



# Les Concrétions des Grottes Françaises, Témoins Exceptionnels du Fonctionnement du Karst et Archives des Paléoclimats

*Dossier de présentation en vue de l'inscription sur la liste du  
Patrimoine Mondial de l'UNESCO au titre d'un bien naturel*



**Annexe Documentaire**



Les Concrétions des Grottes Françaises,  
Témoins Exceptionnels du Fonctionnement  
du Karst et Archives des Paléoclimats

*Dossier de présentation en vue de l'inscription sur la liste du  
Patrimoine Mondial de l'UNESCO au titre d'un bien naturel*

**Annexe Documentaire**



**Intérêt patrimonial du karst français**

**Karts et concrétions**

**Variabilité de l'environnement naturel des concrétions  
des grottes proposées au patrimoine mondial**

**Formation des concrétions**

**La protection des concrétions**

**L'esthétique du patrimoine souterrain**



# INTERET PATRIMONIAL DU KARST FRANCAIS

La France dispose d'un patrimoine souterrain exceptionnel avec des vestiges archéologiques, des œuvres pariétales, des vestiges paléontologiques, des concrétions... dont la renommée a depuis longtemps dépassé nos frontières.

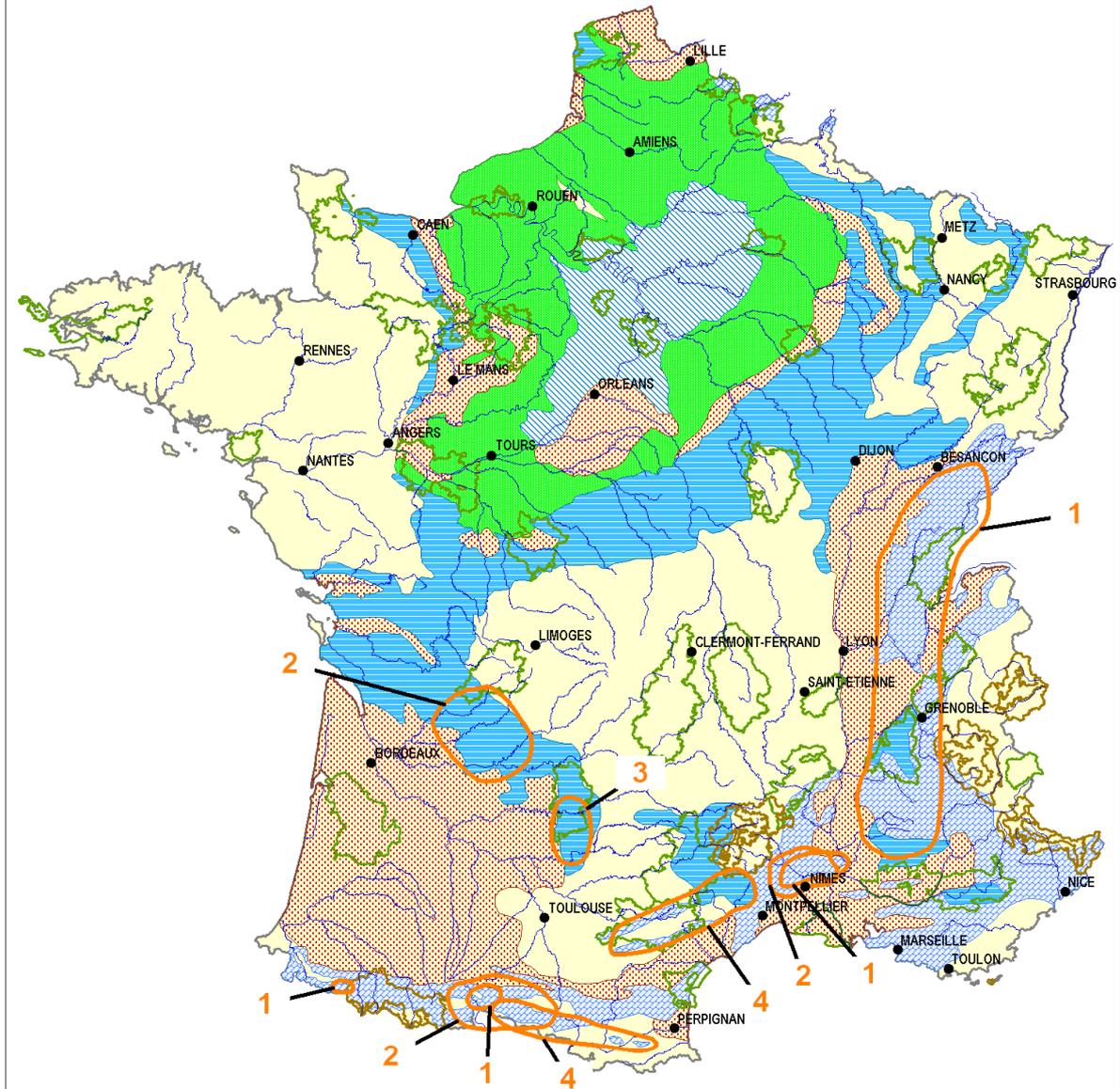
Quelques chiffres permettent de montrer l'importance de ce fantastique patrimoine :

- Les terrains calcaires où se trouvent les grottes occupent le tiers de la surface métropolitaine.
- La France compte de l'ordre de 100 000 cavités explorées par 15 à 20 000 spéléologues dont 7500 sont membres de la Fédération Française de Spéléologie, 800 membres du Club Alpin Français.
- 160 cavités abritent des œuvres pariétales
- 107 cavités sont aménagées pour recevoir le grand public (de l'ordre de 4 000 000 de visiteurs par an)
- de l'ordre de 130 cavités sont classées ou inscrites au titre des monuments historiques. de l'ordre de 110 cavités sont inscrites ou classées au titre des monuments naturels et des sites
- de l'ordre de 50 cavités sont classées au titre de la protection de la nature (Chiroptères, invertébrés ou minéralogie).

Le karst français est connu par ses grandes cavités avec des développements ou des profondeurs exceptionnels : Gouffre de la Pierre Saint Martin, gouffre Berger, Gouffre de Samoëns etc. mais quand on parle du patrimoine qui est présent dans le karst français et que l'on doit en extraire ce qui fait sa caractéristique au niveau international on peut sans hésiter citer les œuvres pariétales paléolithiques, les concrétions, les gisements de fossiles de l'ère tertiaire dans les phosphatières du Quercy et la résurgence intermittente de Fontestorbe près de Montségur dans l'Ariège.

La carte suivante présente le karst français avec la localisation de certains de ses caractéristiques principales : la géomorphologie, l'archéologie, la paléontologie, la minéralogie.

# Patrimoine géomorphologique des formations carbonatées en France métropolitaine



### Type de formation carbonatée

- Formation plissée et fortement tectonisée  
*Aquifères de petites dimensions, forts degrés de karsification*
- Formation tabulaire faiblement tectonisée  
*Aquifères de grandes dimensions, faibles et forts degrés de karsification*
- Formation à forte porosité primaire (craie,...)  
*Aquifères poreux, karsification locale*
- Formation partiellement carbonatée  
*Aquifères poreux ou fissurés, karsification locale*
- Formation sous couverture  
*Aquifères profonds, degrés de karsification variable*
- Pas de formation carbonatée notable

- Parc naturel national
- Parc naturel régional

- 1** Intérêt géomorphologique
- 2** Intérêt archéologique
- 3** Intérêt paléontologique
- 4** Intérêt minéralogique

# KARST ET CONCRETIONS

Patrick CABROL et Alain MANGIN

Extrait modifié de « Fleurs de Pierre »  
2000 – Editions Delachaux et Niestlé

## ORIGINE DES KARSTS

Le concrétionnement ne représente qu'une étape dans l'histoire globale des karsts. Celle-ci commence avec l'action d'eaux acides sur les roches calcaires qui, une fois dissoutes, font place à de grands vides. Cet ensemble de vides liés les uns aux autres suivant une structure bien définie prend le nom de Karst, en référence à la région maintenant slovène où le phénomène fut décrit pour la première fois, il y a près d'un siècle.

Un examen des deux acteurs mentionnés ci-dessus, roches calcaires et eaux acides, s'impose pour comprendre le processus karstique.

### Les roches calcaires

D'origine sédimentaire et biochimique, les roches calcaires sont relativement bien répandues dans le monde et en particulier sur le pourtour du bassin méditerranéen. En France, elles représentent un tiers de la superficie du territoire. Ces roches généralement dures, donc très cassantes, se fissurent à la moindre déformation, occasionnée par exemple par des mouvements tectoniques. En outre, en présence d'eau acide, elles se dissolvent suivant des mécanismes physico-chimique assez complexes qui, loin d'être instantanés, réclament souvent plusieurs jours pour se mettre en place.

### Les eaux acides

A l'origine, les eaux de pluie ne sont pas acides. Elles le deviennent lorsque, s'infiltrant dans le sol, elles s'enrichissent du gaz carbonique produit par l'activité bactériologique. Or, pour qu'il y ait percolation, il faut qu'il y ait perméabilité de la roche, propriété que présente le calcaire du fait de son potentiel de fissuration.

Sur ce principe s'organisent des vides karstiques selon un dispositif tout à fait original dont les grottes fournissent un excellent exemple.

### L'organisation hiérarchique des karsts

L'organisation des vides karstiques résulte de la dynamique même du phénomène de dissolution appelé karstification. Le processus est simple : plus il y a d'eau acide, plus les vides sont importants. Et inversement, plus il y a de vides, plus la quantité d'eau drainée est grande. Il en résulte, à l'échelle du massif, une organisation hiérarchique des vides karstiques, de l'amont vers l'aval, comparable à l'organisation des réseaux hydrauliques de surface (les vides se font plus denses vers l'aval tout comme s'agrandit le lit des rivières).

### **La zone épikarstique**

Dans la zone épikarstique (zone la plus rapprochée de la surface) les phénomènes de dissolution sont très importants, en raison de la proximité des sols, sources de gaz carbonique. Lorsque le sol disparaît par suite de l'érosion, les restes de cette dissolution persistent sous la forme de chicots de pierre appelés « lapiès » ou « lapiaz ».

### **La zone d'infiltration**

Plus profondément, les eaux suivent deux chemins. L'un, rapide, passe les fissures élargies par la karstification dont la densité décroît avec la profondeur. L'autre, beaucoup plus lent, emprunte des fissures très fines à travers lesquelles l'eau s'écoule avec un air enrichi en gaz carbonique.

### **La zone noyée**

Dans les parties profondes, la hiérarchisation prend toute son ampleur, mais sur le plan horizontal cette fois, avec une structure de drainage constituant les rivières souterraines. Ces dernières, souvent les seules reconnues par l'exploration spéléologique, ne sont pas les seules cavités existantes. En effet, de part et d'autre, et en liaison avec elles, existent de nombreux vides de très grandes dimensions, appelés « systèmes annexes au drainage ». Les « relations » entre ces vides et les rivières souterraines sont la plupart du temps impénétrables. Ces systèmes annexes au drainage sont surtout essentiels sur le plan hydrogéologique puisqu'ils possèdent d'importantes réserves d'eau. Les grands vides laissés après disparition des eaux sont à l'origine de cavités comme l'aven Armand, la grotte des Demoiselles et les réseaux de l'aven d'Orgnac.

Ainsi, on rencontre dans les massifs karstiques trois types de vides : les cavités (rivières souterraines, grottes, avens, anciens drains abandonnés par les eaux après l'enfoncement des karsts, etc.), le réseau des macrofissures, ayant pour origine les cassures agrandies par les processus de dissolution, et enfin le réseau des micro-fissures, cassures de moins d'1 mm.

En dehors de cette hiérarchisation, l'anisotropie des cassures à l'origine de la perméabilité, utilisée par la karstification, orientera directionnellement tous les vides dont il a été fait mention. C'est pourquoi les grottes ont souvent des configurations géométriques qui correspondent à la fracturation du massif.

## **LE CONCRETIONNEMENT ET LA ZONE D'INFILTRATION**

Dans la zone d'infiltration, trois types de flux, hydrique, gazeux et thermique, transitent de la surface vers les profondeurs selon des mécanismes différents suivant les trois types de vides traversés. Les véritables merveilles souterraines que sont les concrétions naissent dans les conditions très spécifiques au niveau des zones d'échanges, à la croisée des grottes, des réseaux macro-et microfissural.

### **Flux hydrique**

Les eaux de pluie, soumises à la gravité, sont attirées en profondeur. Une autre force appelée potentiel de succion, liée aux tensions superficielles, agit également sur le flux hydrique : si le potentiel de succion est négligeable pour les fissures larges, laissant l'eau s'écouler en ruisselant, en revanche, dans le réseau microfissural, les tensions superficielles sont telles que, à proximité d'une fissure élargie ou d'une cavité, l'eau a tendance à préférer les microfissures pour s'infiltrer en profondeur. Tandis que l'écoulement par ruissellement est temporaire, lié aux épisodes pluvieux, l'écoulement dans les microfissures est quasiment continu. Dans ce cas il entraîne l'air avec lui.

### **Flux gazeux**

L'écoulement de l'air en provenance de l'extérieur s'effectue par les grandes fissures et les cavités. Le moteur essentiel de cet écoulement est la pression barométrique. Des valeurs de cette pression dépend la quantité de l'air contenue dans les vides karstiques. En faisant donc varier les volumes d'air, la pression conduit à des débits de plusieurs dizaines de mètres cubes par seconde pour des massifs karstiques de quelques kilomètres carrés.

Les différences de température entre l'intérieur du massif et l'extérieur commandent, quant à elles, le sens des écoulements et peuvent provoquer des inversions. En été par exemple, l'air circule des parties hautes des massifs karstiques vers celles plus basses ; c'est l'inverse en hiver.

Dans le réseau microfissural, l'air riche en CO<sub>2</sub> est entraîné en profondeur par l'eau. Lorsque le réseau microfissural est rejoint par une fissure ou une cavité, se crée un vide qui va drainer l'air. Cette arrivée d'air, lente mais quasi continue, s'effectue sur l'ensemble des surfaces d'échange qui constituent les parois des grottes, et représente des débits très importants.

### Flux thermique

Le flux thermique se propage par diffusion dans les divers milieux (roche, air, eau) des parties chaudes vers les parties froides ; on parle de conduction. Ce mode de propagation, très lent, ne s'effectue que sur des distances très courtes.

La propagation de la chaleur peut également se faire grâce à un véhicule : l'eau. Il ne s'agit plus alors de conduction mais de convection. La capacité calorifique de l'eau est telle que la chaleur emportée ou dissipée par elle peut être très importante. Aussi observe-t-on en profondeur des températures relativement basses, de 12° C sous 600 m de roche par exemple, alors qu'avec le gradient géothermique, la température devrait être plus élevée. La chaleur apportée par le flux géothermique (chaleur du centre de la Terre) a en effet été absorbée par l'eau.

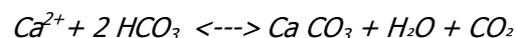
De la même manière qu'elle utilise l'eau, la chaleur peut se servir de l'air. La capacité calorifique de celui-ci est cependant plus faible que celle de l'eau, ce qui explique que ce mécanisme intervienne surtout à l'intérieur des cavités où il ne permet qu'un transfert de chaleur d'un point à un autre.

Les échanges s'effectuent donc d'une part entre la grotte et l'extérieur par les grandes ouvertures et le réseau macrofissural, d'autre part entre la cavité et le réseau microfissural. L'interface de ces échanges est la paroi. C'est à ce niveau que l'air en provenance de l'extérieur se charge en gaz carbonique et en humidité, cette dernière pouvant atteindre des taux supérieurs à 95%. Selon les gradients de CO<sub>2</sub>, c'est à dire les différences de teneurs, entre le réseau microfissural et la cavité, le concrétionnement aura lieu ou non.

### Les mécanismes de concrétionnement

C'est au XVIII<sup>e</sup> siècle que Buffon, le premier, décrit le rôle du gaz carbonique dans la formation des concrétions. Pourtant, malgré les preuves scientifiques données par le naturaliste, l'implication de micro-organismes (bactéries) dans le concrétionnement est encore invoquée. Or, si cette théorie est avérée pour le mondmilch, elle n'a jamais pu être appliquée de manière rigoureuse au reste des concrétions.

Un processus chimique, réalisé expérimentalement, peut rendre compte de la formation d'une majorité de concrétions. Il est formalisé de façon schématique par la réaction suivante :



L'étude théorique de cette réaction montre que les variables les plus déterminantes sont par ordre d'influence : la concrétion en calcium, la température, l'épaisseur du film d'eau et la pression partielle en gaz carbonique.

Quant au processus physique de la formation des cristaux (la cristallisation), il fait intervenir différents mécanismes : la sursaturation, l'évaporation et la nucléation (apparition de cristaux) avec présence ou non d'impuretés. Le moteur de cet ensemble est essentiellement le gradient de CO<sub>2</sub>.

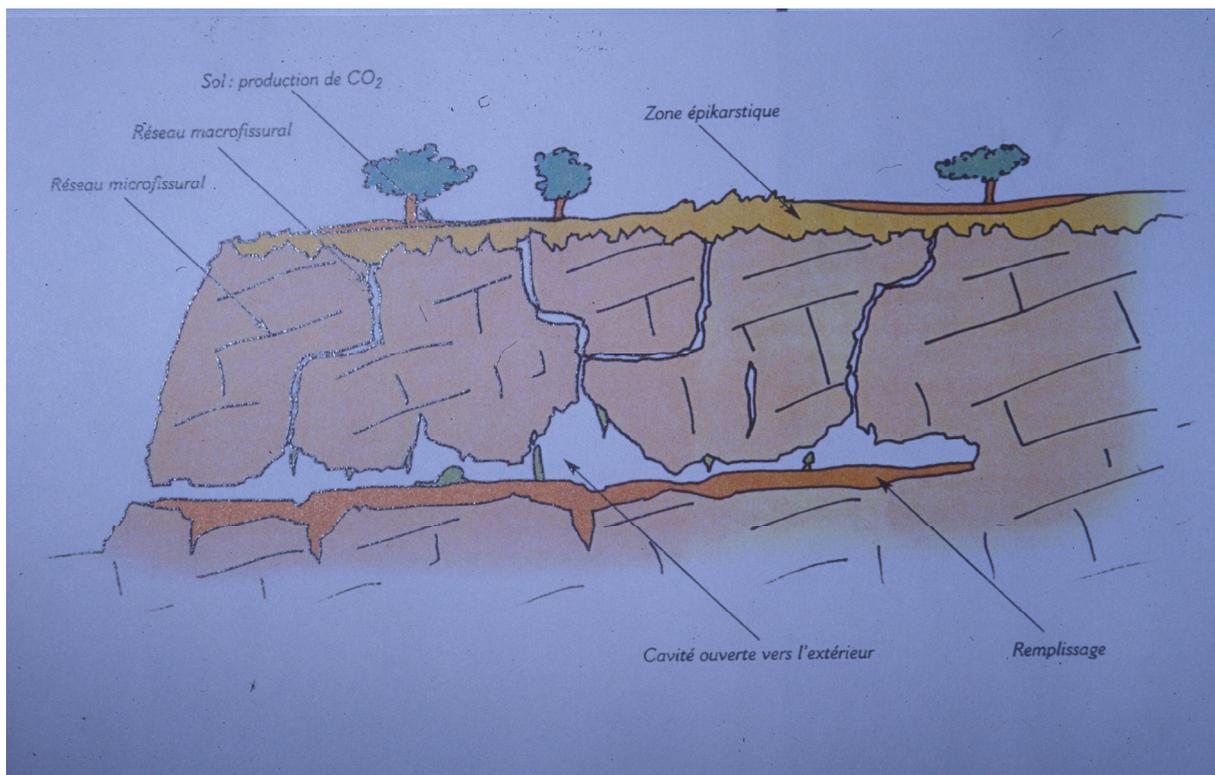
L'observation et l'étude de ces processus permettent de comprendre pourquoi les concrétions sont les authentiques reflets des différentes étapes de l'histoire du karst. Du fait, pour qu'une concrétion se forme, il faut, au préalable, qu'il y ait en surface des sols nécessaires à la production de CO<sub>2</sub> (qui résulte d'une activité bactériologique). Il faut, ensuite, qu'il y ait de l'eau pour entraîner en profondeur le CO<sub>2</sub> qui doit dissoudre la roche, ce qui suppose aussi une roche suffisamment perméable pour permettre à l'eau de s'écouler. Les eaux, alors chargées de calcaire dissous, rencontrent une zone aérée dont les échanges avec l'extérieur créent un gradient de CO<sub>2</sub> essentiel à la précipitation de carbonate de calcium. Par les mécanismes mêmes de leur mise en place, les concrétions fossilisent donc des conditions paléoenvironnementales dont elles deviennent un témoignage précis et précieux.

## CONCRETIONS : DES FORMES MULTIPLES ET VARIEES

Selon le principe de Curie qui veut que l'on retrouve nécessairement dans les effets les symétries existantes dans les causes, on reconnaît dans la forme des concrétions les processus physiques dont la dynamique est responsable de la formation. Ce sont les lois de la cristallisation. Toutefois, en raison de réactions chimiques et d'autres mécanismes physiques mis en cause, cette dynamique se voit plus ou moins perturbée, ce qui explique la très grande diversité des types de concrétions.

Lorsque l'eau s'écoule rapidement, par exemple, une force déterminante prime toutes les autres, la pesanteur. Cette force verticale se retrouve dans la forme de la concrétion : ce sont les stalactites et les stalagmites. Si au contraire le concrétionnement s'effectue en milieu calme et aquatique, seules agissent les forces de cristallisation. C'est le cas des géodes ou des gours à l'intérieur desquels on peut observer de magnifiques cristaux aux formes parfaitement géométriques.

Quant toutes les formes soumises aux multiples influences du milieu environnemental interagissent, la trajectoire de la cristallisation est totalement désordonnée. Même si préexistent des mécanismes déterministes très précis, les cristaux croissent alors au hasard. Ce phénomène très fréquent dans la nature montre qu'à partir de quelques lois déterministes on peut obtenir des structures à caractère aléatoire auxquelles on a donné le nom de « chaos » (la manière dont se met en place le chaos fait actuellement l'objet d'une théorie en pleine expansion). La forme de ces structures répond alors à une géométrie particulière appelée « géométrie fractale ». Les concrétions « excentriques » fournissent de très belles images fractales.



*Coupe schématique d'un karst*

# VARIABILITE DE L'ENVIRONNEMENT NATUREL DES CONCRETIONS DES GROTTES PROPOSEES AU PATRIMOINE MONDIAL

N°	Cavité	Contexte pétrographique	Age	Structure géologique	Métamorphisme	Système hydrogéologique	Contexte métallique
01	Amélineau	Calcaires	Bathonien	Zone tabulaire	Néant	Ancien système annexe	Néant
02	Choranche	Calcaires	Aptien à faciès urgonien	Zone plissée	Néant	Drain principal actuel	Néant
03	Armand	Calcaires	Kimméridgien	Zone tabulaire	Néant	Ancien système annexe	Néant
04	Demoiselles	Calcaires	Kimméridgien supérieur à gros bancs – Bord de talus récifal.	Zone tabulaire au contact de la faille des Cévennes	Néant	Ancien système annexe	Néant
05	Balme del Pastre	Calcaires	Cambrien	Ecaille tectonique	Métamorphisme régional	Ancien drain principal	Néant
06	Aguzou	Calcaire et dolomies	Dévonien	Zone fortement plissée à proximité d'un massif granitique	Métamorphisme régional et métamorphisme de contact	Ancien drain principal	Présence de cuivre
07	Lauzinas	Calcaires et dolomies	Dévonien	Nappes de charriage	Métamorphisme régional	Ancien drain principal	Néant
08	TM 71	Calcaires et dolomies	Dévonien	Zone fortement plissée à proximité d'un massif granitique	Métamorphisme régional et métamorphisme de contact	Drain principal ancien et actif suivant les galeries	Présence de cuivre
09	Cabrespine	Calcaires et dolomies	Dévonien	Nappes de charriage	Métamorphisme régional	Drain principal actif ou ancien suivant les galeries	Néant
10	Esparrros	Calcaires dolomitiques	Aptien	Zone plissée et bréchique au contact de la faille Nord Pyrénéenne avec	Métamorphisme pyrénéen (basse pression et haute température)	Ancien drain principal	Présence d'un peu de sulfures

N°	Cavité	Contexte pétrographique	Age	Structure géologique	Métamorphisme	Système hydrogéologique	Contexte métallique
11	Pousselières	Calcaires et dolomies	Cambrien	Nappes de charriage	Métamorphisme régional	Ancien drain principal	Néant
12	Clamouse	Calcaires et dolomies	Jurassique moyen	Zone plissée		Drain principal ancien ou actif suivant les galeries	Néant
13	Lachambre	Calcaires et dolomies	Dévonien	Zone fortement plissée au contact d'un massif cristallin	Métamorphisme régional	Ancien drain principal	Néant
14	Rautely	Calcaires et dolomies	Cambrien	Nappes de charriage	Métamorphisme régional	Drain principal ancien ou actif suivant les galeries	Présence de cuivre
15	Marcou	Calcaires dolomitiques	Cambrien	Ecaille tectonique. Zone filonienne dans une faille	Métamorphisme régional	Drain principal actif	Présence de zinc
16	Cigalère	Calcaires et dolomies	Cambro-ordovicien	Zone fortement plissée et fortement minéralisée	Métamorphisme régional	Drain principal actif u ancien suivant les galeries	Présence importante de sulfures, de plomb, zinc, cuivre, du fer
17	Orgnac	Calcaires	Aptien	Zone tabulaire	Néant	Système annexe ancien semi actif.	Néant
18	Barrency de Fournes	Calcaires, grès et quartzites	Cambrien	Nappes de charriage	Métamorphisme régional	Néant : Mine antique	Présence de cuivre

# FORMATION DES CONCRETIONS

Patrick CABROL et Alain MANGIN

Extrait modifié de « Fleurs de Pierre »  
2000 – Editions Delachaux et Niestlé

## CONCRETIONS : DES FORMES MULTIPLES ET VARIEES

Selon le principe de Curie qui veut que l'on retrouve nécessairement dans les effets les symétries existantes dans les causes, on reconnaît dans la forme des concrétions les processus physiques dont la dynamique est responsable de la formation. Ce sont les lois de la cristallisation. Toutefois, en raison de réactions chimiques et d'autres mécanismes physiques mis en cause, cette dynamique se voit plus ou moins perturbée, ce qui explique la très grande diversité des types de concrétions.

### **Théorème de Curie**

« Lorsque certaines causes produisent certains effets, les éléments de symétrie des causes doivent se retrouver dans les effets produits »

Extrait de :  
« sur les symétrie dans les phénomène physique »  
Pierre Curie, Paris 1894.

Lorsque l'eau s'écoule rapidement, par exemple, une force déterminante prime toutes les autres, la pesanteur. Cette force verticale se retrouve dans la forme de la concrétion : ce sont les stalactites et les stalagmites. Si au contraire le concrétionnement s'effectue en milieu calme et aquatique, seules agissent les forces de cristallisation. C'est le cas des géodes ou des gours à l'intérieur desquels on peut observer de magnifiques cristaux aux formes parfaitement géométriques.

Quant toutes les formes soumises aux multiples influences du milieu environnemental interagissent, la trajectoire de la cristallisation est totalement désordonnée. Même si préexistent des mécanismes déterministes très précis, les cristaux croissent alors au hasard. Ce phénomène très fréquent dans la nature montre qu'à partir de quelques lois déterministes on peut obtenir des structures à caractère aléatoire auxquelles on a donné le nom de « chaos » (la manière dont se met en place le chaos fait actuellement l'objet d'une théorie en pleine expansion). La forme de ces structures répond alors à une géométrie particulière appelée « géométrie fractale ». Les concrétions « excentriques » fournissent de très belles images fractales.

Nous allons donc ici étudier chaque type de concrétion et voir les liaisons qu'il peut y avoir le karst et son fonctionnement.

## LA FORMATION DE QUELQUES TYPES DE CONCRETIONS

### Les stalagmites :

Les stalagmites sont les formes les plus simples puisque l'écoulement de l'eau est dû à la seule action de la force de pesanteur. A son arrivée au sol l'eau éclabousse de façon homogène dans toutes les directions et la résultante d'une force verticale (la pesanteur) et la dispersion de l'eau de façon égale dans toutes les directions de l'espace ne peut donner naissance qu'à une structure verticale en forme de colonne : la stalagmite.

Vu la simplicité de leur genèse, les stalagmites sont les concrétions les plus étudiées pour comprendre l'évolution du climat avec des mesures isotopiques. L'étude du C14 donne l'âge jusqu'à 50 à 60 000 ans, l'Uranium/thorium permet de remonter jusqu'à 600 000 ans ; les isotopes de l'oxygène donnent les températures au moment du dépôt. Il a ainsi été possible de dater à 500 000 ans une inclusion d'eau dans une stalagmite de la grotte de Clamouse et de savoir que la température dans la cavité au moment du dépôt était de 10 ° C alors qu'elle est de 14 ° actuellement, grâce aux isotopes de l'hydrogène (deutérium).



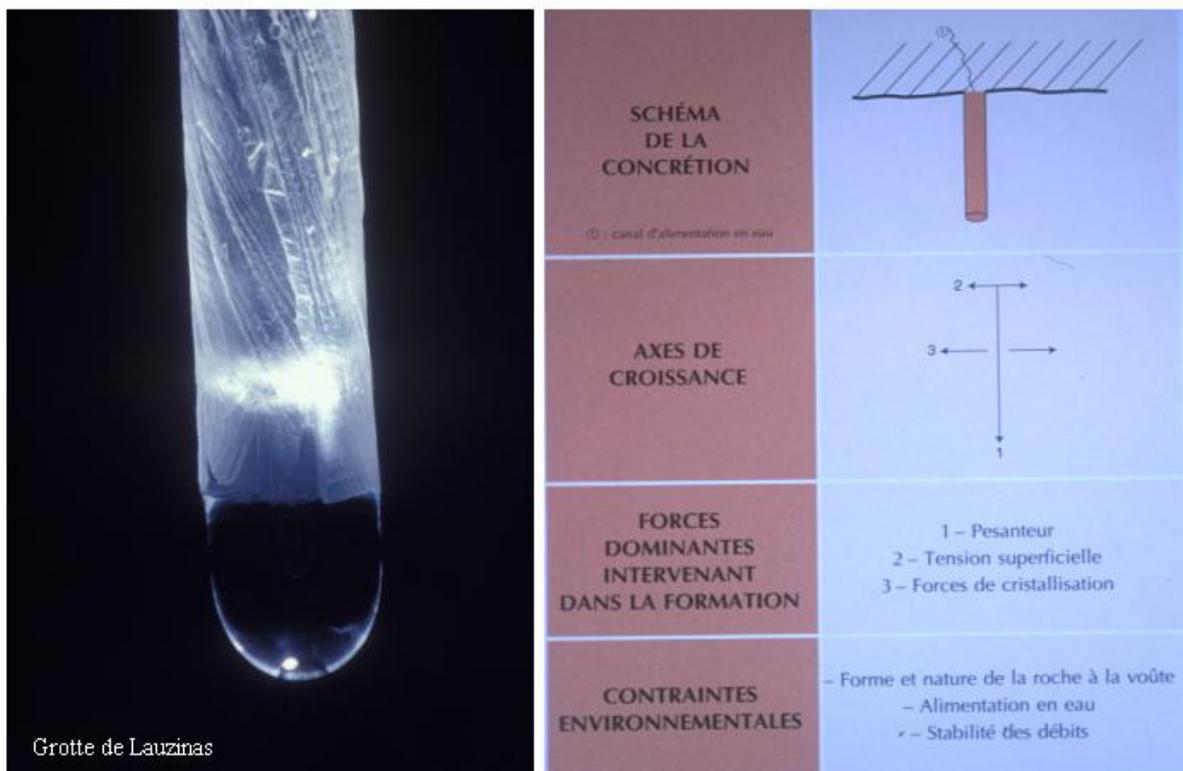
### Les fistuleuses :

La fistuleuse est une variété très simple de stalactite. Elle est pendue à la voûte et se présente sous la forme d'un simple tube de 1 cm de diamètre environ pour 4 à 5 mètres de longueur pour les plus importantes.

Dans le cas d'une fistuleuse, l'eau qui pend à l'extrémité de la concrétion par son propre poids (et qui ne tombe pas) se trouve retenue par la tension superficielle qui la colle à l'extrémité de la concrétion. On est donc en présence d'une force verticale (la pesanteur) et d'une force isodiamétrique horizontale (la tension superficielle qui la colle au plafond). La conjugaison de ces deux forces ne peut qu'être qu'un tube vertical.

Les fistuleuses sont un exemple remarquable pour nous montrer les relations qui existent entre le fonctionnement du karst et la formation de la concrétion. En effet dans ce cas il est nécessaire que l'évaporation de la goutte d'eau soit exactement compensée par l'alimentation en eau du canal axial de la concrétion et ceci doit se poursuivre durant des centaines ou des milliers d'années si la fistuleuse atteint de grandes tailles (4 à 5 mètres par exemple). En effet cette stabilité aura dû se poursuivre durant des étés très secs, des périodes pluvieuses, le petit âge glaciaire etc..

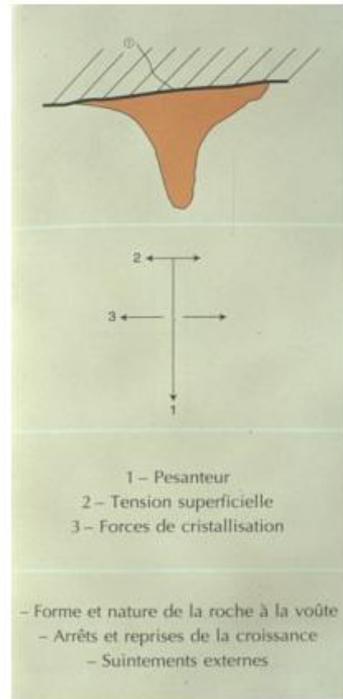
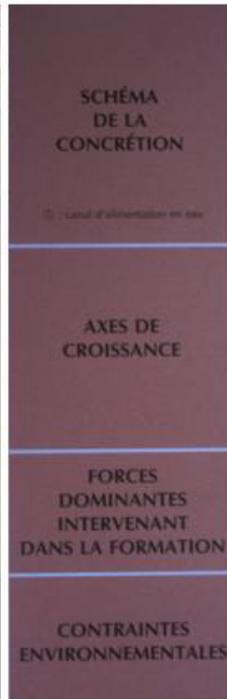
Ceci signifie qu'entre la surface et la zone où se forme la concrétion, le karst se comporte comme un filtre, au sens physique du terme, et régule parfaitement les fluctuations climatiques extérieures. A travers la présence de fistuleuses nous observons de façon indirecte la présence d'un filtre situé dans la zone d'infiltration du karst. Plus la fistuleuse est longue plus ce filtre a fonctionné longtemps. La présence de ce dernier peut être due à un colmatage du karst lors de périodes concernant des dépôts importants.



### Les stalactites :

La stalactite est en fait une fistuleuse dont le canal axial se bouche et se débouche en permanence en fonction du débit de l'eau c'est à dire en fonction des variations de pluviométrie à l'extérieur, donc en fonction des variations climatiques (été – hiver...).

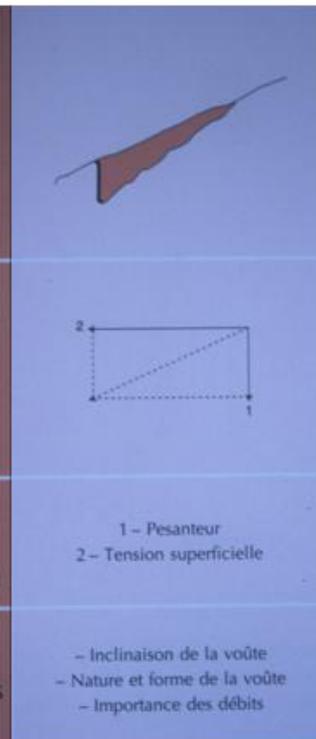
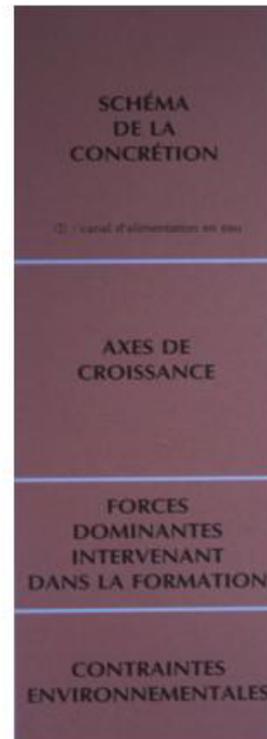
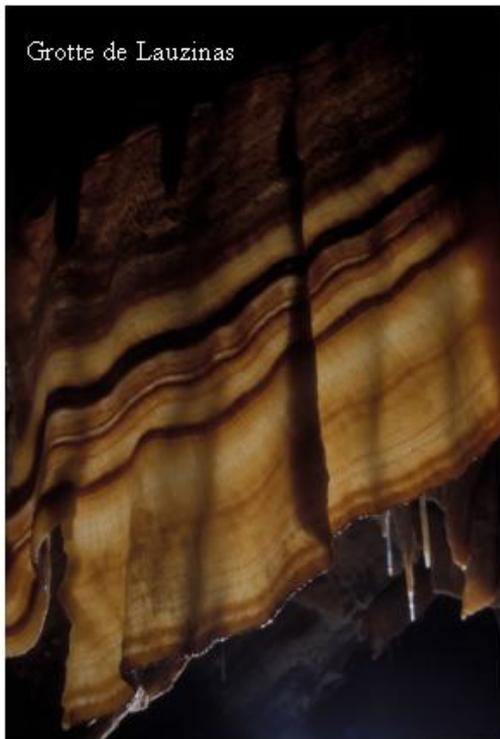
Les stalactites enregistrent les variations de débit qui sont la plupart de temps de l'ordre de l'année, mais on observe souvent aussi à leur surface des cycles plus importants.



### Les draperies :

Les draperies se forment sous les parois inclinées. Un voile de calcite se dépose sur la roche en suivant ses ondulations. Dans ce cas deux forces sont en présence comme pour les fistuleuses, mais ici la condition aux limites du système (c'est-à-dire la voûte) n'est plus horizontale mais oblique, la résultante ne peut être d'une concrétion à axe vertical et plane.

Les variations minéralogiques (calcite – aragonite) ou de couleur (brun, ocre etc..) nous renseignent sur les variations climatiques à l'origine de cette concrétion en fonction des variations de la chimie des eaux ou bien des étapes de dégradation de la matière organique.



## Les disques :

Lorsque l'eau arrive sous pression à la voûte d'une galerie ou d'une salle dans une fissure, l'eau aura tendance à s'écouler de la même manière que lorsqu'on pince un tuyau d'arrosage à son extrémité. Le liquide s'écoule alors selon un plan. Il en est de même avec les disques qui sont formés de deux plateaux dont la construction s'effectue en prolongement direct de la fissure de la roche. La pression est ici la force dominante.

La présence de disque nous renseigne donc sur les phénomènes de mise en pression dans la zone d'infiltration.

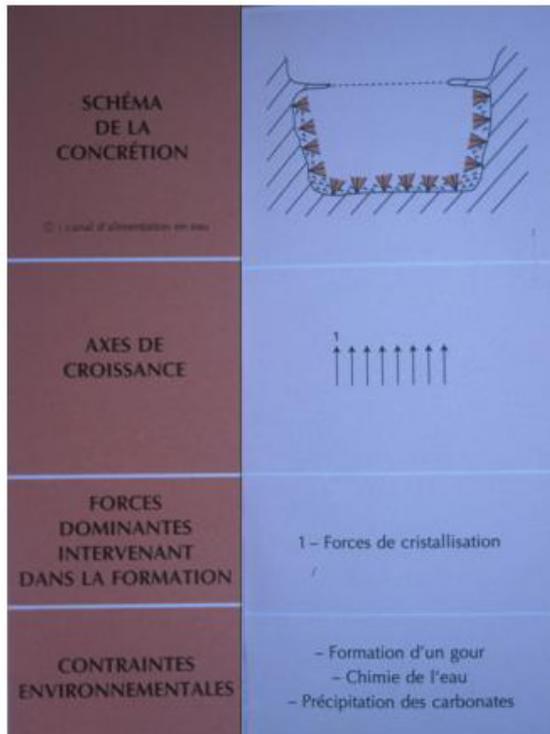


## Les cristaux de gour :

Lorsque les cristaux se forment à l'intérieur d'un petit bassin que l'on appelle « gour » les cristaux ne sont soumis qu'à la force de pesanteur et aux forces de cristallisation qui sont ici très importantes. Dans ce cas, les forces de cristallisation dominent largement et le cristal va développer le plus librement possible toutes ses faces à partir d'une paroi du gour.

Dans ce cas ce sont donc les forces cristallines qui sont les plus importantes et elles demandent un milieu calme afin de pouvoir s'exprimer. Plus le milieu est calme et l'alimentation régulière, mieux les cristaux sont formés et plus ils sont gros. Les variations de chimie de l'eau, le gradient de  $p_{CO_2}$  etc. vont permettre la formation de cristaux de forme et de taille très variées.

Les cristaux de gour nous renseignent donc sur la régularité et la qualité des écoulements dans les galeries.



### Les perles :

Les perles des cavernes sont de petites sphères dont le diamètre peut atteindre plusieurs centimètres. Elles se forment dans des salles assez hautes. Lors de sa chute, la goutte d'eau perd une partie de son gaz carbonique et la calcite précipite donc directement au point d'impact sur le sol. Le mouvement vertical de l'écoulement de l'eau est transformé en mouvement rotationnel, et la concrétion est sphérique.

Les perles demandent pour se former une hauteur de voûte suffisante pour permettre à la solution de se trouver en état de sursaturation au moment de l'impact sur le sol. Il est donc nécessaire d'avoir des atmosphères qui présentent des concentrations de gaz carbonique assez faible, ce qui signifie que le milieu est bien ventilé.



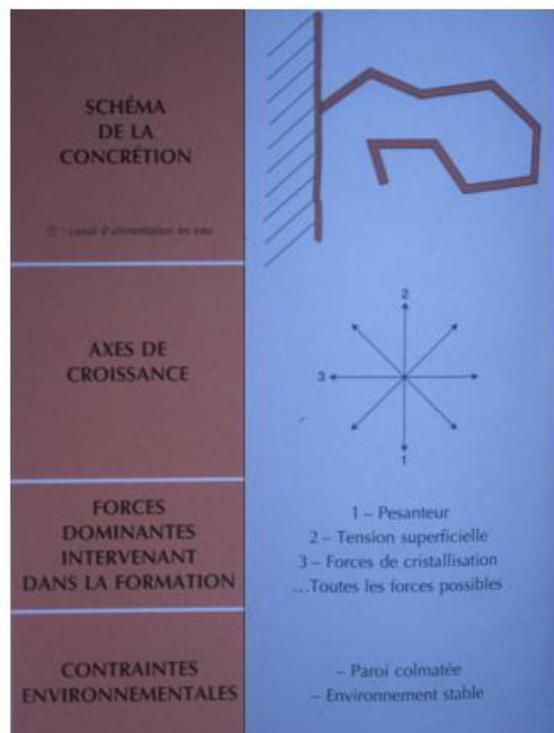
## Les hélictites :

Les hélictites font toujours l'admiration des visiteurs des grottes. Elles prennent toutes les formes possibles en boucles, anneaux, vrilles... et les combinaisons sont infinies. Leur formation est pourtant très simple.

Nous venons de voir que lorsque la force dominante est verticale (fistuleuse), la concrétion sera verticale ; lorsque la force dominante est oblique (la pression dans les disques) la concrétion se forme dans l'alignement de la fissure de sortie de l'eau ; lorsque les forces de cristallisation dominent (cristaux dans un gour), la concrétion développe toutes ses formes cristallines.

Dans le cas des hélictites, nous sommes en présence de trois forces qui agissent à 90° les unes des autres (la pesanteur verticale, la tension superficielle et les forces de cristallisation le plus souvent qui sont horizontales). La résultante de ces trois forces est aléatoire et la concrétion se développe dans toutes les directions de l'espace. Il est alors intéressant de remarquer que, si à un moment, la pesanteur redevient la force la plus importante, on va observer l'apparition d'une fistuleuse et vice versa. Certaines concrétions présentent ainsi une petite portion sous la forme d'une hélictite, puis une fistuleuse, une hélictite, une fistuleuse... c'est ce que l'on observe à la grotte de Lauzinas.

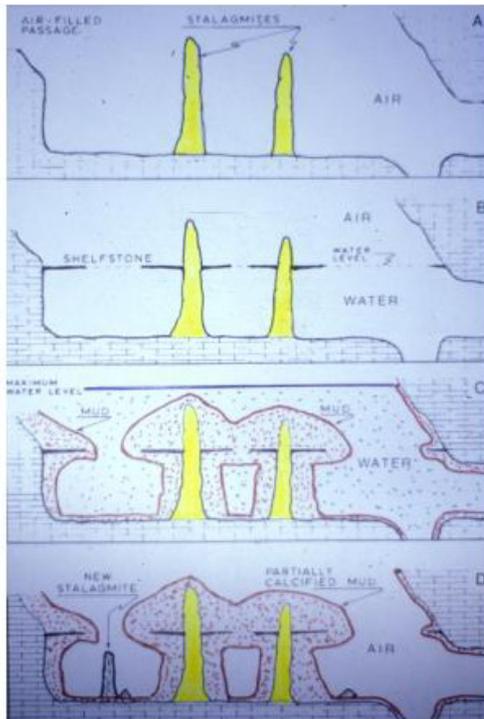
Les concrétions excentriques nous renseignent donc sur la présence de conditions environnementales très stables dans la cavité durant toute leur formation.



## Les concrétions et les paléoclimats.

On a vu plus haut que la coloration des draperies nous permet d'observer directement l'influence des variations de la végétation en surface, donc les variations climatiques. Cette lecture des variations climatiques est parfois particulièrement lisible dans certains concrétions. C'est le cas de certaines concrétions polyphasées comme les Champignons de la grotte du Lauzinas dans l'Hérault.

Dans le cas des Champignons de la grotte du Lauzinas, la forme des concrétions, leur position et leurs relations avec les autres concrétions voisines permettent d'indiquer à coup sûr qu'une première stalagmite s'est formée au sol dans la cavité. Ensuite le niveau de l'eau est monté jusqu'à une valeur fixe durant un certain temps ce qui a permis de former une collerette autour de la stalagmite ; puis le niveau est monté une nouvelle fois, témoin de périodes plus humides en surface. Enfin, le niveau est retombé pour arriver à la situation actuelle beaucoup plus sèche.



## Grotte du Lauzinas Saint Pons (Hérault)



Il est de même pour les Cymbales de la grotte du TM 71 qui témoignent de la présence d'une première période très stable avec la formation d'une fistuleuse. Le sol s'est ensuite faiblement affaissé sous le poids des concrétions et des remplissages, puis l'alimentation en eau a augmenté permettant la formation d'un petit disque dont les deux parties se sont séparées sous l'effet du sol qui continuait à se tasser.

Les exemples de ce type sont très nombreux dans les cavités françaises mais ces derniers sont particulièrement spectaculaires.

De même les concrétions présentant un polyphasage minéralogique nous renseignent sur le fonctionnement de karst et les équilibres chimiques. C'est le cas des concrétions de calcite, recouvertes d'aragonite puis d'hydromagnésite, qui correspondent à une évolution chimique normale de la solution aqueuse, alors que la succession calcite – Aragonite – Gypse de la grotte de la Cigalère nous montre que l'on passe d'une cristallisation de carbonate (d'origine chimique) à une précipitation d'un sulfate (d'origine physique, puisque le gypse est une évaporite).

- Calcite / aragonite / hydromagnésite



Réseau Lachambre

- Calcite / aragonite / gypse



Grotte de la Cigalère

Ce cours développement nous montre donc que l'observation des concrétions présentes dans une cavité nous donne de précieuses informations sur le fonctionnement de la zone d'infiltration, les conditions environnementales, l'évolution de la chimie des solutions et les climats anciens.



# LA PROTECTION DES CONCRETIONS

Patrick CABROL et Alain MANGIN

Extrait modifié de « Fleurs de Pierre »  
2000 – Editions Delachaux et Niestlé

## Un patrimoine naturel en danger

Si les concrétions présentent un intérêt esthétique, à l'origine même du développement d'un tourisme souterrain, elles présentent également, sur un plan paléoenvironnemental, l'avantage d'être de fidèles enregistreurs de l'ensemble des paramètres qui ont présidé à leur formation. De ce fait, une observation attentive de ces concrétions permet de reconstituer une partie de l'histoire des régions dans lesquelles les cavités évoluent.

Aussi exceptionnel soit-il, ce patrimoine souterrain est mis en péril par l'action nuisible des hommes, certes, mais également par l'évolution naturelle. Celle du karst en effet peut conduire à la destruction des cristallisations présentes dans les grottes. Il s'agit là du stade ultime d'une évolution qui dure depuis des millénaires. La protection des concrétions (si ce n'est des pillages et autres dégradations volontaires) par l'homme et pour l'homme (puisque l'on sait que les concrétions ne sont pas éternelles) passe par une conservation des cavités. Deux choix sont alors possible : soit on s'attache à laisser les cavités dans l'état qui était le leur au moment de leur découverte, soit on fait en sorte, lors de nécessaires transformations, de respecter et préserver leurs propriétés conservatoires.

Les principaux facteurs de destruction des concrétions sont de deux sortes : ceux qui relèvent de l'action volontaire de l'homme et ceux de son action involontaire sur le karst. Les actions volontaires à l'origine d'une dégradation sont le vandalisme, le ramassage pour les collectionneurs (de minéraux mais aussi d'une faune cavernicole), les travaux d'ouverture ou de fermeture des accès aux cavités, l'élargissement ou l'obstruction de galeries découvertes, l'exploration et les visites mal conduites, l'aménagement touristique mal réalisé, les travaux de génie civil ainsi que les boisements ou déboisements en surface et enfin les pollutions diverses.

Les actions involontaires de l'homme sont beaucoup moins connues mais non moins dangereuses pour la sauvegarde du patrimoine souterrain. Il s'agit principalement des effets du métabolisme humain. Par le simple fait qu'il respire, l'homme consomme de l'oxygène, rejette du gaz carbonique, mais il apporte surtout de la chaleur. Selon les conditions environnementales qui règnent dans la cavité, les effets de ce métabolisme peuvent être préjudiciables à la conservation des concrétions ainsi que des œuvres pariétales ; en témoigne l'exemple de la grotte de Lascaux dont les peintures ont été recouvertes d'un voile calcitique et d'algues, à cause de la surfréquentation.

La protection des concrétions doit commencer au moment même de leur découverte par les spéléologues, puis se poursuivre inlassablement, aussi longtemps qu'est visitée la cavité qui les contient. Elle ne peut qu'être le résultat de l'action conjuguée de tous les maillons de la chaîne : les découvreurs, les élus, l'Etat et les propriétaires. D'après le code civil (art. 552) en effet, les grottes appartiennent aux propriétaires des sols sous lesquels elles sont situées, aussi est-il nécessaire de pouvoir impliquer ceux-ci dans la sauvegarde de ce patrimoine.

## Un patrimoine à préserver

L'attitude des spéléologues quand ils découvrent et explorent une cavité (on les appelle les « inventeurs ») joue un rôle capital dans sa conservation. Les découvreurs de vestiges paléontologiques, de concrétions ou d'habitats de la faune souterraine doivent redoubler de vigilance, comme l'on fait les trois inventeurs de la grotte Chauvet, pour léguer à l'humanité un site archéologique unique dans un état de conservation absolument parfait. Cette grande attention a été aussi l'attitude des spéléologues qui ont découvert des cavités comme : l'Aguzou, le TM 71, l'Asperge, Pousselières etc. ...

### La protection des sols

Le respect des sols lorsqu'une grotte est explorée pour la première fois est impératif. C'est pourquoi les spéléologues adoptent une série de comportements parfaitement adaptés : ils enlèvent simplement leurs bottes et marchent en chaussettes ou utilisent des chaussures propres ; ils peuvent encore déplier, à chaque exploration, un plastique afin de ne pas salir les cristallisations. Des ponts de singes fabriqués avec deux câbles tendus l'un au-dessus de l'autre (un pour les pieds, l'autre pour les mains) rendent parfois de précieux services et évitent de casser des cristaux contenus dans les gours (grotte de Pousselières).

Les sols des galeries doivent ensuite être balisés. Le spéléologue en effet, en circulant dans les galeries, sauf dans le cas exceptionnel où sont construites des tyroliennes ou des ponts de singes, ne peut qu'en salir une partie. Afin que cette atteinte soit la plus restreinte possible, on matérialise, par des rubans de travaux publics ou des fils imputrescibles, l'espace au sol minimal permettant de progresser dans la cavité sans la dégrader. Cette technique, développée pour la première fois en France par la famille Begouën au début du XX<sup>e</sup> siècle lors de la découverte du site préhistorique de la grotte des Trois Frères dans l'Ariège a été mis en place par Jean Bataillou lors de l'exploration de la grotte de l'Aguzou en 1965, puis a été utilisée par la suite sur de nombreux autres sites (le TM 71, le gouffre d'Esparros, la grotte de Lauzinas, l'aven d'Orgnac, la grotte de l'Asperge, la grotte de Pousselières etc).



*Balilage de la galerie dans la galerie de l'Aragonite au gouffre d'Esparros à gauche et Balilage au sol dans le Réseau André Iachambre*

Parfois, les rubans de travaux publics sont remplacés par des petits murets construits à partir de rochers ou galets présents dans la cavité, ce qui préserve l'esthétique du site (grotte de la Cigalère et Réseau Lachambre). Dans les cas de sols sableux, ceux-ci sont stabilisés afin d'éviter toute projection sur des cristaux de gours par exemple. Pour conserver les couleurs de la grotte, on utilise un ciment fabriqué avec du sable provenant de la cavité. Cette technique très simple peut également servir à réparer des bords de gours. Les spéléologues sont de plus en plus respectueux des vestiges archéologiques, des sols concrétionnés etc., et soucieux de leur conservation. Toutefois une galerie recouverte de simples galets, parce qu'ils informent autant sur l'environnement que les concrétions, mériterait la même attention.

Dans certains cas particuliers il est nécessaire de mettre en place un équipement fixe dans la cavité. Son but est de sécuriser les passages tout en mettant en place une protection maximale des galeries. On obtient ainsi un passage sécurisé et obligé des visiteurs. Il est alors possible d'utiliser des échelles rigides, des « fers en U », des équerres et des poignées fixées sur les parois. Ces équipements sont aujourd'hui en place aux grottes de l'Aguzou, du PN 77, de l'Asperge et du Lauzinas.



*Grotte de la Cigalère –  
Pose d'un muret de pierre pour protéger le buisson d'aragonite situé au plafond*

### Le nettoyage : des techniques délicates

Pour des raisons de convivialités, les visiteurs d'une grotte ont souvent tendance à circuler côte à côte, à deux, trois, parfois plus ; or ce comportement est préjudiciable à la conservation des sols, des remplissages, des concrétions, vieux de plusieurs milliers d'années et qu'un simple coup de pied peut salir, déplacer, détruire à tout jamais.

Lorsque les concrétions ont été souillées, il est parfois possible de les nettoyer, à condition de le faire rapidement. Plus on attend en effet, plus les risques que les salissures soient fixées par le concrétionnement sont grands. Un moyen très simple consiste à se servir d'un pulvérisateur à eau sous pression, l'eau utilisée étant celle de la cavité. Pour les concrétions massives, on utilise plutôt un pulvérisateur du type de celui utilisé par les arboriculteurs. En revanche, pour les cristallisations fines et fragiles (les hélicites, les fistuleuses assez courtes, les cristaux d'aragonite, etc.), la prudence est de mise et invite à employer un petit pulvérisateur pour plantes d'appartement. Le nettoyage d'une fistuleuse, surtout lorsqu'elle est très longue, reste une opération risquée car la projection de l'eau, même à très faible pression et à très faible débit peut la briser.

Il est impératif de ne jamais utiliser d'acide, même dilué, sur les concrétions fines ; et même sur des concrétions massives, ce type de nettoyage reste délicat. D'autant qu'il nécessite un important rinçage, ce qui suppose un écoulement possible de l'eau.

Les projections d'argiles, présentes au fond d'un gour ou sur une coulée de calcite, peuvent, quant à elles, être éliminées au moyen d'une petite boule d'argile sur laquelle elles se collent. Dans les cas où le sable est suffisamment sec, il est toujours possible de nettoyer les sols avec un petit aspirateur alimenté par une batterie.

Les techniques présentées ici sont les plus usitées et les plus simples pour éviter de souiller un sol ou nettoyer un sol déjà sali, mais d'autres possibilités existent en fonction du type de dégradation et de la configuration des lieux.

## La restauration

Dans deux cas particuliers les sols ont été restaurés. Il s'agit du gouffre d'Esparros et la grotte du Lauzinas. Dans ces deux cas les visiteurs avaient emprunté une zone trop large lors des premières explorations il y a une cinquantaine d'années.

Ces travaux sont réalisés conformément à l'article 7 des recommandations de l'UICN (U.I.C.N. World Commission on protected Areas – 1997) qui précise que (*Article 7*) : *Tout en reconnaissant le caractère "non renouvelable" de nombreuses caractéristiques du karst, particulièrement en ce qui concerne les grottes, une bonne gestion implique que les dégâts soient restaurés dans la mesure du possible.*

Dans le cas présent les sols étaient recouverts d'une mince couche de cristallisations de calcite et d'aragonite blanche. Les deux cavités sont creusées dans les calcaires dolomitiques et on sait que la présence de magnésium favorise l'apparition de l'aragonite. Les sols salis ont donc été restaurés à partir de dolomite de couleur blanche provenant de la carrière de Saint-Colombe-sur-Guette dans la Haute vallée de l'Aude. La roche est finement broyée à 600 microns et répandue de façon homogène sur les sols. Nous avons eu la surprise d'observer, au bout d'une année seulement, dans le gouffre d'Esparros, l'apparition d'une petite croûte à la surface des dépôts montrant que la restauration des sols de la cavité était possible dans de bonnes conditions et était même plus rapide que prévu lorsque les conditions environnementales de la grotte le permettent.

## Etudes environnementales

La problématique et la méthodologie des études environnementales correspondent à un travail d'équipe. Depuis une dizaine d'années, au laboratoire souterrain de Moulis (Ariège), Alain Mangin et Dominique D'Hulst en effet, en collaboration avec François Bourges, du bureau d'études Géologie Environnement Conseil, (dans le cadre des études de conservation des œuvres pariétales et des cristaux de grottes) cherchent à définir les caractéristiques conservatoires de l'environnement souterrain. Toutes les considérations qui suivent résultent donc de cette réflexion commune.

### Propriétés conservatoires, un équilibre fragile

Le milieu souterrain, très tamponné, à l'abri des grandes variations extérieures, est réputé pour ses priorités de conservation ; en témoignent les œuvres pariétales préhistoriques qui ont traversé les âges sans dommage. La grotte Chauvet, découverte dans l'Ardèche, présente par exemple des peintures vieilles de plus de 30 000 ans en parfait état. Malgré cela l'homme, par sa présence, peut bouleverser les données naturelles et, en quelques années de surfréquentation, dégrader des peintures restées intactes jusque-là. Le paradoxe est là : tandis qu'une cavité peut subir sans dommage des variations importantes des conditions environnementales (la grotte Chauvet a vu la fin d'une forte glaciation), elle est très vulnérable aux dégradations causées par la simple présence de l'homme.

Pour comprendre ce paradoxe, il faut replacer la cavité dans le cadre des échanges thermiques, hydriques et gazeux qu'elle assure avec l'extérieur. La conservation n'est pas liée aux paramètres température, humidité ou teneur en CO<sub>2</sub>, ni à l'ampleur de leurs variations, mais à un équilibre

dynamique entre les apports d'énergie et ceux que la grotte peut absorber. Un paramètre supplémentaire est introduit dans ce concept : le temps que prennent ces variations.

Une paroi de cavité est une interface entre la masse rocheuse, où interviennent les processus qui règnent dans le réseau microfissural, et la cavité, en liaison directe avec l'extérieur par les grandes ouvertures et le réseau macrofissural. C'est donc de l'équilibre des échanges au niveau de cette interface que dépend la propriété conservatoire du milieu souterrain.

S'il existe un équilibre de part et d'autre de l'interface, c'est à dire que les variations observées sont stationnaires, le temps n'intervient plus. Si un déséquilibre apparaît, se créent des excédents d'énergie qui engendrent des mécanismes de dissipation et modifient les conditions initiales. Sans que l'on sache encore exactement quelles sont les relations entre ces mécanismes de dissipation d'énergie et les phénomènes de dégradation proprement dits, on sait que cet état de déséquilibre conduit à des phénomènes d'altération.

### Modélisation des cavités comme échangeurs

En pénétrant sous terre, l'homme apporte une perturbation déstabilisante pour le milieu, constituée de vapeur d'eau, même si c'est en quantité négligeable, de CO<sub>2</sub> (environ 60g par heure et par personne) dont le taux reste faible par rapport à la production du réseau microfissural (plusieurs tonnes par jour dans l'aven d'Orgnac) et de chaleur (55 kcal en moyenne par heure et par personne).

Autre facteur de déséquilibre pour les grottes touristiques, l'éclairage, dont l'impact dépend de l'aménagement de chaque grotte : dans le cas de Gargas (Hautes-Pyrénées), l'éclairage équivalait, pour chaque visite, à seize visiteurs supplémentaires.

Cet apport de chaleur engendre, du point de vue thermodynamique, un échange entre l'air de la cavité et la masse rocheuse, à condition bien sûr que la température de cette dernière soit inférieure à celle de l'air, cas le plus fréquent. Il est en effet nécessaire, pour que l'énergie thermique, apportée par l'homme et par l'éclairage de la grotte, soit dissipée dans la masse rocheuse, que cette dernière soit plus froide, puisque les échanges ne s'effectuent que dans le sens du plus chaud vers le plus froid. Des calculs effectués dans plusieurs cavités montrent que cet échange est à haut rendement (de l'ordre de 94 à 100%). Le reste de la chaleur est évacué à l'extérieur par convection.

Lorsque la paroi rocheuse n'a plus le temps d'absorber la chaleur produite et que l'excès d'énergie ne peut plus être évacué par convection, interviennent alors des modifications de phases dans l'air de la galerie, correspondant à une évaporation qui permet de réguler la température par refroidissement. Conjointement, cette augmentation d'humidité provoque de la condensation sur la paroi. La température de celle-ci augmente alors, diminuant les possibilités d'échange. Une fois installé, le déséquilibre ne fait que s'accroître.

Un autre type d'instabilité peut survenir, lié aux régimes aérodynamiques. L'écoulement de l'air en grottes est turbulent, mais ces mouvements perpétuels sont stables dans le temps : il s'agit d'une turbulence stationnaire. Lorsque l'on perturbe cet écoulement, des discontinuités surviennent, très structurées, de type tourbillon, qui dissipent de l'énergie (ce sont aussi les « trous d'air » connus des passagers aériens). Si les connaissances quant à la nature des liens exacts entre ces phénomènes et l'ensemble des dissipations d'énergie sont encore incertaines, on constate qu'ils modifient profondément les caractéristiques de l'échangeur et son efficacité. Ces instabilités sont donc génératrices de dégradations, or le régime d'écoulement de l'air est surtout modifié, dans les aménagements, par les changements de géométrie des ouvertures, par les dégagements ou les colmatages.

## La déstabilisation du milieu souterrain

Les critères choisis et les méthodes employées pour mettre en évidence une déstabilisation du milieu souterrain sont différents selon qu'il s'agit d'instabilité d'ordre énergétique ou aérodynamique.

### Instabilité énergétique

On dit qu'il y a instabilité énergétique lorsque le changement de phases dans les mécanismes de dissipation d'énergie n'est plus stationnaire. Pour mettre en évidence ces instabilités, on peut recourir à plusieurs méthodes.

La première utilise l'humidité : lors de changement de phases, le degré hygrométrique varie avec la température, puisque des phénomènes d'évaporation ou de condensation apparaissent alors. Si l'on enregistre l'évolution de l'humidité dans le temps, la signature des visites sur les chroniques est la marque de la déstabilisation. En effet, comme l'homme apporte de la chaleur, mais ne modifie quasiment pas la teneur en eau de l'air, l'humidité doit rester constante. Ce n'est que si la dissipation de chaleur ne peut plus se faire qu'il y a évaporation ou condensation.

Une deuxième méthode passe par la modélisation de l'impact des visites sur la température. Quand la dissipation s'effectue uniquement par échanges, la relation entre les deux termes est linéaire, ce qui n'est plus le cas lorsqu'il y a un changement de phases. La méthode consiste donc à réaliser une modélisation de type linéaire et à comparer le résultat obtenu avec les chroniques réelles. Si les tendances définies par les résultats du modèle et par ceux de la réalité, sur une évolution à long terme, divergent, c'est qu'il y a non-linéarité, et donc apparition d'instabilité.

La troisième prend en compte l'impact thermique des visites sur différentes échelles temporelles. Un apport de chaleur, à un moment donné, provoque une augmentation brutale de température qui se dissipe progressivement dans le temps. On observe une variation thermique à court terme, sans effet à long terme. Lors d'une déstabilisation (évaporation ou condensation) une deuxième variation thermique apparaît, engendrée par la première, avec cette fois, un effet à long terme. Aussi, en comparant les impacts d'une visite, à court et à long terme il est possible de déceler une déstabilisation.

### Instabilité aérodynamique

La mise en évidence d'une telle instabilité s'effectue par la reconnaissance du type de régime turbulent observé dans l'air.

Schématiquement, pour ce type de régime, deux cas de figures peuvent être observés. Premièrement, bien que les mouvements d'air soient désordonnés (définition même de la turbulence), ils conservent dans le temps les mêmes caractéristiques. L'ensemble est stable et la turbulence est dite stationnaire.

Deuxièmement, les mouvements deviennent instables et localement apparaissent des dépressions ou des surpressions.

Des études effectuées en soufflerie permettent de distinguer ces deux régimes. En régime stationnaire, on a affaire à un modèle simple, alors qu'avec les instabilités apparaît un autre modèle étudié en 1941 par Kolmogorov (qui lui a d'ailleurs donné son nom). Pour les deux modèles le spectre d'énergie de la ventilation, représenté graphiquement en coordonnées logarithmes, montre des droites avec une pente inférieure à  $-1$  si le régime est stationnaire, et une pente de  $-5/3$  (soit  $-1.666$ ) pour le modèle de Kolmogorov. La méthode utilisée consiste à approcher le spectre d'énergie de la ventilation en mesurant la variation de la vitesse de l'air.

## La dégradation biologique

Le spectre de la lumière utilisée (lumière chaude) permet à certaines plantes (mousses, algues...) de se développer sur des supports (roche ou concrétion) qu'elles détruisent au cours de leur croissance. L'emploi d'une lumière mieux adaptée, les temps d'utilisations de ces lumières, le traitement des parois avec des solutions chlorées permettent d'endiguer ce type d'altération. L'observation a démontré l'action nocive de la matière organique. Malheureusement, à l'heure actuelle, les études réalisées sont encore insuffisantes pour déterminer exactement en quoi ces actions consistent. On sait en effet que la matière organique, jointe à une action microbiologique, transforme notablement le calcaire : c'est le phénomène de complexation. Il en résulte une remobilisation de la calcite ou de l'aragonite, sous forme d'une cristallisation en baguette (la lublinite) qui donne naissance à un produit mou et hydraté : le mondmilch. Dans une phase postérieure, le mondmilch sèche et se transforme en poussière, altérant concrétions et parois sur plusieurs centimètres.

En l'absence de connaissances plus précises sur les mécanismes de cette modification biochimique, la prudence recommande d'éviter d'introduire artificiellement tout apport de matière organique sous terre.

## Une protection réglementée

En fonction du type de patrimoine qu'elle contient, une grotte peut-être protégée par l'une des quatre lois suivantes :

- 1) La loi du 31 décembre 1913, relative à la protection des monuments historiques, englobe l'ensemble du domaine préhistorique et historique. C'est à ce titre que sont protégées des cavités comme Lascaux, Niaux, etc. Cette loi permet aussi de protéger les mines anciennes, très nombreuses sur le territoire français, dont certaines remontent à 200 ans avant notre ère, voire plus (300 ans av J.-C. pour une mine gallo-romaine du sud de la France qui contient de très belles concrétions d'aragonite bleue). Cette loi soumet encore tous les travaux concernant les vestiges archéologiques à une autorisation du ministère de la Culture.
- 2) Les articles L. 341-1 et suivants du code de l'environnement (ancienne loi du 2 mai 1930), relatifs à la protection des monuments naturels et des sites, permettent de protéger les paysages souterrains d'intérêt national, qu'il s'agisse de concrétions ou de galeries présentant une morphologie exemplaire d'Esparros (Hautes-Pyrénées), l'aven d'Orgnac (Ardèche), l'aven Armand (Lozère)...
- 3) La loi du 27 septembre 1941, concernant les fouilles archéologiques, protège dès leur découverte, tous les sites contenant des vestiges archéologiques. Cette loi précise en effet que « nul ne peut effectuer sur un terrain lui appartenant, ou appartenant à autrui, un sondage ou des fouilles pouvant intéresser (...) ». Le mot « pouvant », difficile à interpréter en raison de ses multiples acceptations, a été précisé par la jurisprudence.
  - a) La loi relative aux fouilles archéologiques s'applique à l'ensemble des sites contenant des vestiges paléontologiques, en l'absence totale des vestiges d'occupation humaine, du moment qu'il s'agit de sites contemporains de l'apparition de l'homme sur terre. A ce titre sont pris en compte tous les sites paléontologiques d'âge quaternaire. (Les exemples de jurisprudence sont nombreux, le premier étant celui de l'affaire du pillage d'ossements d'ours des cavernes, dans une grotte de l'Ariège).
  - b) Cette même loi s'applique à l'ensemble des vestiges miniers anciens : à toutes les mines et leurs haldes (matériaux sortis de la mine et entreposés à l'extérieur), ainsi qu'à l'ensemble des bâtiments contemporains de l'exploitation, dès l'instant où le propriétaire renonce à la concession.

Ce texte a été complété par la loi relative à la protection des collections publiques contre les actes de malveillance (15 juillet 1980) qui interdit de détruire des terrains contenant des vestiges archéologiques sans avoir préalablement fait des fouilles nécessaires et obtenues les autorisations correspondantes.

- 4) La loi du 10 juillet 1976, relative à la protection de la nature, permet la création de réserves naturelles (articles L. 332-1 et suivants du code de l'environnement) et l'établissement d'arrêtés préfectoraux de protection de biotopes. Elle permet entre autres de prendre en compte l'intérêt minéralogique, géomorphologique, biologique d'une cavité. Elle prévoit la gestion d'une réserve naturelle avec des moyens financiers qui lui sont propres et un comité de gestion constitué de l'ensemble des acteurs concernés (propriétaires, élus, administrations et associations). Sur ces cent trente-trois réserves naturelles en France, trois concernent directement le milieu souterrain : l'une d'elles protège des minéraux, les deux autres des chauves souris.

Une procédure simplifiée permet à un propriétaire de demander la protection de son patrimoine au titre de réserve naturelle volontaire. Il en existe cent cinquante à ce jour en France ; une trentaine concernent le patrimoine souterrain (minéralogie et biologie).

Actuellement, deux cent cinquante cavités sont protégées au titre des monuments historiques, des sites, ou au titre de la protection de la nature, alors que la loi sur les fouilles archéologiques s'applique de façon générale à tous les sites déjà découverts, qu'ils soient souterrains ou non.

## **Gestion et classification des grottes**

En France, on estime à environ cent mille le nombre de cavités connues. Ce chiffre ne peut être qu'approximatif, bien sûr, car il est souvent difficile de connaître les critères choisis pour chaque inventaire local ou départemental : où s'arrête un abri sous roche et où commence une grotte ? Faut-il prendre en compte toutes les entrées d'une même cavité ? Par exemple, le réseau Félix Trombe, dans le massif d'Arbas, au sud de la Haute-Garonne, dispose de trente-six entrées actuellement connues, mettant en communication plus de 100 km de galeries et de puits sur une dénivellation totale de 1004m. S'agit-il d'une seule cavité disposant de trente-six entrées, ou de trente-six cavités reliées les unes aux autres ?

Il est important également, pour un classement, de remarquer la diversité des publics concernés par la visite d'une cavité, depuis les nombreux touristes qui se rendent sous terre l'espace d'une heure, les maisons de jeunes, les colonies de vacances etc., les chercheurs de diverses disciplines scientifiques (archéologues, paléontologues, géologues, climatologues, géochimistes, minéralogistes...) jusqu'aux spéléologues qui y restent parfois plusieurs jours lors d'expéditions difficiles.

La grande majorité des cavités cependant est parcourue dans un esprit sportif pendant que les grottes touristiques représentent une centaine de sites fréquentés par cinq à six millions de personnes. C'est pourquoi un type de gestion particulier doit être adopté, pour chaque cavité, en fonction de son intérêt patrimonial, de sa fragilité, de sa vulnérabilité et de sa destination. A partir de l'utilisation faite des grottes et en fonction du public de chacune d'entre elles, une classification peut être établie.

### **Cavités d'intérêt sportif**

Appartiennent à cette catégorie la plupart des cavités françaises actuellement connues ou à découvrir. Elles sont le domaine des spéléologues.

### **Cavités-loisirs**

Dans chaque département, il serait bon de disposer d'une liste de cavités ne présentant ni problème de sécurité, ni danger pour la conservation du patrimoine souterrain. L'ensemble des activités de découverte du milieu souterrain pourrait s'y faire, avec l'accord des propriétaires, des services de sécurité, etc.

## **Cavités touristiques**

Elles sont actuellement au nombre de cent six en France, sans compter les mines anciennes et les carrières souterraines. Ce type de cavités peut se diviser en deux sous-catégories : les grottes ayant fait l'objet d'études qui ont conduit à la mise en place de quotas de visiteurs – c'est les cas des grottes de Niaux (Ariège), Pech Merles (Lot), Esparros (Hautes-Pyrénées) – et celles qui, pour n'avoir encore jamais été étudiées, sont ouvertes à tous les visiteurs, quel qu'en soit le nombre.

## **Cavités protégées réglementairement**

Les cavités présentant un intérêt national peuvent être classées. Suivant le cas, et en fonction des caractéristiques de la grotte, des quotas de visiteurs leur sont parfois attribués.

Actuellement, une nouvelle orientation du ministère chargé de l'environnement tend à mettre en place une gestion adaptée à chaque nouvelle cavité classée. Chacune dispose maintenant d'un comité ou d'un conseil de gestion qui précisent le nombre de visites et le nombre d'accompagnateurs (souvent nommés par le Préfet). C'est actuellement la manière idéale de gérer une cavité.

## **Cavités références**

Une cinquantaine seulement de grottes françaises connues peuvent être considérées comme des références au niveau mondial, tant pour leur patrimoine archéologique que minéralogique (cela représente 1/100 des cavités). Si, sur un plan archéologique, le caractère exceptionnel est évident (Lascaux), il n'est pas encore bien admis que les cavités méritent aussi d'être référencées pour leurs décorations. Le choix se porte, dans ce cas, sur des grottes sur lesquelles le concrétionnement est de type très particulier, en quantité suffisante pour être retenu. La grotte de Choranche (Isère) est souvent citée comme modèle pour ses fistuleuses, la grotte des Demoiselles (Hérault) pour ses draperies, ses coulées, la grotte de la Clamouse (Hérault) pour la diversité de ses concrétions car elle regroupe, à elle seule, tous les grands types connus (disques, hélictites, draperies de calcite, aiguilles d'aragonite ...), la grotte du Grand Roc (Dordogne) pour ses concrétions excentriques ; les avens d'Ornac (Ardèche) et Armand (Lozère) sont également cités comme référence pour leurs stalagmites en piles d'assiettes.

D'autres cavités encore fermées au public offrent des sites remarquables d'aragonite bleue ou verte, des hélictites, des disques, des cristaux d'aragonites, de gypse.

## **Inscription au patrimoine de l'Unesco**

Certaines cavités françaises présentent un patrimoine de telle qualité qu'une reconnaissance internationale a pu être envisagée. Les cavités de la vallée de la Vézère (Dordogne) ont été inscrites au patrimoine de l'UNESCO au titre des biens culturels. Aux Etats-Unis, des cavités dont la très célèbre grotte de Lechuguilla, l'une des plus belles du monde, ainsi qu'en Slovénie les grottes de Skocjanske, ont été inscrites, pour leur part, au patrimoine mondial au titre du patrimoine naturel.

Plusieurs cavités françaises mériteraient d'être inscrites sur cette liste prestigieuse pour la qualité exceptionnelle de leurs cristallisations. L'un des deux grands sites mondiaux à aragonite verte est français. Les seules concrétions d'aragonite bleue disposées en aiguilles sont également françaises. Les deux plus grands sites de concrétions en piles d'assiettes sont aménagés en France pour le public, et certaines concrétions comme les champignons d'argile calcifiée, le verneur à pastis ou les cymbales sont actuellement uniques. C'est la raison pour laquelle il a été proposé d'inscrire au patrimoine de l'UNESCO une série de cavités, exceptionnelles pour leur concrétionnement.



# L'ESTHÉTIQUE DU PATRIMOINE SOUTERRAIN



L'approche de l'esthétique propre aux milieux souterrains reste un domaine jusqu'à présent peu abordé par la recherche ou les artistes.

C'est pourquoi l'aspect esthétique du bien proposé à l'inscription a fait l'objet d'un essai de François Marchand, architecte et membre de la commission supérieure des sites, perspectives et paysages.

Cet essai vise à apporter le contrepoint d'un regard artistique sur l'argumentaire développé dans le dossier par François Bourges, géologue.

Cette contribution constituera un premier élément de réflexion et de débat, qui sera présenté par l'auteur de ce texte dans le cadre du futur comité national du patrimoine souterrain.

# Les concrétions et l'esthétique des paysages souterrains

par François Marchand

La valeur paysagère du milieu souterrain repose, pour l'essentiel, sur ses composantes naturelles et minérales. La vie animale y est peu visible, les végétaux y sont rares voir inexistants.

Elle est aussi liée la présence du concrétionnement, que l'on qualifie souvent de " décoration des cavernes ".

Le particularisme de ces croissances minérales, protégées de l'agression des agents corrosifs de surface par la qualité conservatoire du milieu, établi la rareté et la spécificité des ces morphologies rencontrées sous terre.

Les relations complexes qui se sont tissées entre la matière et les formes de ces objets sont le plus souvent à l'origine de véritables émotions esthétiques voire même de curieux sentiments d'étrangeté ou de merveilleux.

Les dix-huit sites proposés ici constituent une véritable collection de concrétionnement et d'objets souterrains.

Ainsi constituée, elle représente la presque totalité des valeurs esthétiques actuellement recensées de l'univers environnemental karstique connu à ce jour.

La fréquentation de l'univers souterrain par les hommes est restée relativement rare, du fait des contraintes physiques propres au milieu, difficultés d'accès, obscurité, humidité.....

Pourtant il s'agit bien d'un milieu d'exception qui tient une place considérable dans l'imaginaire des civilisations. Beau, étrange ou effrayant, il ne laisse pas indifférent et reste pour l'homme, depuis la nuit des temps, un puissant stimulant de sa pensée.

*" Si le précurseur du classique se nomme antiquité, celui du baroque s'appelle préhistoire. Le rationalisme, l'étatisme, le cercle, le triangle, le contrepoint, la colonne, les procédés de l'esprit qui imite l'Esprit, tout ceci appartenait déjà certainement à la civilisation de la Grèce ou de Rome.*

*Mais le panthéisme, le dynamisme, l'ellipse, la fugue, l'arbre, l'esprit soumis aux lois de la nature, se retrouvent intégralement dans le monde primitif et préhistorique ".*

Eugenio d'Ors, *Du Baroque* (1930)

Les grottes et leurs concrétions constituent des paysages souterrains exclusivement minéraux. La valeur esthétique de ces sites et de leurs objets est souvent associée à l'extraordinaire et à l'étrange tant le développement de ces morphologies est allé à l'encontre de la simple raison ou même de l'intuition.

Les formes les plus complexes n'ont quelquefois d'équivalence que dans le monde du vivant.

Ces relations très élaborées entre matières minérales et univers organiques, sont très vraisemblablement à l'origine de nos plaisirs esthétiques les plus intenses.

*" Cette expérience de " l'âme secrète " de toutes les choses que nous voyons à l'œil nu, au microscope ou à la longue vue, je l'appelle le " regard intérieur ".*

*Ce regard transperce l'enveloppe dure, la " forme " extérieure pour atteindre l'intérieur, et nous permet de percevoir la " vie des choses " avec tous nos sens ".*

Vassili Kandinsky, in *Konkretion* (1935)

Ces sentiments " d'étrangeté " ou de " merveilleux " paraissent d'ailleurs trouver leur origine dans les conditions mêmes d'observation qu'imposent ces types d'espaces.

Dans ces milieux, le rapport entre " spectateur " et " paysage " est modifié la plupart du temps par les composantes particulières de ces environnements que sont la constitution assez anormale de l'atmosphère, la nature exclusivement minérale des lieux, et l'absence totale de lumière naturelle....

L'éclairage artificiel que tout observateur est obligé d'apporter, transforme aussitôt celui-ci en acteur principal de ses propres émotions. Il se révèle à lui-même la forme des objets.

Il produit lui-même son propre paysage, s'offrant ainsi, en parfaite intimité, un rapport unique et personnel avec l'environnement.

Une autre source de ce " merveilleux " provient sans doute également de ce que les processus physico-chimiques qui modèlent les paysages souterrains n'ont, en apparence du moins, aucune manifestation facilement décelable en extérieur.

Les phénomènes qui participent à l'émergence des concrétions mobilisent de fait, si peu d'énergie, qu'à l'air libre ils sont supplantés par d'autres agents beaucoup plus actifs.

Le monde souterrain est donc l'univers privilégié des morphologies de dissolution, des proliférations de concrétions, des émergences et des épanouissements de cristaux...

A la surface, c'est l'érosion qui façonne le paysage.

La forme même des concrétions est aussi à l'origine de nos émotions esthétiques les plus intenses.

Ici, l'expression claire des pures symétries qui sont intervenues dans la formation a conduit à des équilibres plastiques remarquables.

Là, les phénomènes de gravité se sont manifestés dans l'impeccable verticalité des colonnes, des stalactites, des stalagmites...

Là encore, les terminaisons cristallines, géométriquement parfaites, expriment désormais dans leurs moindres détails, toutes les symétries internes du réseau cristallin.

Là toujours, sont présentes les croissances horizontales, qui témoignent de plans d'eaux, fossiles, aujourd'hui disparus.

Mais aussi, dans ces mêmes espaces, la classique stabilité des structures horizontales et verticales, peut s'effacer.

Echappant au " bon sens " et à la traditionnelle intuition, les formes deviennent alors légères, mobiles, quasi aériennes...

Place aux excentriques, à leur croissance en toutes directions, sans logique apparente, place aux colonnes, aux stalactites, aux stalagmites chantournées, contraints par des reprises latérales ou par de multiples coalescences.

Place aux morphologies fractales des cristaux branchus et à certaines concrétions dont l'invariance d'échelle rend improbable l'appréhension directe des dimensions de leurs propres cristaux.

*" Dans le domaine artistique les structures classiques adoptent de préférence les dispositions qu'on appelle contrepoints.*

*Elles constituent un système fermé, qui gravite autour du noyau situé à l'intérieur; tandis que les structures baroques affectionnent la forme de fugue, un système ouvert qui marque une impulsion vers un point extérieur. C'est toujours le symbole d'opposition habituelle entre les formes qui pèsent, et les formes qui volent "*

Eugenio d'Ors, Du Baroque (1930)

Place alors, aux extraordinaires manifestations naturelles qui interrogent, sollicitent l'imaginaire et conduisent quelquefois " l'inventeur " des lieux à trouver, par simple analogie morphologique et sans doute aussi pour en " apprivoiser " les excès, une pomme de pin à l'Aven d'Orgnac, des champignons à Lauzinas, des cymbales au TM71, un bec verseur de pastis à Cabrespine...

Alors que l'adaptation des organismes vivants à l'obscurité se matérialise la plupart du temps par une perte de la pigmentation, il est très fréquent de découvrir dans ces milieux souterrains des univers généreusement colorés.

*" On ne sait à qui appartient la couleur. A la Terre, à Mars, à Vénus, au Soleil, à la Lune? Sans couleur le monde n'est-il pas impossible? Sans cette couleur c'est l'ennui, l'uniformité, le froid.*

*C'est le dépouillement et la cécité! "*

Lettre de Kasimir Malévitch à Matiouchine (1916)

Remarquable par leurs nuances, les palettes s'expriment alors dans toutes les couleurs du spectre.

Du noir aux rouges sombres, des orangés aux jaunes vifs, des jaunes soufrés au blanc pur. Dans la grotte de l'Asperge certains cristaux d'aragonite éclatent en bleus exceptionnellement sonores. Dans l'Aven du Mont Marcoux, cette même aragonite s'expose dans toutes les nuances de vert.

Assez rarement toutefois les concrétions conservent les simples transparences des composés chimiques qui les ont constitués.

Mais dans ce cas alors, elles explosent en matières subtiles, en riches textures de cristaux décorant à l'envie drapés, colonnes, ellipses et autres volutes...

Sèche, cette géométrie accroche particulièrement bien la lumière, la fractionnant, la multipliant, faisant briller de " mille feux " les masses imposantes de toutes ces concrétions.

La combinaison entre les supports rocheux, l'eau et le concrétionnement intervient souvent de manière déterminante dans la composition générale des paysages et des micro paysages souterrains.

Les parois rocheuses, dont les structures internes, les litages, les fractures, les accumulations de fossiles ont été décapés et corrodés par les éléments naturels, jouent ainsi en contraste avec le concrétionnement, mettant en valeur les richesses de sa texture chatoyante.

Souvent présente, l'eau ajoute à l'esthétique générale du milieu.

Par le positionnement même des objets, qu'elle immerge ou qu'elle laisse flotter à sa surface, par la mobilité de ses reflets, par la sonorité de fête, de ses jaillissements en cascades, par la musicalité discrète de ses fines gouttelettes qui perlent à l'extrémité des fistules ou des aiguilles de calcites et d'aragonites.

Cette eau qui témoigne toujours, dans ses multiples effets, de la permanence de ses relations originelles avec le milieu. Cette eau qui continue tout simplement à le faire évoluer, à le rendre " presque vivant ", comme ont coutume de dire les spéléologues.

Voici donc, très brièvement esquissés, quelques aspects des phénomènes complexes qui s'installent en général lors de la découverte de ces univers et paysages souterrains.

Peut-être, d'ailleurs, n'est-il pas possible d'en préciser vraiment les contours exacts, tant ces rapports sont de nature essentiellement individuelle, tant ils paraissent aussi résister aux simples schémas habituels de nos classifications esthétiques.

Mieux vaut sans doute, pour l'instant, laisser conclure Kasimir Malévitch, qui écrivait en 1928 dans un article intitulé " formes, couleurs et sensations " :

*" La couleur et la forme ne mettent rien " en forme " mais ne font que tendre à exprimer la force secrète des sensations. Les hommes qui sont, au pouvoir de ses sensations, établissent ou changent leur propre conduite.....*

*La compréhension du monde est inaccessible à l'artiste. Il n'y a que la sensation du monde qui le soit.....*

*L'essence de l'art, est le lien qui relie l'artiste au monde au travers de ses propres sensations. La peinture n'a pas de forme car la " forme reproduite " n'est pas la forme, mais une simple expression de sensations picturales. "*



- Le Ministère de l'Ecologie et du Développement Durable présente ses remerciements tout particuliers à Alain Mangin, directeur de recherche au CNRS, responsable du laboratoire de Moulis, pour ses contributions essentielles au présent dossier.
- Rédaction du texte de la proposition : François Bourges (Géologie Environnement Conseil.)
- Maquette et impression : ALT 92

**Janvier 2006**

