Lézéa (fig. 26 - exploité Toporobot par S. Vogrig).

La polygonale en perspective montre la complexité du cheminement du réseau "fossile" au gré des contraintes de cheminement (fracturation N-110° à 120° et N-050° à N-070°), aspect déjà abordé dans la fig. 10..

Le profil en long de ce réseau qui s'établit entre les cotes + 800 et + 600 m se caractérise à la fois par une sinuosité dans le sens vertical et une courbure progressive d'ensemble vers le nord, vers l'aval, bien révélée par l'enveloppe supérieure de la polygonale. A première vue, on pourrait voir dans cette attitude générale l'influence du pendage stratigraphique. Mais dans ce cas, il est difficile de justifier le tracé de détail en dents de scie de grande amplitude. On est donc plutôt tenté de faire de cette enveloppe supérieure le "fantôme" de la surface piézométrique habituelle de l'époque, au ras de laquelle se serait développée la caverne: un axe de drainage majeur qui aurait fonctionné alors en régime noyé permanent, d'où les montées et descentes de son parcours tortueux.

Intéressantes aussi les observations faites dans l'une des entrées verticales : le gouffre Odita Lécia. Les vagues d'érosion (voir plus loin) gravées dans les parois du puits indiqueraient un écoulement remontant, suggérant une fonction au moins occasionnelle de gouffre émissif, à la manière de la grotte de la Loire dans le Vercors.

Il faut chercher le paléoéutoire du réseau vers la cote 600 m, sur la bordure nord du massif. L'entrée du gouffre Odita-Lécia s'ouvre à 835 m, ce qui laisse supposer des mises en charge de près de 250 m. L'obturation temporaire de l'émergence normale (600 m) par une langue glaciaire peut fort bien expliquer une telle variation du niveau de débordement.

Cette réflexion aurait été impossible avec une topo non calée sur des cotes absolues, et non rattachée à son cadre régional.

7.2. Attitudes de conduits et formes de creusement.

7.2.1. Karst noyé.

Constaté la tortuosité verticale actuelle d'une galerie inactive ne suffit cependant pas à en faire un ancien conduit de zone noyée. Il faut que cette attitude puisse être jugée originelle. Dans cette analyse, les plafonds sont l'indice le plus probant. Les variations altimétriques importantes d'un plafond dans le sens longitudinal peuvent être dues à des éboulements. Il faut donc rechercher une continuité morphologique d'origine. L'analyse de l'état du plancher, nu ou masqué sous des blocs éboulés, peut aider.

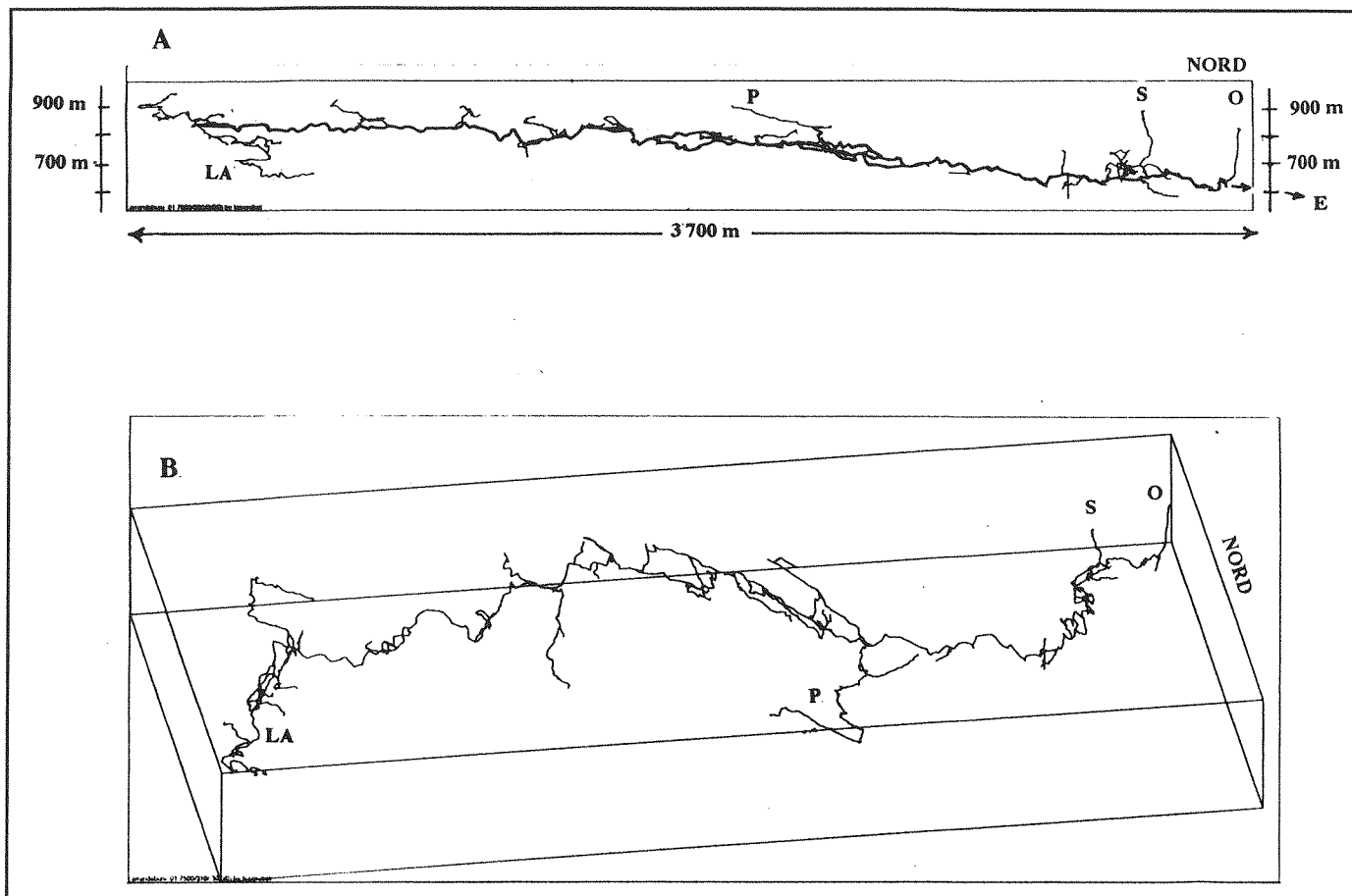


Fig. 26 : Le réseau de Kakouetta (Arresteliako Ziloua ou Larrandaburu), Pays de Soule, Pyrénées Atlantiques.

Note: dans la langue basque, Ziloua = trou; lézéea, lécia, lézia = gouffre, d'où les variantes sans grande importance dans le qualificatif du réseau - et l'orthographe (!).

A : profil vertical nord - sud. O: gouffre Odita Lécia. S: Trou souffleur du Larrandaburu. E: vers l'exutoire « fossile ». A l'heure où nous mettons sous presse, celui-ci est encore à identifier. LA: collecteur actif du Lakhoura, coulant vers l'ouest à la surface du socle. P: affluent de la perte d'Eruso. (cotes approximatives).

B : bloc diagramme en perspective du réseau. Tracé réalisé par Stéphane Vogrig sur Toporobot à partir des valeurs topo d'Oxykarst - S.C. Comminges et associés.

Donc, ce n'est que dans la zone noyée qu'un drain peut s'offrir la fantaisie de faire des montagnes russes. En milieu noyé permanent, cette sinuosité peut en effet être la règle puisqu'à priori il n'est pas question de profil d'équilibre : ici règne la loi du siphon, indifférente en apparence à la pesanteur, car entièrement axée sur le gradient hydraulique. Par contre, l'intervalle épiphréatique est favorable à l'installation d'un profil d'équilibre (voir p. 20). Le drain a donc tendance à suivre une pente plus régulière en conformité avec la surface piézométrique d'étiage: on entre dans le domaine des grandes galeries horizontales, ce qui n'exclut pas l'interruption de ce profil homogène par quelques siphons permanents (voir aussi fig. 8, 12, 13 et 14).

Galerias syngénétiques, galerias paragénétiques.

Philippe Renault à qui l'on doit ce concept définit ainsi ces deux types de galeries⁶:

"Suivant la vitesse des circulations aquifères, nous distinguerons, en régime noyé, les galerias paragénétiques, correspondant à un écoulement inférieur à 10 cm/s, avec sédimentation continue de matériaux fins et creusement par corrosion uniquement à la voûte, et les galerias syngénétiques, avec écoulement assez rapide pour qu'il n'y ait aucun dépôt, et où la corrosion s'effectue sur toute la section du conduit."

⁶ P. Renault - La formation des cavernes (page 65) P. U. F. , collection Que sais-je? - 1970.

Concernant les galeries paragénétiques, il en existe de vastes dimensions, dont les vestiges de remplissage perchés jusqu'au plafond témoignent d'une sédimentation torrentielle (gravier et galets pluricentimétriques- par exemple dans la grande "salle" supérieure des grottes de Bétharram, en réalité spacieuse galerie paragénétique). Il faut sans doute interpréter cette situation comme résultant du comblement "postgénétique" d'une caverne paragénétique préalablement vidée de son remplissage fin. Nous y reviendrons.

Formes de creusement et attitudes de conduits en régime noyé.

Le creusement syngénétique façonne les conduites dites "forcées". Mais il n'en résulte pas uniquement des tuyaux cylindriques ou ovales, des laminoirs d'interstrates, ou autres conduits simples aux parois lisses. La section des galeries syngénétiques peut être très variée et changer de géométrie sur la longueur d'un même conduit. Le point important est l'absence de sédimentation, encore qu'un ralentissement du courant à l'étiage puisse conduire à la décantation de boue.

Car, autant qu'on en puisse juger, les galeries syngénétiques s'établissent souvent dans la zone noyée permanente, plutôt à l'écart des axes d'apports terrigènes grossiers. Mais cette situation ne vaut sans doute qu'à leurs débuts puisqu'elles peuvent par la suite se colmater dans le cours de l'évolution du système karstique.

Fonctionnant au sein même du karst noyé, les conduits syngénétiques peuvent prendre toutes les attitudes entre l'horizontale et la verticale. Souvent, ils sont obliques.

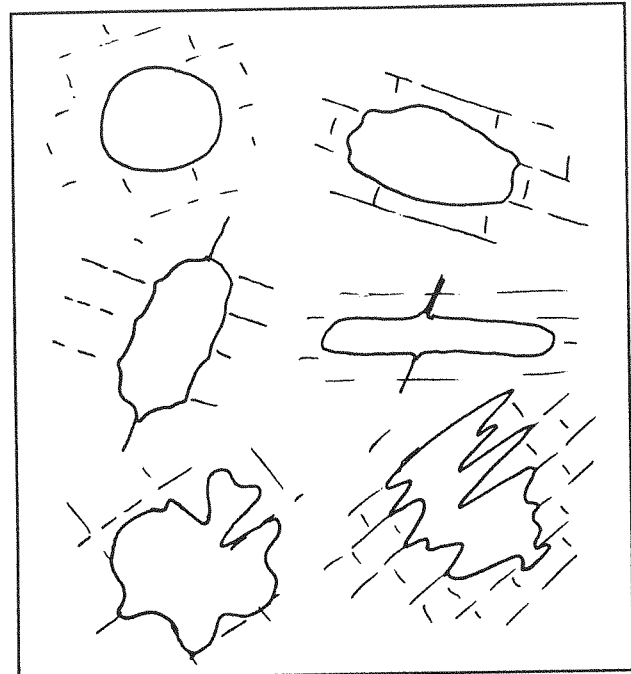


Fig. 27 : sections transversales de galeries syngénétiques.

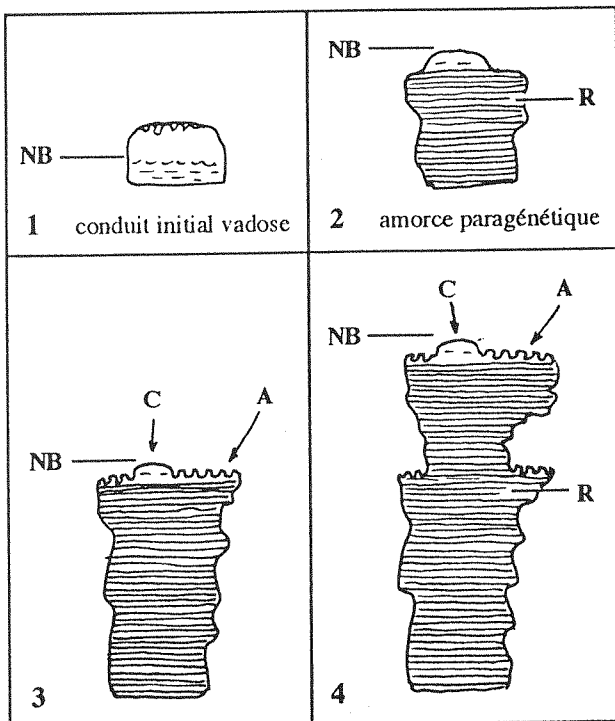


Fig. 28 : creusement paragénétique.

R: remplissage; C: chenal de voûte; A: anastomoses; NB: niveau de base s'élevant (1, 2, 3, 4.)

Le creusement paragénétique est souvent induit par une remontée progressive du niveau de base régional (grotte de Pech-Merle dans les Causses du Quercy). Il concerne donc surtout les galeries horizontales de la zone épinoyée évoluant vers un régime d'inondation pérenne. En raison du ralentissement de l'écoulement, les conduits ont tendance à se colmater par le dépôt d'alluvions. L'eau doit alors se frayer un passage en creusant vers le haut, corrodant le plafond (fig. 28). Dans l'axe du flux se gravent les chenaux de voûte et sur ses marges, si la largeur de la galerie le permet, se cisèlent au gré de la fissuration les anastomoses ou "lapias de voûte" (fig. 28 et 29).

Invasion du karst noyé par des coulées de solifluxion.

Ce phénomène peut conduire au colmatage brutal partiel de certains drains qui néanmoins continuent à fonctionner tant bien que mal. Alors peuvent s'installer des chenaux de voûte épousant le profil en montagnes russes du plafond de ces conduits (grottes de Sare, Pays Basque). Nous reverrons ce point dans la rubrique sur le remplissage.



Fig. 29 : chenal de voûte et anastomoses.

Stabilité prolongée du niveau de base : élargissement des galeries, grands laminoirs et plafonds plats.

Il arrive que le niveau de base régional se stabilise pour une longue période. Dans ce cas, si un équilibre a été atteint dans l'évolution du réseau spéléologique, il n'y a plus de creusement ni vers le bas, ni vers le haut. Il ne reste donc que les côtés que l'eau va s'employer à corroder pour autant qu'elle ait gardé quelque agressivité.

Ainsi se développent de larges espaces au plafond plat et horizontal, au plancher nu (régime syngénétique) ou couvert d'alluvions (régime paragénétique). Dans ce dernier cas s'établissent éventuellement chenaux de voûte et anastomoses (fig. 28 - 3 et 4).

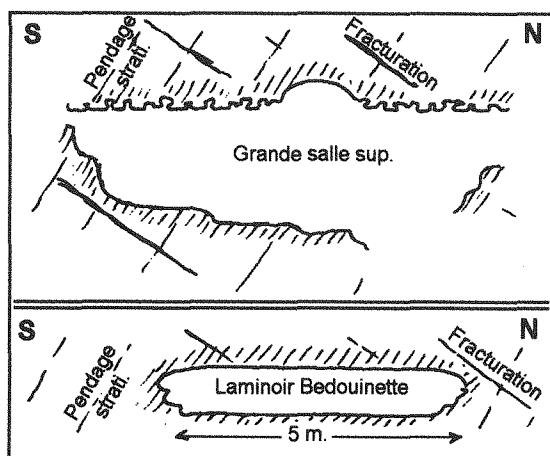


Fig. 30 : indifférence d'un laminoir ou d'un plafond plat vis-à-vis du contexte structural.
(Grotte de Bétharram, Pyrénées atlantiques).

Ce qui importe dans cette géométrie, c'est la **platitude du plafond** et sa cote, à rattacher à la géomorphologie régionale (voir p. 39). Il ne faut surtout pas chercher là l'influence du pendage stratigraphique ou d'une supposée discontinuité horizontale, même si les parois du laminoir sont ornées de banquettes comme dans l'amont des grottes de Bétharram. C'est le niveau de base, donc la surface piézométrique, qui commande la disposition des lieux, quelle que soit l'attitude structurale du milieu lithologique (fig. 30).

Banquettes.

Il s'agit des épaulements ou balconnets généralement horizontaux courant le long des parois de certains méandres, canyons, ou galeries paragénétiques. C'est une forme du milieu noyé épiphréatique aussi bien que d'écoulement en régime vadose (rivières souterraines). Elle situe les positions successives du plan de creusement latéral ou du profil d'équilibre de la rivière.

Souvent, la banquette souligne le niveau d'une phase de remplissage détritique. En effet, lorsqu'il se produit une rémission dans le cours de l'alluvionnement en creusement paragénétique, le courant n'ayant pas la force de recreuser le remplissage élargit le conduit par corrosion des parois (fig. 31)

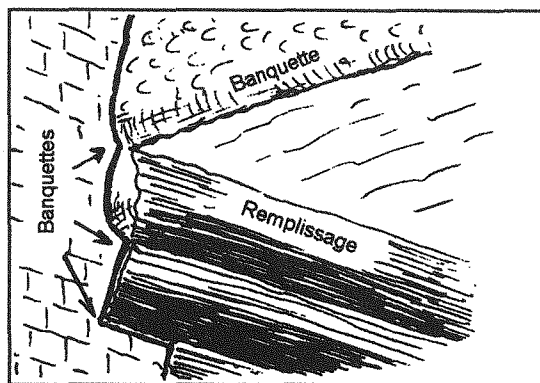


Fig. 31 : Banquettes limitées vues en perspective.
Noter le creusement latéral aux sommets successifs du remplissage.

Banquettes pentées.

Dans certains conduits pentés des grottes de Sare envahis par des coulées de solifluxion remaniées par l'écoulement, les banquettes restent **parallèles à l'obliquité de la galerie**, soulignant probablement (?) ici aussi un ancien niveau de colmatage sans doute (??) réaménagé quelque peu par le courant. Les points d'interrogation signifient que je n'ai pas assez analysé sur le terrain cette observation pour être définitivement affirmatif. Ce qu'il faut retenir, c'est l'existence de banquettes fortement pentées ... et tenter de les justifier.

Vagues d'érosion.

Elles peuvent orner parois, plafonds et planchers. On les nomme aussi **coups de gouge**. Elles sont produites par écoulement turbulent en régime noyé. Leur importance tient à ce qu'elles donnent le sens de l'écoulement contemporain ainsi qu'une idée de sa vitesse : plus elles sont grandes, plus cette vitesse était faible (fig. 33).

La forme la plus classique des vagues d'érosion est celle d'une cuillère (fig. 32), d'où l'appellation de "coup de gouge". Mais il existe également des formes de largeur quasi infinie, véritables vagues aux crêtes parallèles. Dans tous les cas, la section du creux parallèlement au courant est dissymétrique, présentant sa plus forte concavité vers l'amont contemporain (fig. 32).

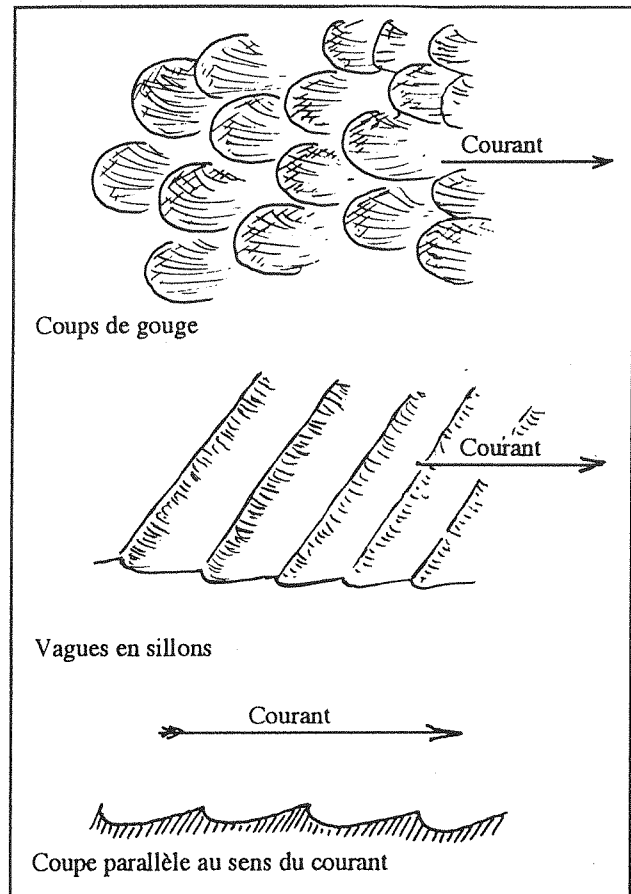


Fig. 32 : vagues d'érosion.

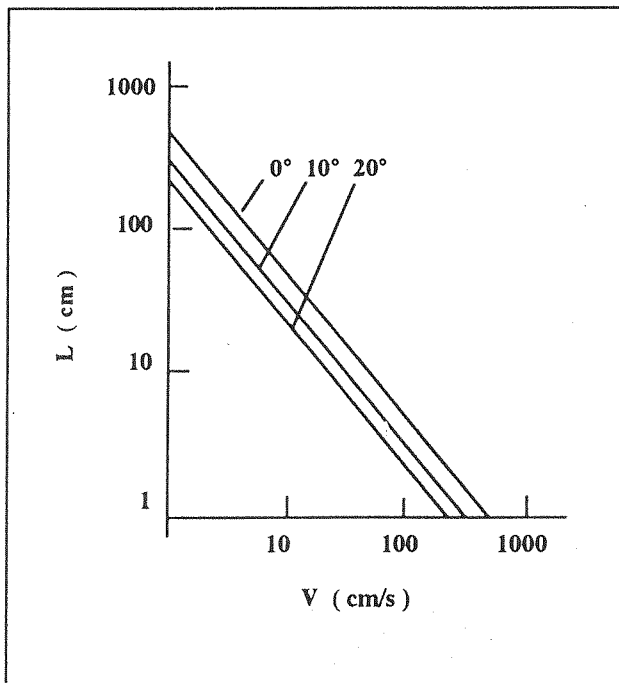


Fig. 33 : relation entre la longueur des vagues d'érosion et la vitesse du courant.

Longueur L en centimètres, vitesse V en cm/s. Tiré de l'ouvrage de Philippe Renault : « La formation des cavernes », d'après Curl, Journal of geology -1966.

L'analyse des vagues d'érosion révèle que de nombreux conduits ont fonctionné dans un sens puis dans l'autre, ou que d'autres étaient des drains remontants (vaclusiens). Dans son étude du système Niaux-Lombrives (Ariège), Patrick Sorriaux⁷ a pu montrer par l'analyse de ces "microformes de paroi" (comme on les nomme globalement) que le gradient hydraulique s'était inversé au cours de l'évolution du réseau, entre les vallées de l'Ariège et du Vicdessos, en fonction de la présence ou de l'absence des glaciers.

Ailleurs, dans le karst de la Pierre-Saint-Martin, versant Issaux - Lées-Athas, on a pu prouver ainsi le fonctionnement passé d'une grande galerie oblique du réseau de Napia, en conduit vaclusien (courant ascendant - voir aussi la remarque sur le gouffre Odita Lécia, p. 40).

Les vagues d'érosion ne doivent pas être confondues avec les cupules de corrosion qui sont des alvéoles généralement plus symétriques liées à la dissolution en milieu calme (absence de courant).

⁷ P. Sorriaux: Contribution à l'étude de la sédimentation en milieu karstique. Le système de Niaux - Lombrives - Sabart (Pyrénées Ariégeoises). Thèse de 3^e cycle, Laboratoire souterrain du C.N.R.S. à Moulis et Université Paul Sabatier, Toulouse - 1982.

Banquettes et vagues d'érosion sont souvent associées, suggérant de ce fait l'antériorité de l'épaulement et de l'intervalle de creusement qui lui succède, sur le remplissage qui éventuellement occupe ce "balconnet" (car on pouvait supposer, en conditions paragénétiques, la simultanéité, ou plutôt la continuité creusement-remplissage).

Pendants de voûte

Les pendants de voûte ressemblent à de volumineuses excroissances de la roche. On les confond parfois à tort avec de vieilles concrétions. Certains ont en effet l'allure de grosses stalactites évasées ou de pattes d'éléphant, et se trouvent rassemblés de façon plus ou moins régulière sous un même plafond. Ce sont les éléments d'un "lapiaz de voûte" géant situé à la manière des anastomoses au toit d'une galerie paragénétique. Ils sont parfois partiellement noyés dans le remplissage, comme si celui-ci avait participé à l'action de corrosion.

Un autre type de pendants, de forme effilée ou tourmentée, est plus souvent associé à la zone noyée permanente, voire profonde : les plongeurs qui ont à franchir certaines mauvaises chicanes le savent bien. Le façonnement de ces protubérances est sans doute dû à une dissolution différentielle, liée soit à la présence de zones de faiblesse dans la roche, soit à l'angle d'attaque aléatoire d'un écoulement un peu turbulent : cette interprétation semble étayée par la "sculpture" de tels pendants aux dépens d'un calcaire parfaitement homogène et massif.

Dans le cours de certaines grandes galeries subhorizontales dont la morphologie de plafond et de paroi indique un régime épiphréatique passé, un changement drastique d'aspect au niveau d'un point bas du profil peut suggérer ici la présence d'un ancien siphon. On peut observer cette disposition dans la grotte de Betchanka, Pays de Soule, Pyrénées atlantiques, entre la salle de la Borne et le puits De Joly. Le passage de l'ancien siphon supposé se distingue du reste de la galerie par des formes tourmentées, aiguës, avec de nombreuses coupoles de dissolution.

Coupoles de dissolution ou de corrosion.

Ces formes d'érosion hémisphériques, plus souvent ellipsoïdales, affectent le plafond ou les parois de galeries ou de salles ayant fonctionné en régime noyé. On les trouve isolées ou groupées, au point lorsqu'elles sont serrées, de hérissier la paroi d'arêtes vives. Ailleurs elles peuvent être emboîtées les unes dans les autres. Fréquemment, si ce n'est généralement, elles sont plus ou moins centrées sur une fissure orientée suivant le grand axe de l'ellipsoïde (fig. 34).

Résultant d'une action d'érosion purement chimique, les coupoles ne doivent pas être confondues avec les marmites creusées par l'érosion mécanique en régime vadose (voir plus loin).

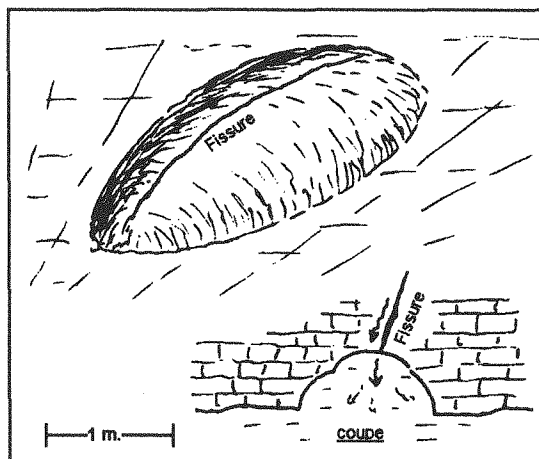


Fig. 34 : couple de dissolution ou corrosion

Une explication de leur formation à laquelle la présence de la fissure axiale donne un certain crédit fait appel à l'augmentation de l'agressivité du solvant au point de confluence de deux eaux de concentrations en acide carbonique différentes : l'une coulant dans le drain, l'autre percolant par la fissure (fig. 34). Mais quoiqu'il en soit, en raison même de leur disposition, il paraît dans la plupart des cas bien difficile de les interpréter comme le produit d'un écoulement "sauvagement" turbulent, voire tourbillonnaire.

Réennoiment temporaire de cavités :

Abaissement ou élévation du niveau de base régional n'ont jamais été liés à des processus opérant en sens unique, mais relèvent plutôt de tendances coupées d'hésitations et de retours en arrière. Parfois d'ailleurs, au cours d'une évolution continue du niveau de base régional vers le bas, en réponse à la surrection du massif par exemple (fig. 23, p. 37), un colmatage de l'exutoire par un brusque éboulement ou une coulée de boue peut faire remonter sensiblement le niveau de base karstique.

Il se produit alors un réennoisement plus ou moins prolongé d'une partie de la cavité, avec mise en solution du concrétionnement antérieur. La grotte d'Isturitz - Oxocelhaya en Pays Basque offre de splendides exemples de ce phénomène, avec en particulier le pilier stalagmitique corrodé de la salle d'Isturitz. Des observations de cette nature ne doivent surtout pas être négligées, même lorsqu'elles sont peu spectaculaires, car elles indiquent un évènement dans l'histoire du réseau.

7.2.2. Karst aéré.

Formes de creusement et attitudes de conduits en régime vadose.

Pour mieux annoncer la teneur du propos, on aurait pu écrire ... **en régime d'écoulement libre**, car c'est bien une eau libre de cascade, de torrent ou de rivière coulant suivant une **pente tout comme à la surface**, qui va sculpter et ciseler la caverne, et non plus une eau captive et forcée obéissant au gradient de pression hydraulique. Toute la différence est là.

Recreusement et surcreusement : le trou de serrure.

Imaginons que se produise une inversion dans l'évolution du niveau de base : au terme d'une période d'élévation prolongée, le voici qui se met à descendre. La partie supérieure de l'étage noyé de la caverne passe dans la zone aérée.

Au courant qui avait travaillé en régime de creusement paragenétique, apportant et déposant sa charge de sédiments sans jamais pouvoir la déblayer, obligé de se frayer un maigre passage dans le plafond parfois même à travers une dense forêt d'anastomoses, va succéder un écoulement libre doté d'un **pouvoir érosif nettement accru**.

Et ça va recreuser, enlever toute cette "terre" puis surcreuser le plancher rocheux du conduit initial (fig. 35). Car l'écoulement torrentiel, déjà capable de remettre en suspension par sa seule puissance un sédiment fin déposé par un courant lent (fig. 36), est susceptible aussi de transporter à grande vitesse le matériel abrasif, sable, gravier et même galets, agents de l'érosion mécanique.

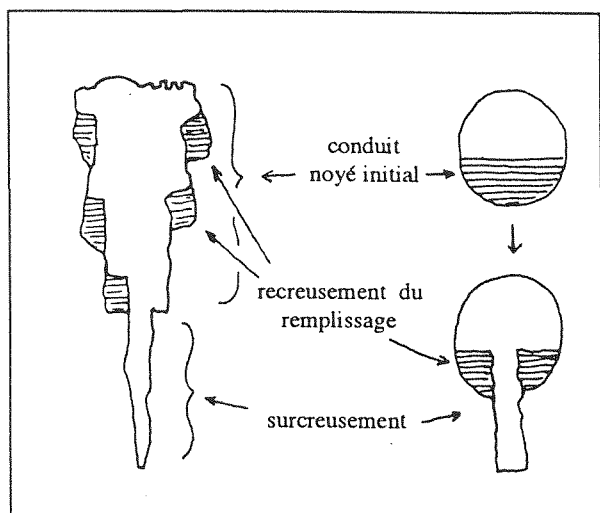
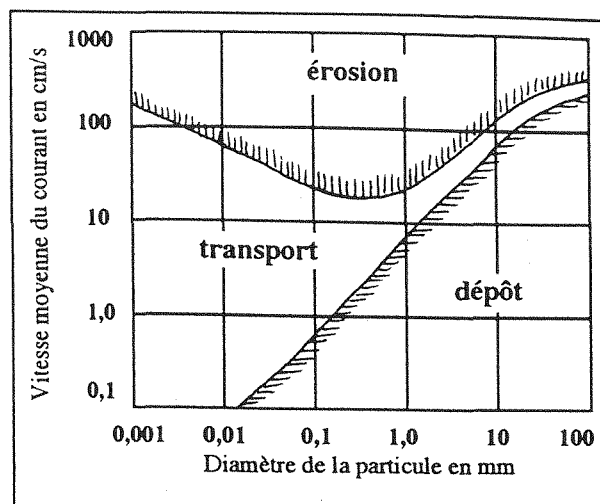


Fig. 35 : recreusement et surcreusement : le trou de serrure.

Fig. 36 ci-contre : diagramme de Hjulstrom donnant les relations entre le transport, le dépôt, et l'érosion de particules sédimentaires.

On constate par exemple qu'un grain de 0,01 mm de diamètre se dépose dans un courant de 0,1 cm/s mais que pour l'arracher (érosion) il faut un courant d'au-moins 70 cm/s. Pour les grains plus volumineux (plus de 0,5 mm) les choses sont plus faciles. Pour 1 mm par exemple: dépôt à 10 cm/s; arrachement à 20 cm/s.

Il est donc plus facile d'éroder un dépôt de sable ou de gravier qu'une couverture d'argiles, d'où la difficulté de recreuser en régime noyé le remplissage d'une galerie paragenétique.



Canyons et méandres.

Dans les deux cas, il s'agit d'incisions par enfouissement (ou encaissement) vertical d'un cours d'eau qui cherche à se raccorder au niveau de base. Si la contrainte de cheminement est un accident majeur imposant son tracé rectiligne, le résultat sera un **canyon** - sans plus de précision - aux parois verticales ou pentées selon le pendage de la fracture.

Si la contrainte de cheminement est moins imposante, laissant le cours d'eau prendre un peu de liberté pour serpenter en jouant des coudes, le canyon devient de plus en plus tortueux ou "méandrique" au fur et à mesure que s'enfonce la rivière (fig. 37).

Dans les deux cas il y a canyon. Mais on ne doit parler de **méandre** que dans le second, en référence aux classiques méandres de rivières. Les spéléos font trop souvent la confusion en qualifiant de "méandres" les incisions verticales rectilignes entre puits, par exemple.

Marmites.

A la différence des coupes de corrosion, formes propres au milieu noyé, les **marmites** sont typiques du **régime d'écoulement libre**. Elles relèvent essentiellement sinon exclusivement de l'érosion mécanique. On ne les trouve **en activité** qu'au **plancher des galeries**, comme au fond des canyons de surface qu'elles contribuent à creuser. Elles en sont même la cause principale: on parle de "marmitage".

Remarquons qu'en raison de l'enfouissement du lit du canyon, des vestiges de marmites plus ou moins tronquées peuvent se trouver perchés dans la paroi d'une gorge. Il s'agit alors de formes "fossiles" car elles ne se sont certainement pas développées dans cette situation.

Les marmites sont creusées par l'action d'éléments détritiques grossiers (surtout du gros gravier ou des galets) mus par un courant circulaire. Ce mouvement hydrodynamique est forcément induit par un confinement extérieur: les bords de la marmite, lorsque celle-ci existe déjà. Mais il faut bien un début. Une dépression, une irrégularité dans le lit du torrent, pourront servir d'amorce.

Microformes de parois en milieu vadose.

Exhaustif, le catalogue de ces microformes serait volumineux. Il y a celles qui se produisent à l'air libre, comme par exemple les cannelures de ruissellement ou les cupules de corrosion dues à l'aspersion..., et celles qui s'élaborent dans le lit des rivières. On retrouve là les "coups de gouge". Voici par exemple un conduit en pente, orné au plafond et sur la partie supérieure de ses parois, de vagues d'érosion **décimétriques** indiquant un courant ascendant lent. Dans les parties les moins pentées de la galerie, le bas des parois porte des vagues **centimétriques** superposées aux premières, indiquant un courant descendant rapide.

De toute évidence ce conduit a fonctionné d'abord en drain ascendant du karst noyé profond, puis s'est reconverti en lit de rivière rapide lors de son passage au régime vadose.

7.3. Remplissages.

Si les attitudes et la morphologie d'ensemble des conduits spéléologiques, de même que les méga- et microformes de creusement, traduisent la dynamique interne du karst et les phases de son développement, les remplissages complètent à leur manière l'information, apportant en outre un message de l'extérieur, disant en particulier le temps qu'il faisait lorsqu'ils se sont introduits dans la grotte : s'il faisait froid ou chaud.

S'ils contiennent du pollen fossile, on saura de quelles essences étaient faites les forêts, la steppe ou le bord des rivières. Et c'est en leur manteau que sont préservées les archives de la préhistoire.

Les galeries horizontales ne sont pas les seules parties du réseau spéléologique à abriter des remplissages. Mais elles sont, sur ce plan, le conservatoire le plus favorable.

Les remplissages sont des sédiments. Il en existe quatre classes, les deux premières étant de loin les plus fréquentes et les plus abondantes.

- Remplissages détritiques ;
- Remplissages chimiques (concrétions);
- Remplissages organiques (guano, matière végétale...);
- Remplissages de glace : grottes "glacées".

7.3.1. Remplissages détritiques.

Le remplissage détritique, ou sédimentation détritique (dite aussi terrigène), est le produit du démantèlement du relief ou de la remobilisation de dépôts sédimentaires plus anciens, par l'érosion mécanique.

Exemple : la galerie Aranzadi dans le réseau de la Pierre Saint-Martin (fig. 38).

Richard Maire et Yves Quinif ont réalisé une étude approfondie de la sédimentation dans ce site désormais classique⁸. Nous ne ferons qu'en résumer les résultats, invitant le lecteur désireux de plus de détail à lire l'article en référence.

La galerie Aranzadi est l'extrême aval de la rivière de la Pierre-Saint-Martin avant sa capture par la mise en place du réseau Martine, puis par le réseau Arphidia lors de la formation de la salle de la Verna (voir coupe de la fig. 38). Avant ce détournement, elle aboutissait quelque part dans le flanc des gorges d'Ehujar. L'endroit de l'ancienne émergence n'a pas encore été trouvé.

La capture définitive de la rivière par le réseau Arphidia a permis la préservation d'une exceptionnelle série sédimentaire dans laquelle on peut déchiffrer et dater aujourd'hui une partie de l'histoire de la Pierre Saint-Martin.

La figure 37 donne une coupe synthétique de ce remplissage, intégrant de façon schématique l'essentiel des observations.

L'ensemble inférieur, fait essentiellement de lits de galets et de blocs roulés centimétriques à décimétriques résulte d'un écoulement libre de haute énergie (voir diagramme fig. 36 : il fallait bien 1 m/s). C'est donc un régime torrentiel dont de débit devait aller se déverser sans entrave dans le ravin d'Ehujar.

Puis, pour une raison que l'on ne connaît pas vraiment mais sur laquelle on a quelques idées, l'exutoire s'est trouvé obstrué. L'occupation du ravin d'Ehujar par une épaisse langue glaciaire en est sans doute la cause, comme cela a pu être démontré par Patrick Sorriaux dans le cas de Niaux-Lombrives. Alors, la galerie Aranzadi s'est progressivement ennoyée. Le courant s'est ralenti et du matériel fin a pu s'y déposer par décantation. C'est l'ensemble principal.

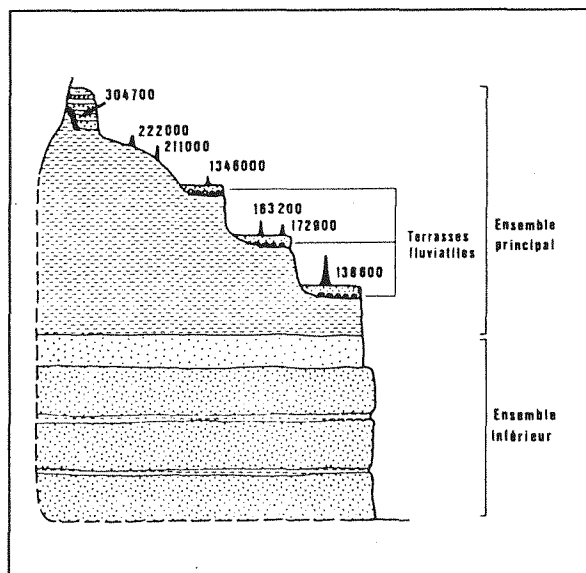


Fig. 37 : coupe synthétique du remplissage de la galerie Aranzadi montrant les trois ensembles et quelques stalagmites datées.

R. Maire et Y. Quinif - Arsip - Bulletin 16, p. 74.

L'ensemble principal, dont l'épaisseur peut atteindre une vingtaine de mètres, tend à combler entièrement la galerie, comme s'il s'était déposé dans des conditions de creusement paragénétique. C'est un sédiment très fin formé d'un empilement de lits millimétriques ou lamines argileuses très carbonatées. Pour R. Maire et Y. Quinif, il s'agit en majeure partie de farine glaciaire.

Une roche sédimentaire faite de lamines est une laminite. Chaque lamine comprend un lit clair et un lit sombre, ce qui facilite la distinction visuelle sur le terrain. Chaque lit correspond à un événement: le lit sombre peut être plus riche en matériel organique que le clair, ou plus riche en argile, donc en fer, par exemple. Ces alternances peuvent avoir une cause climatique. Lorsque l'on constate une alternance périodique régulière de très fines lamines dont chacune a certainement mis un court laps de temps à se déposer, on peut supposer - sans certitude - que le doublet clair-sombre traduit une alternance saisonnière, donc une année. Une analyse plus approfondie du sédiment peut ensuite confirmer cette hypothèse.

⁸ R. Maire et Y. Quinif: Les dépôts de la galerie Aranzadi. - Arsip, bulletin 16, pp. 69 à 95 - 1989. (Association de Recherches Spéléologiques Internationales à la Pierre-Saint-Martin).

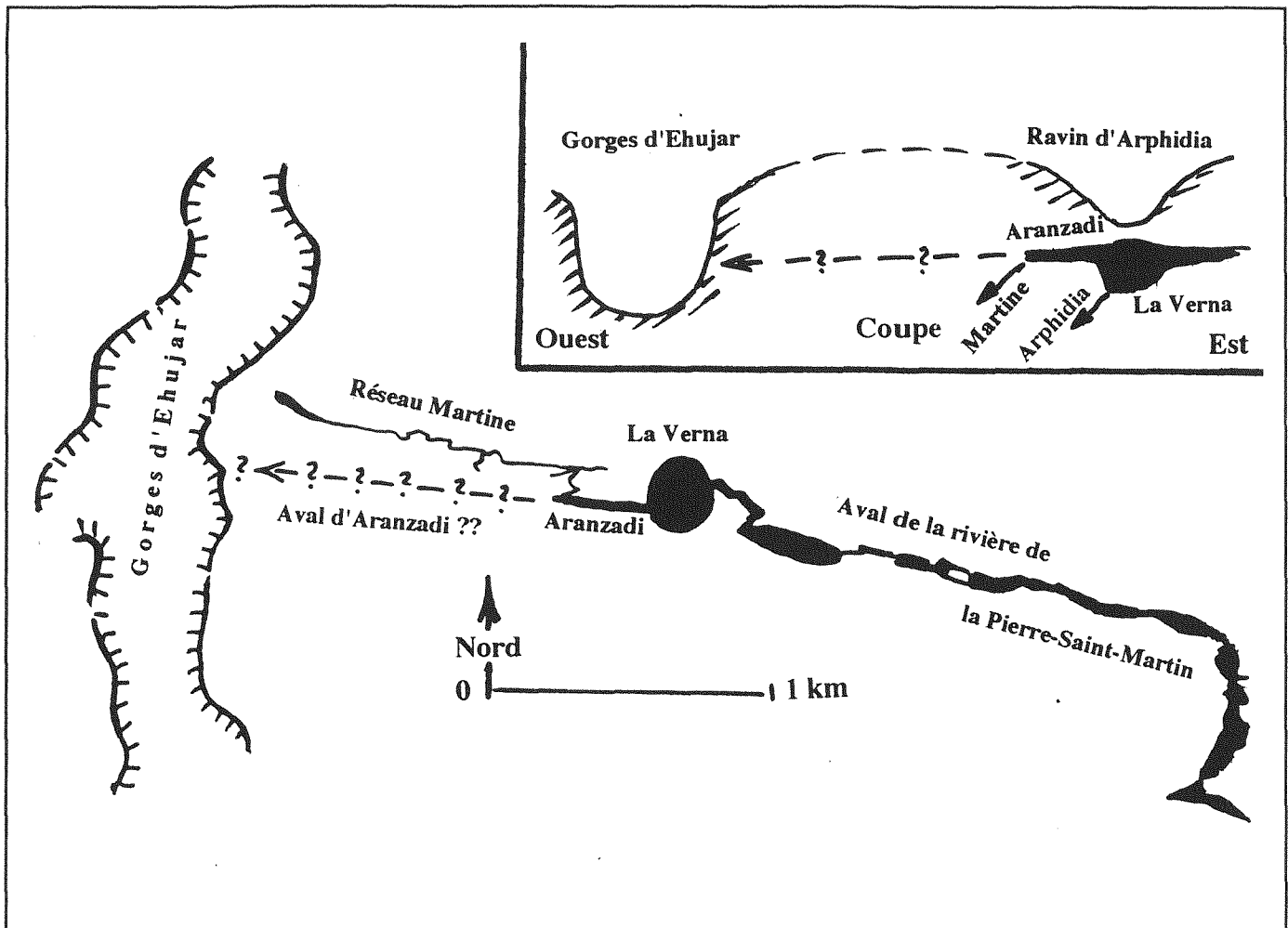


Fig. 38 : plan de position de l'aval de la rivière de la Pierre-Saint-Martin et de la galerie Aranzadi par rapport aux ravins de surface (gorges d'Ehujar en particulier).
 Extrait de la synthèse Arsip 1988 au 1 : 25 000.

Les études de Maire et Quinif permettent de considérer l'ensemble principal comme résultant de la décantation, dans un corps d'eau presque immobile (lac souterrain), du produit de l'érosion mécanique glaciaire à la surface du karst, avec fontes saisonnières lessivant le matériel désagréé et le redéposant dans l'endokarst sous la forme de la lamine claire. En comptant les doublets sur toute l'épaisseur de l'ensemble, on pourrait donc connaître - en principe - la durée totale du dépôt de la formation. En réalité les choses ne sont pas si simples. D'abord on ne dispose nulle part d'une coupe continue de l'ensemble depuis la base jusqu'au au sommet: il faut donc établir des corrélations entre les différentes coupes pour savoir quand s'achève l'une par rapport au début de l'autre. Ensuite, la sédimentation de l'ensemble a été interrompue par des événements introduisant épisodiquement dans le milieu un autre type de sédiment, une couche de sables, par exemple, traduisant peut-être un réchauffement momentané du climat.

Le dépôt de l'ensemble principal s'achève avec l'effacement de la cause qui avait induit sa mise en place : l'obturation de l'exutoire initial de la galerie Aranzadi. Conséquence du changement : le niveau de base karstique s'abaisse. Mais la galerie va rester définitivement colmatée dans son extrême aval car une nouvelle ouverture a tôt fait de s'aménager sur la rive droite à la faveur d'une grande fracture. Celle-ci deviendra le réseau Martine. Ainsi capturé, le lac d'Aranzadi se vide et l'écoulement torrentiel reprend en régime vadose.

Troisième acte: les terrasses.

Jusqu'à sa capture définitive par le réseau Arphidia lors de l'enfouissement progressif de la salle de la Verna il y a quelque 150000 ans, la rivière va continuer à couler dans l'amont de la galerie vers le Martine.

Dotée à nouveau d'une énergie de torrent de montagne, elle commence par raviner le dépôt de laminites qu'elle avait paresseusement laissé décanter durant la période glaciaire. Elle charrie à présent du gravier et des galets, remblayant son lit à plusieurs reprises pour le redéblayer ensuite. Ainsi s'établissent des terrasses étagées, suivant un processus bien connu dans l'évolution des réseaux hydrographiques de surface (fig. 39), opérant de la même façon en domaine souterrain.

Les coupes des fig. 40 et 41 en illustrent le résultat dans la galerie Aranzadi. La présence de concrétions dont l'âge a pu être établi par la méthode radiométrique (voir ci-après le chapitre sur les remplissages chimiques) a permis d'en établir la chronologie réelle.

En conclusion, les remplissages d'Aranzadi se situent intégralement dans un intervalle de temps postérieur au creusement de la galerie qu'ils viennent combler. Ce conduit de grandes dimensions a donc une évolution antérieure dont les conditions sont pour l'instant pratiquement inconnues, et qu'il n'est même pas possible de replacer dans l'échelle du temps. D'où l'intérêt du remplissage qui nous permet une approche plus "colorée", plus précise des circonstances de la spéléogénèse, et son insertion dans le temps.

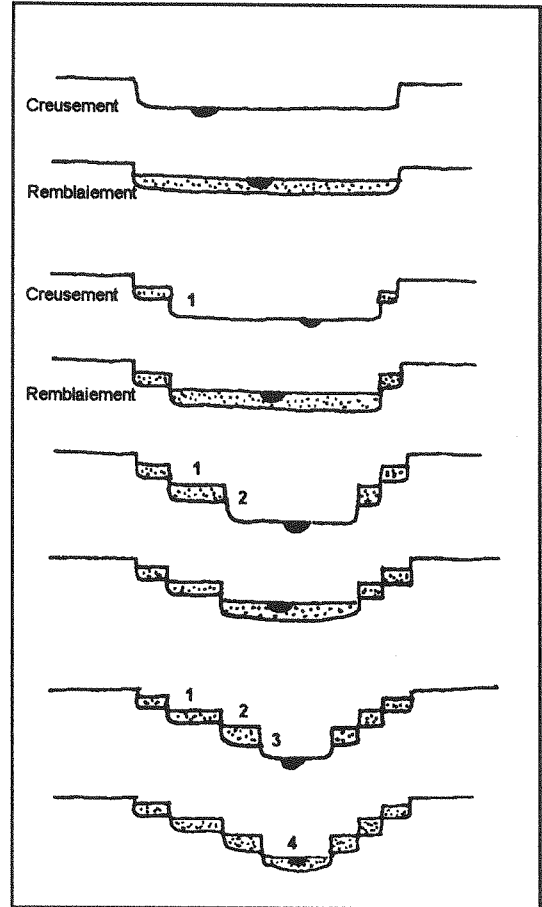


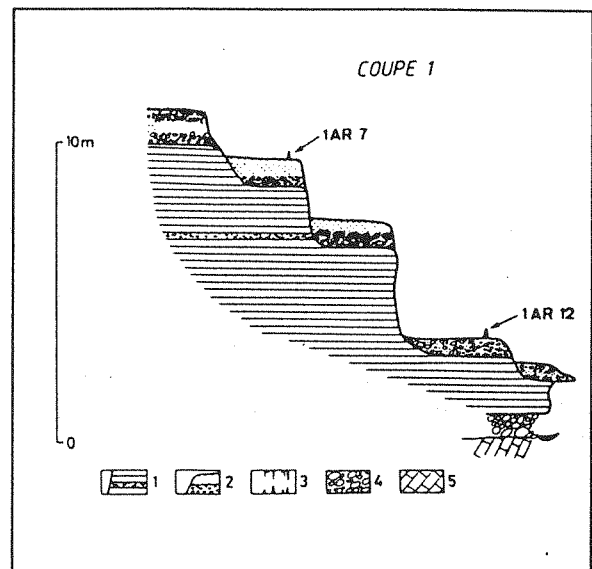
Fig. 39 : processus de formation de terrasses fluviales.

L'encaissement progressif de la vallée par ravinement, entrecoupé de phases de remblaiement, se traduit par un profil transversal dans lequel les terrasses sont d'autant plus récentes qu'elles sont plus basses (1 à 4 = de la plus ancienne à la plus récente).

Fig. 40 ci-contre : coupe réelle de terrain (coupe 1 de Maire et Quinif).

- 1 : ensemble principal avec un intervalle sableux
- 2 : terrasses fluviales
- 3 : stalagmites (n° échantillon)
- 4 : ensemble inférieur
- 5 : soubassement calcaire

R. Maire et Y Quinif - Arsip - Bulletin 16 p.73.



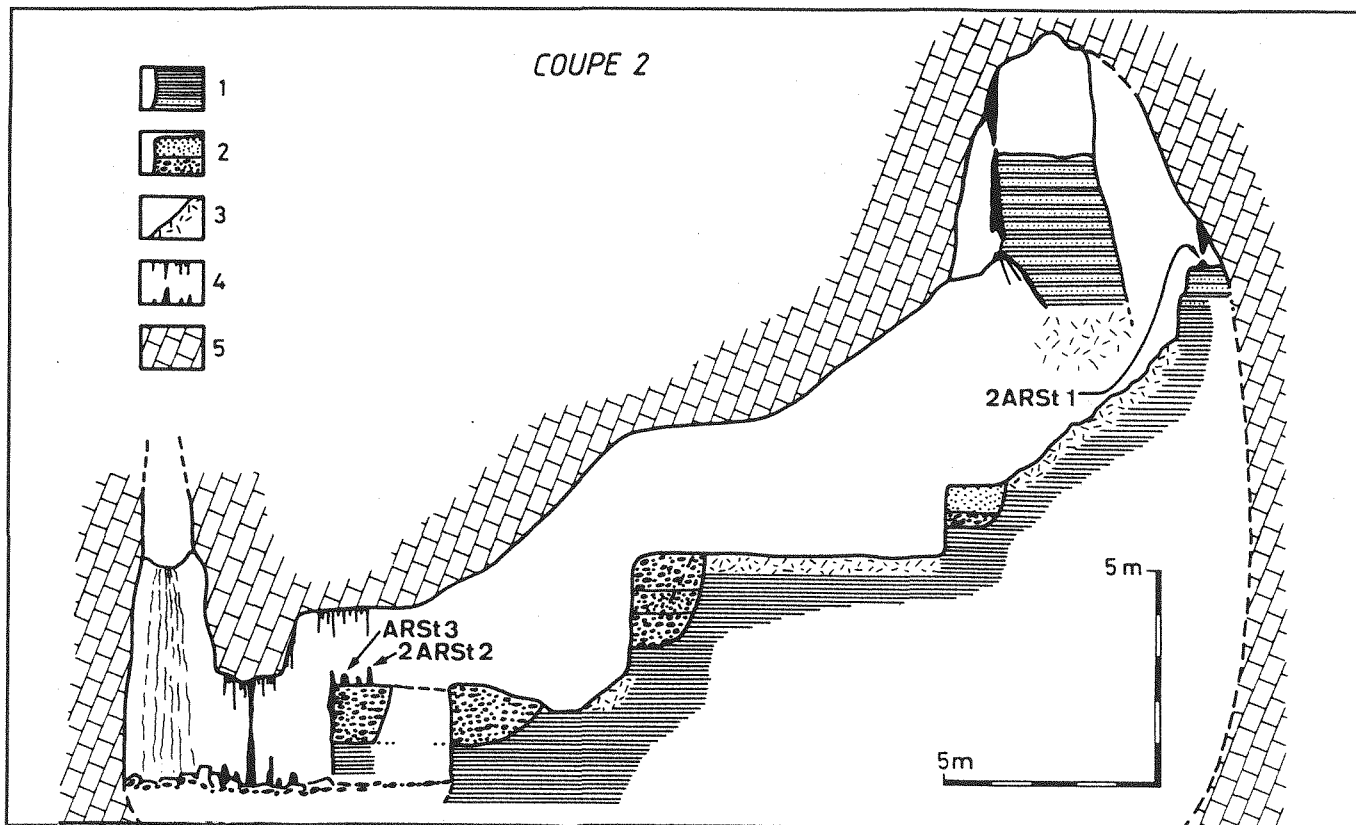


Fig. 41: coupe réelle de terrain (coupe 2 de Maire et Quinif).

1: ensemble principal; 2: terrasses fluviales (sables et galets); 3: sédiments remaniés; 4: stalagmites (n° échantillon)
5: encaissant calcaire. R. Maire et Y. Quinif - Arsip - Bulletin 16, p.75.

Quelques remarques complémentaires sur les remplissages détritiques.

La disposition ordonnée des galets peut indiquer le sens du courant.

Dans le lit d'un torrent, les galets plats ou relativement plats s'agencent à la manière de tuiles imbriquées relevées vers l'aval (fig. 42). On retrouve parfois cette disposition dans les remplissages grossiers des cavernes, ce qui permet, comme nous l'avons fait avec les coups de gouge, de connaître le sens du courant contemporain. Mais attention : l'exercice n'est pas toujours facile et nécessite en général plusieurs observations rapprochées pour étayer l'interprétation par une représentation statistique acceptable.

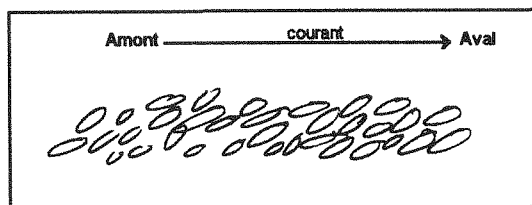


Fig. 42 : Agencement de galets en tuiles imbriquées dans le lit d'un torrent.

Comme dans le cas des vagues d'érosion évoqué page 44, on pourra déceler un renversement du sens de l'écoulement : coups de gouge suggérant un flux ascendant; agencement des galets indiquant un courant descendant. Il n'y a pas contradiction mais succession dans le temps.

Coulées de boue et de blocs, solifluxion.

Ce phénomène qui peut entrainer de grands volumes de terrain est fréquent sous les climats périglaciaires humides où l'alternance gel-dégel tend à mobiliser et à faire glisser la couverture meuble ou l'horizon superficiel altéré de versants instables. Mais on le rencontre aussi sous tous les climats un peu humides, en France et ailleurs...

La période de réchauffement succédant à une glaciation entraîne le dégel du pergélisol (ou sol gelé en permanence). Elle est donc très favorable à la solifluxion, dont les cavités situées au pied des montagnes portent souvent la trace : il s'agit de remplissages argileux truffés de blocs dans lesquels il ne faut chercher aucun ordre. Ces blocs, débités par la gélifraction (action du gel faisant éclater la roche fissurée) sont le plus souvent anguleux. Cependant, la solifluxion peut affecter des terrasses fluviales : on trouve donc aussi des dépôts glissés faits de galets de rivières.

Mais quelle que soit sa provenance, le produit de la solifluxion envahissant une cavité est généralement entraîné et remanié par l'écoulement souterrain. En raison cependant d'une mobilité relativement réduite, il a tendance à colmater les conduits, à commencer par les plus exigus. Ceux-ci, à condition de ne pas se trouver totalement engorgés, peuvent poursuivre leur développement suivant la méthode paragenétique (page 42). De beaux exemples de ce type de remplissage tapissent les galeries des grottes de Sare, et celles d'Isturitz Oxocelhaya, au Pays Basque.

Argiles de décantation.

Reportons-nous au diagramme de la figure 36, page 46. Dans le cas de l'alluvionnement, c'est à dire du dépôt du matériel des terrasses (gravier et galets) et de son déblaiement, nous étions dans les deux colonnes d'extrême droite, au delà de 1mm. Les plages "dépôt" et "érosion" sont très rapprochées, ce qui signifie que l'eau n'a pas grand mal à enlever ce qu'elle a apporté. Il suffit juste d'un peu plus de vitesse.

Dans le cas des argiles, nous tombons dans la colonne d'extrême gauche, en deçà du centième de millimètre. Leur sédimentation, qui ne peut guère s'effectuer que par décantation, exige donc une eau pratiquement immobile. En revanche, pour les arracher à nouveau, un courant atteignant le mètre par seconde est nécessaire, condition que l'on ne trouve pratiquement dans le milieu naturel qu'en écoulement libre et torrentiel.

A noter que dans le cas des coulées de solifluxion remaniées, le contenu argileux place le contexte plutôt vers la gauche du diagramme, d'où la difficulté de déloger le dépôt une fois qu'il s'est confortablement installé.

Mais revenons aux argiles de décantation. Elles vont se déposer durant les périodes d'étiage dans les conduits noyés ou les vasques de réseaux vadoses soumis à un arrêt temporaire presque total de l'écoulement. L'installation de retenues artificielles favorise ainsi l'envasement de leurs amonts. De même, les cavernes des systèmes annexes (p. 28 et fig. 14) sont favorables à la décantation du matériel fin, argiles et limon.

Le limon est un sable extrêmement fin, plus proche de 0,01 que de 0,1 sur l'axe des mm du diagramme de la fig. 36. Comme les argiles, il est difficile à déloger. On en trouve dans les siphons où l'écoulement ralentit périodiquement, de même que dans les élargissements de conduits où le courant perd de son énergie.

Argiles de décalcification ???

Toutes ces argiles homogènes qui tapissent le plancher et les parois des cavités sont parfois dites "argiles de décalcification". En réalité, dans les réseaux creusés au sein de calcaires purs, cela ne peut être le cas puisque la roche encaissante n'en contient pas. Ces argiles sont alors dites "allochtones", c'est à dire "venant d'ailleurs", ou "allogènes" (formées ailleurs), par opposition à "autochtone" (ou "bien du coin" - ce qui serait le cas de vraies argiles de décalcification).

Les argiles allogènes (et non pas halogènes comme des ampoules Électriques) sont souvent le produit d'altération de la couverture argileuse du karst, ou des amonts non calcaires du bassin versant dans le cas d'un karst binaire.

7.3.2. Remplissages chimiques.

Ce terme désigne le **concrétionnement** en général (les "planchers stalagmitiques" en sont un aspect particulièrement intéressant dans l'étude de l'évolution de la cavité). Il s'agit le plus souvent de **calcite** (CO_3Ca), mais l'**aragonite** (autre forme de CO_3Ca) est fréquente, et le **gypse** (sulfate de calcium hydraté: $\text{SO}_4\text{Ca}\cdot 2\text{H}_2\text{O}$) n'est pas rare. D'autres sels plus exceptionnels relèvent de conditions de dépôt spéciales (voir plus loin : "observations insolites").

Arrêtons nous ici aux conditions de dépôt du **carbonate de calcium**. En milieu tempéré ou tropical humide, au sein d'un karst partiellement couvert d'un sol végétal, l'essentiel de la corrosion s'effectue dans la première dizaine de mètres sous la surface (voir pages 15 et 28). L'eau saturée de bicarbonate qui percole à la faveur du réseau de fissures rencontre sur son cheminement des vides aérés au sein desquels elle trouve des conditions physico-chimiques différentes de la sienne.

D'abord, au sein de ces cavernes, la teneur de l'air en CO₂ (la "**pression partielle**" en CO₂) est inférieure à celle de l'eau des fissures. Dès que cette eau atteint la cavité, il se produit, de façon beaucoup plus discrète bien entendu, ce qui se passe lorsqu'on ouvre une bouteille de Perrier : un dégazage partiel. En conséquence, l'eau devient **sursaturée** et **dépose le carbonate en excès**.

Ensuite, si la caverne est **ventilée**, l'air peut être sous-saturé en humidité (80 à 90% au lieu de 100%). Cette différence provoque une certaine **évaporation** dont les effets s'ajoutent à ceux du dégazage dans le processus du concrétionnement.

Notons ici que, toutes choses égales par ailleurs, un contexte de calcaire magnésien ou de dolomie favorisera la précipitation d'aragonite.

Nous ne nous étendrons pas sur la typologie (l'inventaire des types) du concrétionnement. Les ouvrages en référence apportent sur ce thème une documentation suffisante. Mais considérons un instant le **témoignage** qu'il apporte dans la reconstitution du passé du réseau et de la région.

Témoin d'un climat tempéré ou chaud.

Les conditions de dépôt de la calcite sont meilleures au sein d'un karst sous couvert végétal. Les revêtements stalagmitiques sont donc des indicateurs climatiques, surtout dans une période d'alternance comme l'a été, et le sera sans doute encore, le Quaternaire (fig. 43).

Le message des **planchers stalagmitiques** est à ce sujet particulièrement explicite : en effet, on les observe parfois en intercalations dans un remplissage détritique indiquant plutôt un climat froid. Rompant la continuité monotone du dépôt terrigène, ils matérialisent ainsi des épisodes de réchauffement. C'est le cas par exemple dans la grotte d'Isturitz - Oxocelhaya, Pays Basque : deux épais planchers stalagmitiques encadrent l'intervalle de la glaciation du Würm, représenté par des coulées de solifluxion remaniées. Celui de la base est antérieur au Moustérien (-80000 ans). Il marque un interglaciaire Riss-Würm. Celui du sommet coiffe en fait le tout et marque le début du réchauffement qui se poursuit de nos jours (voir fig. 43 pour ces termes).

Datation radiométrique.

La méthode est basée sur la désintégration de l'uranium²³⁴ qui génère du thorium²³⁰. Or l'uranium est soluble dans l'eau sous certaines conditions alors que le thorium ne l'est jamais. En outre, l'uranium s'intègre facilement dans la maille atomique du cristal de calcite dont sont faites les stalactites et les stalagmites. Il s'y loge pur de tout thorium parasite mais, une fois en place, se met à en fabriquer suivant un rythme constant bien connu des scientifiques. Ainsi, connaissant la proportion de thorium²³⁰ présent, on peut savoir combien de temps s'est écoulé depuis la mise en place de la concrétion.

Des mesures réalisées en plusieurs endroits de la section d'un épais pilier stalagmitique (on prélève une "carotte" de forage sans casser le pilier!) permettent de connaître non seulement l'âge de la "bête" mais aussi le temps qu'elle a mis à grossir. Richard Maire et Yves Quinif ont pu dater par cette méthode des stalagmites de la galerie Aranzadi (fig. 43). Malheureusement, au delà de 350000 ans, les mesures ne sont plus fiables.

Génération successive de concrétions en un même lieu dépourvu de remplissages détritiques.

C'est en quelque sorte une manière de télescoper le déroulement de l'histoire en passant certains évènements sous silence. Mais le spéléo averti ne se laissera pas abuser. On peut rappeler ici les cas de réennoiment temporaire de cavités, évoqués page 45. Il est donc nécessaire dans l'analyse d'un réseau spéléologique de bien faire la distinction entre les ensembles successifs de concrétions dont certains peuvent porter la trace d'une redissolution profonde par immersion. Il arrive que la marque de l'évènement soit discrète mais son empreinte sur une seule stalactite bien placée peut s'extrapoler le cas échéant à tout une partie de la cavité (réseau du Mélat, Hautes Pyrénées, près de Bétharram).

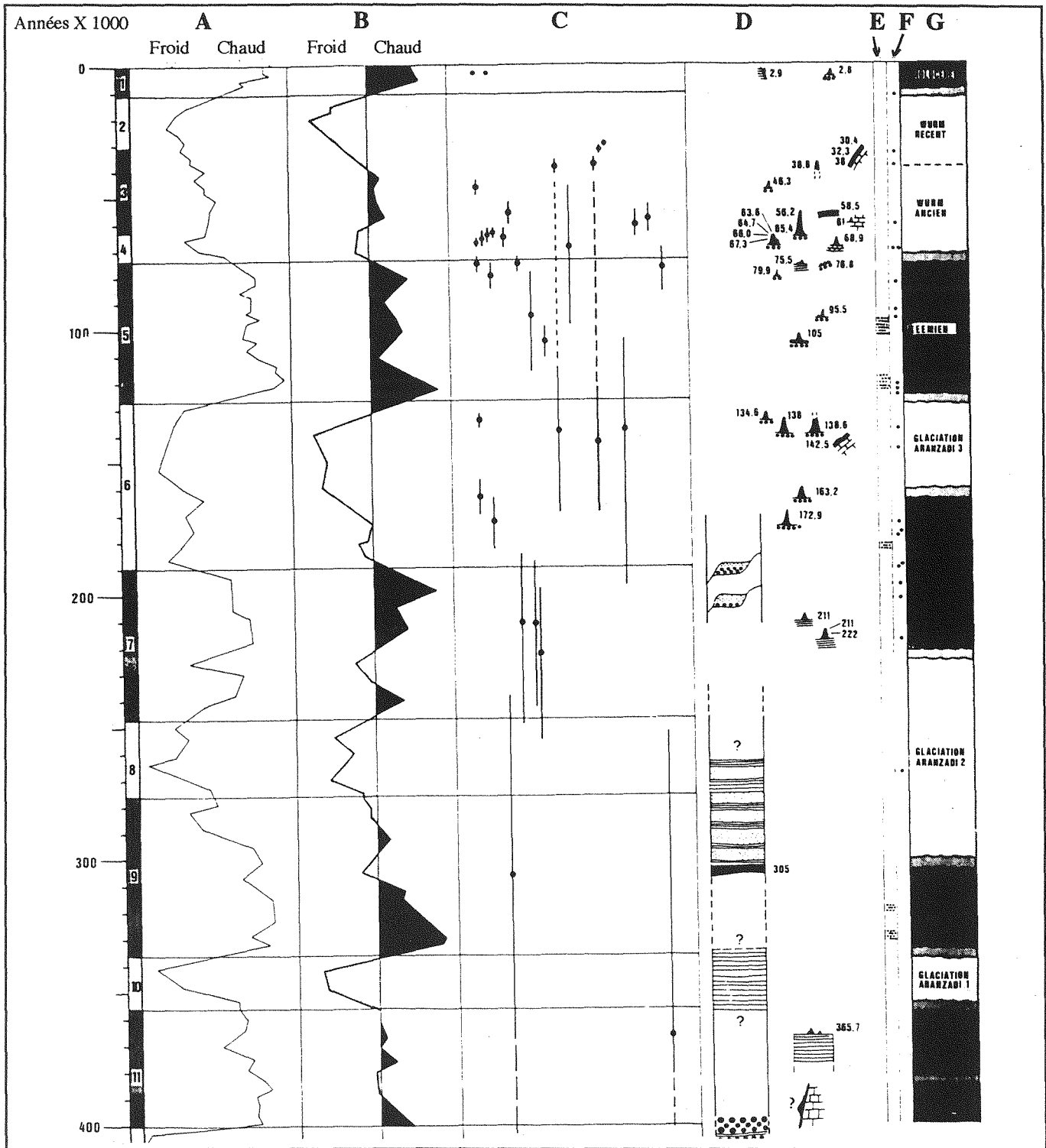


Fig. 43 : stratigraphie du remplissage de la galerie Aranzadi et datations radiométriques.

Colonne A : courbe des paléo-températures dans l'hémisphère nord pour la période correspondant au remplissage de la galerie. Courbe établie à partir de mesures indirectes sur échantillons de sédiments océaniques prélevés par carottage (*).

Colonne B : variations climatiques d'après un autre modèle (*).

Colonne C : datations uranium234 / thorium230. Le point central donne le résultat de la mesure, les traits de part et d'autre la marge d'erreur. Celle-ci augmente avec l'âge.

Colonne D : situation des remplissages. L'ensemble principal couvre Aranzadi 1+2 tandis que la période du recréusement et des terrasses occupe un interglaciaire entre Aranzadi 3 et 3 (col. G). Représentation des stalagmites avec leur âge.

Colonne E : Phases du concrétionnement à Niaux.

Colonne F : datations en karsts hauts-alpins (CERAK).

Colonne G : interprétation paléoclimatique. En se référant aux phases de glaciations dans les Alpes de Bavière qui sont l'un des repères européens, les deux dernières grandes périodes glaciaires sont le complexe du Riss dont les glaciations Aranzadi sont contemporaines, et le Würm qui comprend deux épisodes séparés par un court interstade de réchauffement. L'interglaciaire Riss-Würm est l'Eemien.

(*) Modèles tirés de la littérature, cités par R. Maire et Y. Quinif, Arsip, bulletin n°16 page 89.

Compléments sur l'évaluation du temps en géologie: chronologie relative et chronologie absolue.

Nous nous sommes lancés page 35 dans une comparaison poétique entre le temps et la durée. Mais les premiers géologues n'avaient aucun moyen fiable de mesurer avec rigueur le temps passé. Les premiers essais ont utilisé la vitesse de sédimentation d'un ensemble bien connu, pour déduire de son épaisseur la durée de son dépôt. On a compté aussi les varves ou lamines annuelles des sédiments lacustres de la mer Baltique. Mais la géologie stratigraphique a d'abord mis de l'ordre dans le cours de l'histoire de la Terre par le "**principe de superposition**" selon lequel **toute strate qui en surmonte une autre est plus récente que celle-ci.**

On a levé de la sorte de nombreuses coupes stratigraphiques dont certaines comprenaient un horizon caractéristique que l'on retrouvait dans une coupe voisine. Et ainsi, de coupe en coupe, on a établi la succession des strates dans une région entière. Chacune de ces strates était comme une page d'un grand livre. On se rendit vite compte qu'ensemble, elles étaient le support d'une histoire : de l'histoire de la vie.

Car on y trouva des fossiles. Et en y regardant de près, on comprit qu'un ensemble particulier de strates renfermait un assortiment particulier de fossiles, que dans la succession des ensembles de strates se dessinait une succession de sociétés animales suggérant une évolution du monde vivant : durant l'ère primaire les seuls vertébrés furent d'abord les poissons. Vers la fin apparurent les reptiles qui régnèrent en maîtres absolus durant tout le Secondaire. Lorsqu'ils disparurent, les mammifères leur succédèrent. Puis vint l'homme. Mais pour le géologue, chaque âge géologique portait en ses strates ses fossiles caractéristiques dont certains au moins pouvaient jouer le rôle de jalon chronologique. Ainsi naquit l'**échelle relative** (en annexe) : chaque étage du Mésozoïque, par exemple, porte son propre cortège d'ammonites caractéristiques qui permet de l'identifier dans le monde entier. Mais jusque là on ne connaît que la **position relative** de l'étage par rapport aux autres étages de l'échelle. C'est le **principe de superposition**...

Puis vint la découverte de la radioactivité, et avec elle l'idée d'un "**radio-chronomètre**". Heureusement, il existe plusieurs méthodes, pour des plages de mesure différentes, entre 35000 ans pour le carbone 14 et plusieurs milliards d'années pour le procédé uranium-plomb. C'est de telles mesures que sont sortis les **âges absolus** qui **étalonnent** notre échelle en **temps réel** dans la colonne de droite.

7.4. Observations insolites : Un passé hydrothermal ?

Il est nécessaire que le spéléo d'exploration sache garder le sens de l'insolite et le coup d'oeil pour le déceler. Observer ! Observer toujours !

Eaux thermo-minérales.

Eaux thermales. On en oublie l'étymologie et on fait de toute eau supposée curative une eau thermale. Mais "thermal", cela veut dire que sa température à la source est **anormalement élevée** par rapport au contexte ambiant.

Ensuite, il y a les eaux dites **minérales**. Il y en a qui sont tout ce qu'il y a de plus ordinaire: ce sont des eaux de source ayant peu récolté de sels durant leur transit sous terre. L'eau d'Evian, par exemple. D'autres sont anormalement chargées en **sels minéraux** qu'elles ont lixivié (ou lessivé) sur leur trajet. Ce sont les vraies **eaux minérales** ou minéralisées.

Alors, quand l'eau est anormalement chaude et minéralisée, on parle d'eau **thermo-minérale**.

Présomptions et indices.

La présence de sources thermales, ou minérales, ou thermo-minérales dans une région karstique doit attirer l'attention. L'oeil aux aguets, le spéléo ne laissera passer aucun indice insolite. Dans les cavités, ceux-ci pourront être de simples "panaches" d'altération autour de fractures dans le calcaire, de petites salles tapissées d'un épais revêtement de gypse ou d'autres sels moins fréquents comme la mirabilite, sulfate hydraté de sodium. Autre indice d'un hydrothermalisme possible : des coupoles de dissolution en grappes complexes au plafond de salles plus ou moins sphériques situées à l'écart de tout système de drainage organisé. Ces coupoles hydrothermales, à la différence des coupoles classiques décrites page 45, n'ont pas nécessairement de fissure axiale. Elles doivent leur origine à la convection de l'eau chaude dans la cavité.

Car la **spéléogénèse hydrothermale** est un processus de creusement exclusivement chimique remontant des profondeurs. Le vecteur de l'agent actif est tout simplement une **eau météorique** (eau de pluie ou de neige) infiltrée quelque part en amont de la source, poussée par une mise en charge importante et mue par un très classique gradient hydraulique (fig. 44). Elle est entraînée en profondeur sous forme de **nappe captive**, c'est à dire que l'**aquifère** - généralement **fissuré** - est pris en sandwich entre deux formations étanches. Au sein d'une nappe captive, la pression de l'eau sous la simple **charge hydraulique** est telle que si l'on creuse un puits, l'eau jaillit bien au dessus de la couche confinante supérieure. On dit de cette eau qu'elle est **artésienne** (puits artésien, à ne pas confondre avec une source vauclusienne dont le contexte est une **nappe karstique libre**, non confinée au toit). Dans le cas de la nappe captive une **faille** peut jouer le rôle de **conduit artésien**.

L'agent actif peut être le CO₂ en solution, plus rarement de l'**acide sulfurique** produit entre autres par la réaction chimique d'une formation de gypse au contact de matière organique (pétrole). C'est en partie à ce processus que la célèbre grotte de Carlsbad, au Nouveau Mexique (U.S.A.) doit son existence.

Il existe certainement en France des grottes à la formation desquelles l'hydrothermalisme prit une part plus ou moins importante. La question est d'en retrouver l'empreinte: l'évolution ultérieure de la cavité en réseau gravitaire classique efface les origines. Mais des formes peuvent subsister, de même que des dépôts de sels "insolites" (dans leur nature chimique ou leur disposition). C'est très probablement le cas dans le massif des Arbailles, Pyrénées-Atlantiques.

Un article de Bernard Collignon dans le n° 2 de *Karstologia* donne un bon aperçu de la question. Mais il concerne l'Algérie⁹.

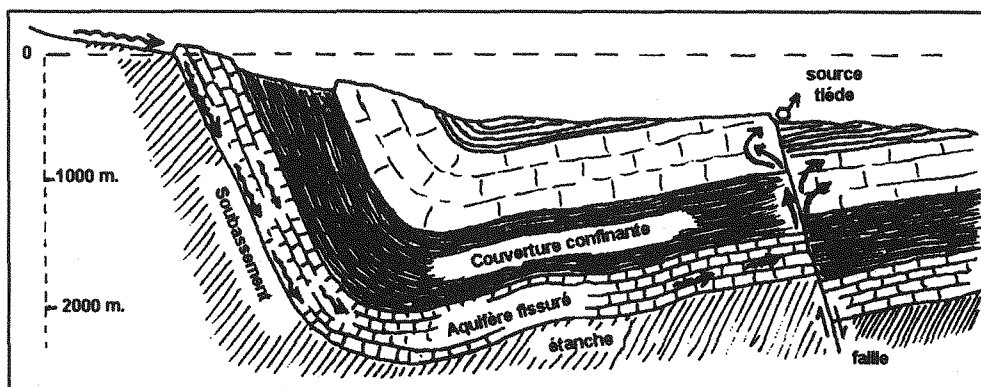


Fig. 44 : circulation profonde par nappe captive et remontée artésienne sur faille.

⁹ B. Collignon: Spéléogénèse hydrothermale dans les Bibans (Atlas Tellien - Nord de l'Algérie) - *Karstologia* n°2, 1983.

8. PALEOKARST : LE PASSE ANTERIEUR.

"Images des mondes disparus" ... (titre d'un bel ouvrage du paléontologue Jean Piveteau, Masson - 1951)

Tout ce que nous avons qualifié de "fossile" (entre guillemets) dans les précédentes pages, à l'exception d'anciennes émergences colmatées et coupées de leur réseau originel, n'est que plus ou moins endormi, entré en inactivité par suite du départ définitif du ruisseau, mais reste connecté au réseau. Et puis, "définitif", à l'échelle des temps géologiques, qu'est-ce que cela veut dire (fig. 23, p. 37) ? Un retour en arrière est parfois possible. Alors sachons user du terme "fossile" avec parcimonie et raison.

Le karst fossile, ou paléokarst, est par définition coupé de toutes les causes dont il est issu, hydrologiques comme morphologiques. Il est, dans le paysage, indifférent au cadre, n'ayant pour seule raison d'être encore là que son support lithologique, menacé lui-même de disparition.

La karstification commence au berceau, dès que la plate-forme carbonatée nouvellement formée ou en cours d'élaboration a l'audace de mettre le nez ou plutôt le haut du crâne hors de l'eau, abaissement eustatique (p. 36) oblige.

De nombreuses formations calcaires portent ainsi les stigmates des premières blessures de l'eau douce. Ces cicatrices de la prime jeunesse sont en général discrètes, les cavités étant de dimensions réduites et le ciment les colmatant étant souvent de même nature, donc de même dureté et couleur que l'encaissant. L'examen de parois nues de grandes cavernes permet parfois d'observer ces "anomalies de détail" dans l'homogénéité de la roche.

Puis, lorsqu'il s'agit d'une formation déjà ancienne, d'âge jurassique par exemple, celle-ci a quelques chances d'avoir été soumise à plusieurs phases séparées de karstification. On en trouve le témoignage dans certains affleurements de dimensions suffisantes, sous la forme de surfaces de dissolution (ou lapiaz fossile) enveloppées d'argiles d'altération. De splendides exemplaires ont été révélés par l'exploitation de carrières. Ils sont hélas éphémères et disparaissent avec la progression du front de taille. C'est encore là un phénomène fossile que tout spéléo devrait savoir observer. Et photographier pour la postérité.

D'autres paléokarsts sont devenus gîtes métallifères. Les Etats Unis d'Amérique tirent une bonne partie de leurs ressources en plomb et zinc de karsts fossiles dans des carbonates du Paléozoïque. Dans le sud de la France, le gîte de plomb-zinc des Malines (Gard), aujourd'hui fermé, est "enchâssé" dans un paléokarst anté-triasique affectant des dolomies cambriennes.

Dans le midi de la France encore, la bauxite, minéral d'aluminium, remplit les poches d'un karst anté-éocène, sans doute crétacé moyen, dans des calcaires dolomitiques jurassiques. D'autres indices de bauxite existent çà et là dans les chaînons calcaires nord-pyrénéens. Dans un article paru dans le n° 27 de *Karstologia* (1996), J. Nicod présente un excellent résumé synthétique de la question.

Plus récent, le paléokarst anté-miocène de Rospo Mare (Adriatique - voir *Karstologia* n° 21, 1993, article de P. Dubois et al.), creusé dans des calcaires du Crétacé inférieur, enfoui aujourd'hui à plus de 1300 mètres, est un gisement pétrolier exploité par Elf.

Mais sans chercher aussi loin, les indices de karsts fossiles sont fréquents dans les massifs que nous avons l'habitude de parcourir. On les trouve surtout au niveau des plus anciennes surfaces d'érosion : tronçons de galeries ou de puits épargnés par l'érosion, totalement isolés de leur ancien cadre morphostructural dont il reste peu de choses ; fragments de concrétions jonchant le sol ; restes de remplissage induré, rouge ou ocre sertis dans les creux d'un ressaut calcaire ; puits éventré comblé de matériel morainique ...

Dans tout travail de synthèse sur un massif, il est nécessaire de tenir compte des témoignages épars d'un passé qu'efface petit à petit le temps. Ils ont pu appartenir à un tout autre paysage que celui qui s'étale aujourd'hui sous nos yeux. Mais d'un autre point de vue, c'est souvent, aussi, de la contemplation du paysage actuel que naît la réflexion nous conduisant vers la reconstitution des scènes du passé. Tout se tient.

Alors, amis spéléologues, dans l'étude générale de votre massif, apprenez d'abord à apprivoiser le paysage présent et à "anticiper" ceux du passé. Vous saurez ainsi mieux ce que vous cherchez sur le terrain, et où le trouver.

9. CONCLUSION.

"Courir marcher, sur terre au soleil, colline, doline, vallée, glacier, ... tout se mêle ; sous terre, ramper, toucher, failles, diaclase, terrasse, tout s'enchaîne. C'est le summum pour moi de la notion d'instruction. La karsto est vécue, intégrée. Même si pour moi le vocabulaire n'est pas acquis. La karstologie est devenue histoire, conte vécu". (Catherine Roux, stagiaire au stage karsto Pierre-Saint-Martin 1993).

C'était l'ambition de ce cours : inoculer au lecteur le "feeling du karst", comme dira un autre stagiaire. Ai-je réussi ? L'usage le dira.

Alors, quelles sont les bases de la démarche pour une approche cohérente de votre massif karstique ?

On l'a dit : le document régional de base est la **carte topographique I.G.N. au 1:25000**. L'information morphostructurale qu'elle apporte est souvent plus claire que celle des photographies aériennes, surtout en domaine forestier : les cartographes ont dessiné le formes du relief avec beaucoup de soin, usant de machines beaucoup plus performantes que le stéréoscope de poche. Mais attention, souvenez-vous : les accidents de surface n'ont pas toujours sous terre l'influence supposée, de même que certaines contraintes de cheminement majeures sous terre n'ont pas d'expression de surface.

La **carte géologique** du B. R. G. M. au **1:50000** apporte un maximum d'information géologique, mais pas tout ! Et elle est d'abord un **document interprétatif**, synthèse d'observations de terrain plus ou moins bien comprises que l'auteur a nécessairement interprétées en fonction de son expérience du moment. L'exactitude et la précision de la carte dépendent aussi des conditions d'accès au secteur à l'époque du levé. Il serait donc injuste de jeter la pierre au géologue.

Apprenez à faire des **"coupes" géologiques** à partir de cette carte. Cela entraîne à "voir" la géologie en trois dimensions. Vous en aurez certainement l'usage pour **replacer les réseaux spéléologiques dans leur espace réel**. Il est fort probable - et souhaitable - que vous trouverez parfois sur le terrain des éléments d'observation vous conduisant à améliorer et à préciser votre ébauche. Honneur à vous : vos prédécesseurs vous en sauront gré.

Puis, à partir des deux cartes de base, on fera déjà l'**inventaire de toutes les sources importantes drainant le massif karstique** et on **tentera dans le même temps de répertorier les points d'infiltration concentrée** (pertes).

Alors le canevas sera suffisant pour vous permettre d'**imaginer une répartition possible des écoulements souterrains**. Le report sur la carte au 1:25000 des **polygones cotées des cavités actives** topographiées précisera l'image et vous donnera quelques orientations.

A ce point de votre démarche, continuez à rêver pour autant que vous ayez commencé. Ne cherchez pas à être trop rationnel : la Nature a ses propres raisons et plus d'un tour dans son sac. L'intuition est souvent bonne conseillère et pourra compenser parfois (de façon provisoire) votre ignorance. C'est d'une intuition basée sur l'examen d'une mappemonde qu'est né le formidable concept, aujourd'hui mondialement vérifié, de la dérive des continents. Mais étayez si possible vos rêves d'observations objectives afin qu'ils deviennent réalité. Et contemplez votre paysage sous tous les angles, avec ses apparences parfois trompeuses (parallaxe) et sa logique propre.

Osez déborder d'idées : il y en aura toujours de bonnes dans le lot. Moquez-vous des critiques sans substance mais saisissez au bond celles qui font clignoter quelque chose dans votre crâne : elles ont visé juste. Toute critique constructive est une pierre nouvelle offerte gratis à votre édifice.

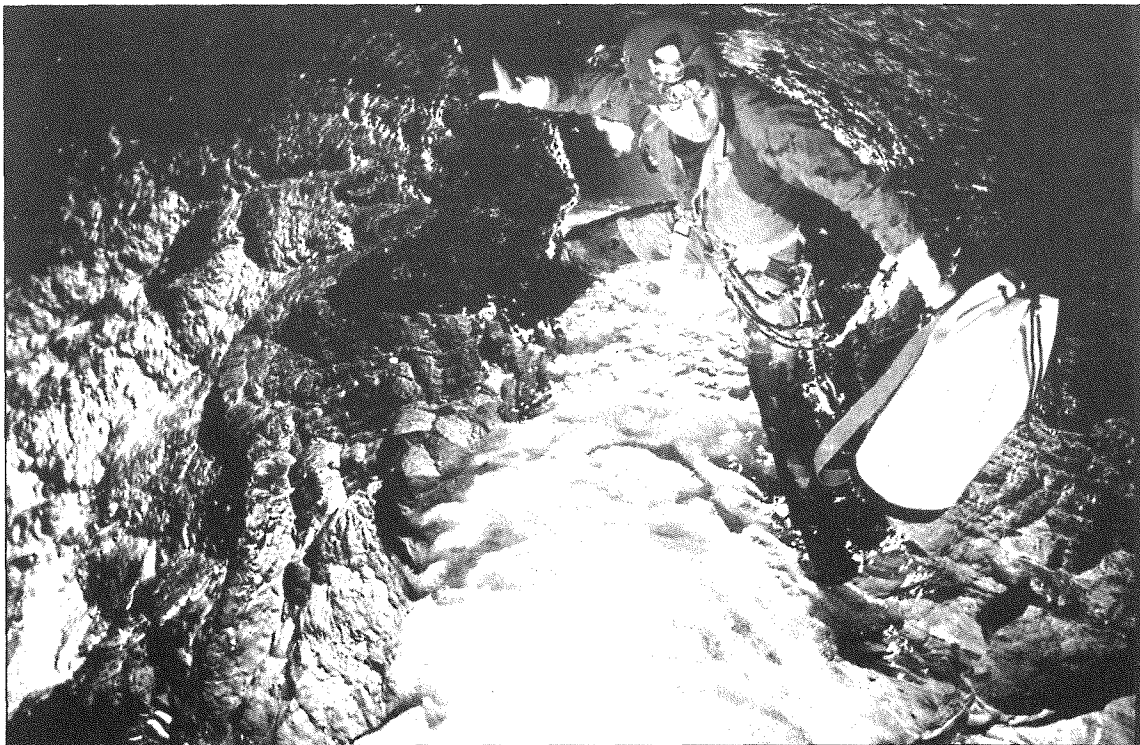
Osez aussi vous remettre en question dès que cela vous paraît nécessaire. Changez de route dès que vous vous savez sur un mauvais sentier. Ne vous enfermez jamais : se tromper n'est pas méprisable. Persévérer dans l'erreur démontrée vous bloque au contraire dans une impasse.

Et puis, dans toute discussion avec un interlocuteur bien informé, sachez argumenter. Ne vous butez pas dans la polémique stérile : ou bien l'autre vous fermera la porte, ou bien il explosera et le résultat final sera le même : vous aurez perdu.

Jacques BAUER
Nay-Bourdette, le 26 juin 1996



Galerie Aranzadi, réseau de la Pierre Saint-Martin. (Photo Richard MAIRE)



Les Cuves de Sassenage, Vercors. Résurgence du gouffre Berger. (Photo Serge CAILLAULT)

ERE	SYSTEME	SERIE	ETAGE	M. A.	
CENOZOÏQUE	IV re	Holocène Pléistocène	Post-glaciaire	0, 01	
			Calabrien	1,65	
	Neogène	Pliocène	Plaisancien Zancléen		3,4
					5,3
			Miocène	Messinien	6,5
				Tortonien	11
				Serravallien	14,5
				Langhien Burdigalien Aquitainen	16 20 23,5
	Paléogène	Oligocène	Chattien	28	
			Rupélien	34	
		Eocène	Priabonien	37	
			Bartonien	40	
	Lutézien Yprésien		46 53		
Paléocène	Thanétien	59			
	Danien	65			
MESOZOÏQUE	Crétacé	Supérieur	Maastrichtien	72	
			Campanien	83	
			Santonien	87	
			Coniacien	88	
		Inférieur	Turonien	91	
			Cénomanien	96	
			Albien	108	
			Aptien	114	
	Jurassique	Supérieur (MALM)	Tithonien	141	
			Kimméridgien	146	
			Oxfordien	154	
		Moyen (DOGGER)	Callovien	160	
			Bathonien	167	
			Bajocien	176	
			Aalénien	180	
		Inférieur (LIAS)	Toarcien	187	
			Pliensbachien (Charmouthien)	194	
			Sinemurien	201	
			Hettangien	205	
Trias	Supérieur (KEUPER)	(Rhétien)			
		Norien	220		
	Moyen (MUSCHEL- KALK)	Carnien	230		
		Ladinien	235		
		A nisien	240		
Inférieur (BUNT- SANDSTEIN)	Scythien	245			

ERE	SYSTEME	SERIE	ETAGE	M. A.
PALEOZOÏQUE	Permien	Supérieur	Thuringien	258
			Inférieur	Saxonien Autunien
	Carbonifère	Silésien	Stéphanien	305
			Westphalien	315
			Namurien	325
		Dinantien	Viséen	350
			Tournaisien	360
	Dévonien	Supérieur	Famennien	365
			Frasnien	375
		Moyen	Givétien	380
	Eifélien		385	
	Inférieur	Emsien	390	
		Praguien	410	
		Lochkovien	410	
	Silurien	Pridoli Ludlow Wenlock Llandovery		415
			425	
			430	
			435	
Ordovicien	Ashgill Caradoc Llandeilo Llanvirn Arénig Trémadoc		445	
			455	
			470	
			485	
			500	
Cambrien	Supérieur Moyen Inférieur		540	
PROTEROZOÏQUE				2500
ARCHEEN				> 3500

Echelle des temps géologiques.

(d'après la mise à jour - simplifiée - de Gilles-Serge et Chantal Odin - 1990 - publiée par la revue *Géochronique* , n° 35, Août 1990).

L'échelle numérique (M. A.) est en millions d'années.

Pour le **Trias**, la terminologie germanique a été rajoutée ("BUNTSANDSTEIN"...) ; pour le **Paléozoïque**, on n'a conservé que les termes classiques de la stratigraphie française.

Une remarque spéciale sur ce que l'on appelle le **Villafranchien** : système " à la charnière du Tertiaire et du Quaternaire " (A. Leroi-Gourhan, "Dictionnaire de la Préhistoire", P. U. F. 1988), il s'agit de l'ensemble des faciès sédimentaires continentaux d'âge pliocène / début Quaternaire (entre 5,2 et 1 M. A. environ) marqués par "l'assèchement et le refroidissement du climat et le début des oscillations climatiques." (Leroi-Gourhan).