

Jacques CHOPPY

POURQUOI SE CREUSENT LES GROTTES ?

Karstologia Mémoires n°16 - 2008

© Choppy, 182 rue de Vaugirard, 75015 Paris

Avertissement et remerciements

Jacques Choppy considérait cet ouvrage comme son testament spéléologique, l'aboutissement du travail de toute une vie consacrée à répondre à cette question : « Pourquoi se creusent les grottes ». Il y a travaillé jusqu'à son dernier jour. Dans ses dernières volontés, il a demandé à sa famille d'en assurer la publication.

Nous nous sommes efforcés de respecter cette volonté. Toutefois, malgré tout le soin apporté à respecter le manuscrit, il est certain que des erreurs ont pu être commises sans qu'elles puissent être imputées à l'auteur.

Nous tenons à remercier ici tous ceux qui nous ont aidés :

Monsieur le Professeur Nicod qui a écrit la préface.

Le Laboratoire Edytem de Chambéry qui a effectué la mise en page et le suivi technique de l'édition (mise en page : Christophe Chaix et André Paillet ; coordination éditoriale : Christophe Gauchon).

L'Association Française de Karstologie qui a accepté la publication de cet ouvrage dans le cadre des « Mémoires de Karstologia » et a en outre attribué une subvention en participation à l'édition.

Brigitte Choppy et ses enfants

SOMMAIRE

INTRODUCTION : RÔLE DES FACTEURS ET DE LEUR ÉVOLUTION DANS LE CREUSEMENT KARSTIQUE	9
--	---

1^{ère} partie : KARSTIFICATION INITIALE

À LA RECHERCHE DU PASSÉ	11
RÉSEAU DE FENTES	12
ZONE ÉPIDERMIQUE	13
CAVITÉS ÉPIDERMiques ET RÉSEAU DE CONDUITS	19
RÉSEAU MAILLÉ	20
RESUME DE LA PREMIÈRE PARTIE	21

2^{ème} partie : LES FACTEURS

ROLE DES FACTEURS	23
LA LITHOLOGIE	25
LES FACTEURS STRUCTURAUX.....	31
LE RELIEF.....	42
LE CLIMAT	47
LE FACTEUR KARST.....	55
RÉSUMÉ DE LA DEUXIÈME PARTIE	65

3^{ème} partie : CONJONCTIONS DE FACTEURS

LES FACTEURS SONT TOUJOURS CONJOINTS.....	67
CONTRAINTES DE CHEMINEMENT	68
CONJONCTIONS DE FACTEURS GÉOLOGIQUES	76
CONJONCTIONS DE FACTEURS GÉOLOGIQUES ET DU RELIEF	78
CONJONCTIONS DU RELIEF ET DU CLIMAT	80
CONJONCTIONS DU FACTEUR KARST AVEC D'AUTRES FACTEURS	81
RÉSUMÉ DE LA TROISIÈME PARTIE	88

4^{ème} partie : ÉVOLUTION

NOTION D'ÉVOLUTION.....	89
TECTONIQUE ACTIVE.....	90
MODIFICATIONS DU RELIEF	92
VARIATIONS CLIMATIQUES	95
VARIATIONS DU NIVEAU DE BASE	100
MODIFICATION DU FACTEUR KARST / EFFETS MÉCANIQUES.....	111
MODIFICATIONS DU FACTEUR KARST / EFFETS HYDRAULIQUES	124
MODIFICATION DU FACTEUR KARST / SÉDIMENTATION ET CREUSEMENT.....	134
ÉVOLUTIONS GLOBALES.....	136
LA DURÉE.....	136
RÉSUMÉ DE LA QUATRIÈME PARTIE	141

UNE AUTRE VISION.....	143
-----------------------	-----

BIBLIOGRAPHIE.....	147
TABLE DES TERMES KARSTIQUES	159
TABLE DES NOMS GEOGRAPHIQUES	165
DEFINITION DES TERMES KARSTIQUES	173
TABLES DES FIGURES	179

Bibliographie de Jacques Choppy .	187
-----------------------------------	-----

Préface

Au fait « pourquoi se creusent les grottes » ? C'est une question simple, que se posent bien des spéléologues et des touristes, et aussi divers spécialistes, mais qui appelle des réponses complexes. Les karsts sont de types différents, les formes et les dimensions de leurs cavités sont multiples et leur genèse suppose tant de processus variés, interférents et souvent cumulés dans le temps... Et c'est dans ce dédale que Jacques Choppy nous entraîne et veut nous convaincre !

Cet ouvrage est d'abord l'œuvre d'un spéléologue. Il est parti de ses propres observations dans les très nombreuses grottes qu'il a explorées et visitées ; il s'est posé beaucoup de problèmes et a cherché des réponses adéquates.

C'est aussi l'œuvre d'un ingénieur et d'un praticien (co-organisateur de l'aménagement de la Clamouse). Par sa formation et son métier, bon connaisseur des principes de physique, il a pu maîtriser les problèmes d'hydraulique et de mécanique des roches, et présenter diverses solutions aux problèmes analysés et des formules appliquées à la mesure des processus...

C'est enfin l'œuvre d'un responsable de groupe, d'un animateur et d'un pédagogue. Dans le cadre du Spéléo-Club de Paris, l'organisation régulière des « Rencontres d'Octobre » lui a permis d'établir les échanges scientifiques entre spéléologues de formation et d'orientation diverses. Son dernier ouvrage est en quelque sorte le condensé de la série des fascicules publiés par lui au cours des ans.

Certes il a bénéficié des observations et discussions - parfois animées - lors des multiples réunions et colloques auxquels il a participé : depuis les premières rencontres à la Commission des Phénomènes Karstiques, avec Paul Fénelon et Jean Corbel, à celles de l'A.F.K. (Association française de Karstologie), aux nombreuses réunions internationales, dont celles en Espagne, Pologne et Slovénie pour citer les dernières où nous avons été ensemble... De plus, sa seconde passion, celle de l'étude des gravures et peintures rupestres, l'a amené dans les grottes africaines.

L'ouvrage est construit suivant une logique rigoureuse, adéquate à la réponse à la question provocante : pourquoi ? plutôt que comment ? Il part de la karstification initiale, et face à la multiplicité des hypothèses, il démontre la nécessité d'un potentiel hydraulique. Les différents facteurs sont analysés séparément, puis leur conjonction dans la troisième partie. La dernière, consacrée à l'évolution des systèmes, avec la multiplicité des cas étudiés est évidemment la plus copieuse. On ne peut qu'approuver l'Auteur sur le rôle des facteurs tectoniques et/ou géographiques, déterminant le potentiel hydraulique, l'étagement des réseaux, les captures souterraines, la longue durée d'évolution du karst.

Les démonstrations s'appuient sur un grand nombre d'exemples, grottes bien connues ou nouvellement explorées, formes karstiques de surface. Qu'il s'agisse des cas étudiés ou des concepts, l'Auteur fait référence à de nombreux ouvrages et articles, tant des grands Anciens que des jeunes chercheurs. Les raisonnements sont présentés de manière à ce que des non-spécialistes, « les spéléos de base » puissent les comprendre. L'ensemble est de lecture facile grâce à la multiplicité des figures ; une table des termes permet à chacun de s'y retrouver, ce qui est fort utile, car l'ouvrage fait nécessairement appel à des concepts variés et à un vocabulaire technique pluridisciplinaire.

L'expression est souvent vigoureuse, rejetant certaines définitions et diverses hypothèses. Peut-être parfois, J. Choppy se laisse entraîner à des conclusions péremptoires. C'était un trait de son caractère, il aimait être à l'occasion quelque peu provocant... Mais après tout, les progrès de la recherche ne résultent-ils pas souvent de la confrontation des points de vue ? On aurait aimé rediscuter avec lui de certaines affirmations trop vigoureuses, ou de quelques concepts géomorphologiques mal explicités. Hélas, ce n'est plus possible : cet ouvrage à peine achevé, l'explorateur des grottes ornées africaines nous a brutalement quittés. Nous devons tous être reconnaissants à Madame Brigitte Choppy et ses enfants d'avoir effectué la tâche ingrate de l'ultime mise au point. Grâce à eux, ce livre sera une initiation et une incitation à la découverte spéléologique pour les jeunes, un outil de travail et une base de données pour les chercheurs, mais aussi un précieux souvenir pour tous ceux qui ont connu et apprécié son auteur.

Jean NICOD

Président d'honneur de l'Association française de Karstologie

Professeur honoraire de géographie à la Faculté d'Aix en Provence

A Brigitte, ma femme, qui a contribué à cet ouvrage de toutes sortes de manières, et tout particulièrement par son esprit d'observation.

A ceux qui nous apprennent le karst, spéléologues et jeunes chercheurs.

« Conduire par ordre mes pensées, en commençant par les objets les plus simples et les plus aisés à connaître, pour monter peu à peu, comme par degrés, jusqu'à la connaissance des plus composés »

Descartes 1637, Discours de la méthode

«Dieu a décidé que soient abaissées toute haute montagne et les collines éternelles, et comblées les vallées pour aplanir la terre, pour qu'Israël chemine en sécurité sous la gloire de Dieu»

Livre de Baruch 5/7

«Tu poses la terre sur ses bases, inébranlable pour les siècles des siècles De l'abîme tu la couvres comme d'un vêtement, sur les montagnes où se tenaient les eaux»

Psaume 103, 5-6

INTRODUCTION

RÔLE DES FACTEURS ET DE LEUR ÉVOLUTION DANS LE CREUSEMENT KARSTIQUE

«...On met fin aux ténèbres, on fouille jusqu'à l'extrême limite la pierre obscure et sombre»

Job 28,3

Beaucoup de phénomènes relevant des sciences de la terre, en particulier ceux du karst ⁽¹⁾, peuvent être analysés à plusieurs niveaux :

- Soit on considère **une forme**. Un karst est un ensemble de formes ; l'extrême diversité de celles-ci suppose une grande variété de genèses et d'évolutions. Les formes de creusement sont essentiellement des vides, aussi bien dans le karst profond (les cavités souterraines) que dans le karst superficiel (dolines, lapiaz, etc.) : figure 1.1.

- Soit on s'intéresse aux processus qui créent les formes. Ces **processus** peuvent être hydrauliques, physico-chimiques, mécaniques, climatiques, biologiques ; ils sont d'ordinaire tous présents dans le karst, mais la plupart ne lui sont pas spécifiques. Ils ont été bien étudiés.

- Des **facteurs** géologiques et géographiques sont susceptibles de mobiliser ou d'inhiber les processus, déterminant en nature, en puissance et en localisation, ceux qui interviennent. Un

principe, implicite dans un grand nombre de travaux géomorphologiques, est qu'une forme résulte de l'action d'un facteur si deux conditions sont remplies : 1) la forme est explicable par l'intervention du facteur ; 2) elle ne peut être expliquée par l'action d'un autre facteur. Les facteurs diffèrent d'une région karstique à une autre, voire au sein d'un même système karstique, éventuellement avec un effet d'échelle.

- Soit une **conjonction de facteurs** apparaît indispensable pour comprendre processus et formes.

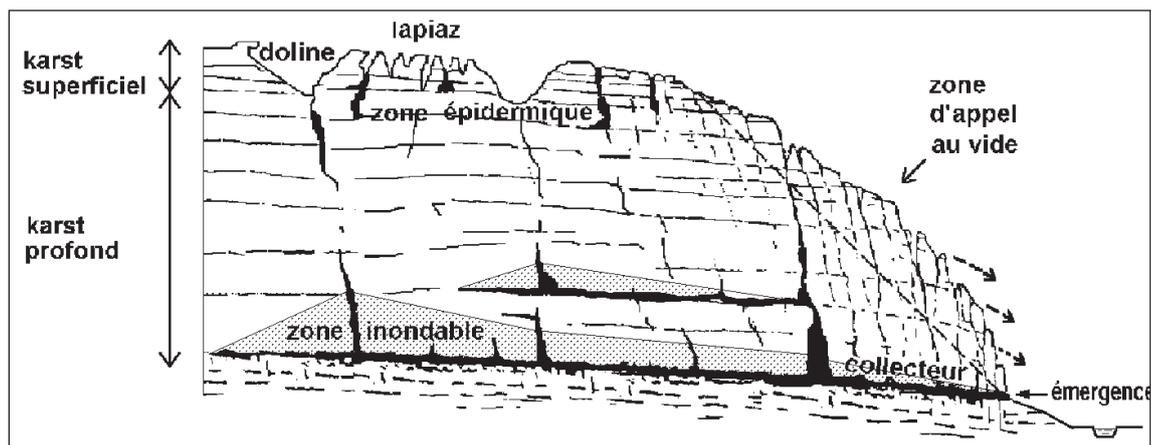
- Soit enfin un changement du ou des facteurs intervenants a provoqué la mobilisation d'autres processus, donc une **évolution**.

Nous ignorons le plus souvent quels facteurs sont intervenus lors de la karstification initiale ; celle-ci étant le début d'une évolution, c'est pourtant un point de départ incontournable.

L'objectif initial de la recherche karstique est d'expliquer les formes ; l'action des processus explique « comment » celles-ci se constituent. Mais l'objet de ce livre n'est pas de revenir sur les formes et les processus, sauf pour quelques-uns, mal connus ou méconnus. Aller au-delà, c'est s'interroger sur le « **pourquoi** » de la formation des grottes et des formes karstiques superficielles (WALTHAM 1971).

⁽¹⁾ Pour tenir compte de la diversité de mes lecteurs éventuels, une table alphabétique à la fin de l'ouvrage donne la définition des termes et expressions karstiques d'usage courant et des dénominations régionales qui sont utilisées dans le texte. D'autres termes plus rares, voire nouveaux, sont en gras et définis dans le texte, puis repérés dans la même table alphabétique.

Fig. 1.1 (à partir d'une figure de THÉROND 1998 ⁽²⁾) : Coupe schématique d'un karst. Les cavités souterraines sont représentées en noir. La zone inondable des conduits est en gris ; la limite de la zone d'appel au vide est représentée par un trait tireté.
Les diverses notions illustrées par cette figure seront rencontrées plus loin.



De nombreux auteurs ont invoqué des facteurs ou des évolutions afin d'expliquer la genèse des formes qu'ils observaient ; donc en remontant des effets vers les causes. À l'inverse, il s'agit ici de partir des causes pour chercher quels effets on peut en attendre. Préalablement, dans une longue enquête analytique, les observations de terrain et celles fournies par la littérature ont été regroupées, afin de classer les formes et les phénomènes karstiques selon les facteurs et les évolutions qui semblent en être responsables, puis en procédant à des synthèses partielles. Furent inclus quantité de faits et d'idées peu diffusés, oubliés, parfois seulement repérables dans le discours ou les images des auteurs, sans que ceux-ci les aient décelés. Je n'ai pas écarté quelques phénomènes apparemment exceptionnels, mais susceptibles de livrer la clef de fonctionnements qui, autrement, seraient inexplicables.

Dans ce défrichage ⁽³⁾ d'un domaine considérable, l'obstacle était souvent l'absence d'une information : on dispose du plan d'une cavité, mais pas de la coupe, ou bien on ignore quel est le pendage, etc. C'est pourquoi beaucoup d'exemples sont pris dans des régions où mes sources d'information se complétaient. Pour

⁽²⁾ Afin de les adapter au texte à illustrer, j'ai modifié certaines images publiées par des auteurs. Sauf mention contraire dans la légende, je n'ai rien ajouté qui puisse altérer l'information qu'elles contiennent).

⁽³⁾ Certains résultats en ont été exposés dans des publications antérieures ; afin d'alléger le texte, je cite seulement en bibliographie mes textes les plus directement utilisés.

autant, certaines interprétations données ici s'avéreront probablement caduques lorsque de nouvelles informations seront disponibles : j'ai déjà fait cette expérience.

Une synthèse est un redoutable outil de démolition, mettant en évidence des incompatibilités entre des faits et/ou des idées, parfois bien connus, mais qui ne furent jamais examinés ensemble. Parfois une information, une hypothèse nouvelle ou le retour au terrain conduit à reconsidérer de proche en proche tout un ensemble que l'on pouvait croire acquis.

Cette première synthèse sur le rôle des facteurs et de l'évolution a donc pour ambition de proposer un ensemble d'hypothèses cohérentes, fournissant une explication de l'ensemble des formes de creusement connues.

Partir des facteurs, de leur évolution, pour aboutir aux formes, est une démarche inhabituelle, puisqu'un classement hiérarchisé des formes est l'approche la plus fréquente. Ici, les formes semblent alors examinées « dans le désordre », d'autant qu'elles le sont à plusieurs niveaux lorsque leur élaboration se complique. Cela peut être déroutant. Le résumé placé à la fin de chaque grande partie en reprend les points principaux, notamment les plus nouveaux.

1^{ère} partie

KARSTIFICATION INITIALE

À LA RECHERCHE DU PASSÉ

La condition première du creusement des formes karstiques est une mise en solution de la roche. Celle-ci résulte surtout d'une attaque chimique (corrosion) dans le cas des roches carbonatées, mais la dissolution purement physique et des actions biochimiques y contribuent. Toutes les autres roches sont physiquement solubles dans l'eau ; et certaines d'entre elles peuvent être attaquées chimiquement ou bio-chimiquement ; or ces trois types de processus ne peuvent être distingués sans mesure spéciale, et le mot « **dissolution** » est d'ordinaire utilisé dans ce qui suit pour désigner l'ensemble. Même si elles sont les plus fréquentes, et les plus étudiées, réserver l'appellation de karst aux seules roches carbonatées ne se justifie guère.

Toutefois, selon leur résistance aux efforts mécaniques, c'est seulement dans certaines roches que des formes atteignent des dimensions notables par dissolution. Celle-ci se produit selon le trajet de l'eau, qui doit donc se renouveler : si un litre d'eau dissout 100 milligrammes de calcaire, 25 000 mètres cube d'eau doivent passer pour qu'un mètre cube de roche soit emporté. Alors que le processus fondamental du karst est la dissolution de la roche, il est en

pratique tributaire d'un autre processus : la circulation de l'eau.

Quand une roche susceptible d'être mise en solution affleure, en raison notamment du décapage d'une couche imperméable ou de la descente du niveau de la mer dans une zone littorale, la karstification peut débuter. Dans les massifs coralliens, cet affleurement est contemporain de la genèse de la roche. Et lorsque la roche affleurante présente une dénivellation, celle-ci peut être utilisée par une circulation souterraine. Nous ignorons le plus souvent quand cette dénivellation est apparue, et celle-ci a probablement varié au cours des âges, d'une manière que nous ne connaissons pas davantage.

Ces circulations et l'ensemble de formes qu'elles ont créé apparaissent presque partout comme l'organisation fondamentale du karst. Mais les témoignages de ce développement initial ont en grande partie disparu, gommés par des évolutions ultérieures. Si l'on veut comprendre cette « organisation fondamentale », on en est réduit à imaginer un modèle évolutif restant dans le cadre de processus plausibles et universels.

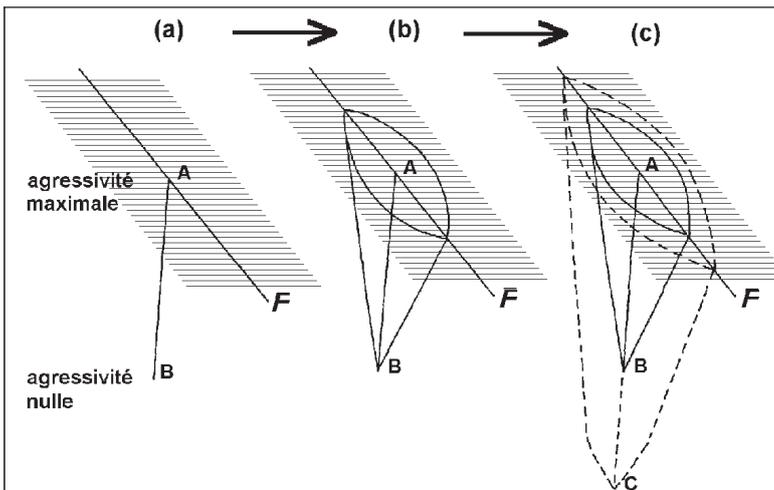
RÉSEAU DE FENTES

Dans le karst, diverses observations ont progressivement confirmé l'existence d'un « réseau de fentes », constitué de vides bien inférieurs à ceux pénétrables à l'homme. Ce réseau résulte en général de circulations d'eau qui élargissent des surfaces de discontinuité de la roche, interstrates ⁽⁴⁾ et fractures.

Au début de la karstification, 1.2(a), l'eau qui aborde le calcaire au point A d'une « fente » F en dissout les parois si elle peut y descendre, mais son agressivité a pratiquement disparu au bout d'un trajet AB de « quelques centimètres » (BÖGLI 1964). L'attaque du calcaire devrait décroître en même temps, créant un vide approximativement conique, comme sur la figure 1.2(b).

Fig. 1.2 :
Creusement initial hypothétique à partir de la surface de la roche (représentée hachurée), le long d'une fracture F ; représentation des stades successifs (grosses flèches noires) en 3D.

Plus bas, les vides sont pleins d'une eau saturée depuis longtemps : ils ne peuvent s'élargir. Et une **résistance hydraulique**, qui est fonction des caractéristiques géométriques des vides à parcourir (diamètre hydraulique, longueur et rugosité), limite le déplacement de l'eau. Dans des vides non élargis, cette résistance est considérable et l'eau ne se déplace que très lentement. Au creusement karstique s'oppose donc un premier paradoxe : le peu d'eau qui parvient à descendre ne creuse pas, et la dissolution ne crée que de minuscules formes superficielles, mais pas de grottes.



⁽⁴⁾ Une interstrate est la limite entre deux strates superposées, dont le dépôt fut séparé par un court intervalle de temps (c'est alors un joint de stratification), ou par une lacune de sédimentation plus longue ayant laissé le temps d'une érosion de la strate inférieure avant le dépôt de la suivante.

Pourtant le karst existe ! Et, comme c'est un phénomène général, il suppose des « mécanismes dont les conditions de fonctionnement sont toujours remplies, à la fois dans le temps et dans l'espace » (BAKALOWICZ 1977). Puisque le creusement progresse en profondeur, la dissolution doit se poursuivre plus bas ; pour cela, dans les roches carbonatées, deux processus seulement sont toujours présents « à la fois dans le temps et dans l'espace » :

a - Le CO₂, gaz lourd, tend à s'amasser vers le bas des vides karstiques. Certes, la loi des gaz parfaits prévoit qu'un mélange de gaz est homogène. Mais, dans un volume suffisant, comme celui d'un vide karstique, les échanges de chaleur et de matière entre l'air, l'eau et les parois créent constamment de nouveaux déséquilibres aboutissant à une **sédimentation du CO₂**. Au contact d'un air plus chargé de CO₂, l'eau peut en dissoudre et retrouver de l'agressivité.

b - Au contact de l'air, l'eau dissout de l'oxygène, qui est susceptible de contribuer à la **décomposition de matières organiques**, avec production de CO₂. Effectivement, dans un stade évolué, la teneur en oxygène de certaines eaux karstiques est anormalement faible : 1 milligramme d'oxygène par litre dans l'émergence du Timavo (Italie), moins de 5 milligrammes par litre en certains endroits de la Piuka Jama et de la Planinska Jama, en Slovénie, etc. L'existence d'actions biochimiques ne fait donc pas de doute, mais leur impact sur le creusement n'a pas été évalué. Dans la fente initiale élargie, des débris organiques vont venir se piéger et contribuer à l'agressivité de l'eau.

Le creusement peut alors se poursuivre au delà du point B, jusqu'au point C : figure 1.2(c). Le réseau de fentes résulte donc de la descente progressive d'une **nappe transitoire**, reposant sur la roche saine, qui est alors à peu près imperméable (MARTONNE 1926). Dans un premier temps, le battement de la nappe transitoire résulte de l'alternance des périodes de pluie et de sécheresse. Mais rien n'est encore résolu, car l'évacuation par le bas est infime, et du reste inopérante : en effet, si l'eau n'est plus en contact avec l'atmosphère, elle ne corrode et ne décompose les matières organiques qu'en fonction du CO₂ et de l'oxygène qu'elle transporte à l'état dissous (la décomposition de matière organique en conditions anaérobies est exceptionnelle dans le karst). Comment la

nappe transitoire peut-elle donc descendre ?

Pour cela, il faut attendre que des intercommunications s'établissent entre les fentes, permettant un drainage latéral vers des sorties d'eau ; l'eau peut alors se renouveler, et le creusement reprendre vers le bas. Comme les précipitations varient dans le temps et dans l'espace, et que les sorties d'eau sont multiples et variables, les circulations souterraines provoquent un élargissement plus ou moins généralisé des interstrates et fractures, qui aboutit au réseau de fentes.

Le battement de la nappe transitoire est désormais lié aux écarts entre son alimentation et l'évacuation de l'eau. L'agressivité de l'eau qui circule continue de se réduire vers le bas, où le réseau de fentes est moins ouvert : il n'absorbe qu'une faible partie des précipitations. Le creusement du réseau de fentes fut long. Ainsi, un réseau ramifié de vallées, maintenant sèches, eut le temps de s'établir à la surface sur le causse de Gramat (Lot - ROQUES 1956).

Quand la roche présente une perméabilité d'interstices, celle-ci participe au creusement du réseau de fentes, dont l'aspect peut être assez différent de celui que le nom suppose : dans le calcaire d'Étampes d'un site du département de l'Essonne, le « réseau de fentes » est constitué de poches anastomosées, résultant d'une dissolution différentielle. En particulier, une roche ayant deux composants, dont l'un nettement moins soluble que l'autre, est souvent assez perméable. À partir des surfaces de discontinuité, la dissolution peut progresser dans la masse, faisant disparaître les parties plus solubles. Il arrive que la résistance mécanique de la fraction peu soluble restante suffise pour que la roche ne s'effondre pas, et conserve à peu près son aspect initial ; cette **fantômisation** (VERGARI 1992) progresse selon une section en amande lorsqu'elle est axée sur une fracture sub-v verticale, comme dans la grotte de la Mansonnière (figure 1.8). Il est possible que l'altération de certaines parois de cavités, qui les rend malléables sur une épaisseur centimétrique, par exemple dans les grottes de Béchanka (Pyrénées-Atlantiques) ou de Limousis (Aude), soit assimilable à de la fantômisation.

Après une précipitation, une partie parfois importante de l'eau est provisoirement stockée dans le réseau de fentes (voir la figure 1.5) :

- Dans le réseau Bange - L'Eau morte (Savoie, et Haute-Savoie,) 14.106 mètres cubes transitent annuellement ; le stockage après une crue, qui peut atteindre 6 % de cette valeur, est 6 fois supérieur au volume débité durant une phase de tarissement (LEPILLER 1982).

- L'émergence la Milandrine (Jura suisse) débite 2.106 mètres cubes en total annuel, et le stockage représente environ 50 % de cette valeur (JEANNIN 1996). Une forte précipitation intervenant après une période de sécheresse alimente d'abord le re-stockage et provoque seulement une faible augmentation du débit de l'émergence.

Dans les vides irrégulièrement agrandis du réseau de fentes, la rétention par capillarité n'est pas homogène et le fonctionnement hydraulique n'est plus d'ordinaire celui d'une nappe phréatique. Mais les circulations ne se développent pas au hasard. Parmi les trajets joignant un point d'absorption et une émergence, il en est un dont la résistance hydraulique est la plus faible, comme on le montre dans la théorie mathématique des graphes. Parcouru plus rapidement, donc par un plus grand débit, ce trajet évolue plus vite, capture les autres, et devient un **chemin de drainage**. D'un point à un autre, le chemin pour lequel la résistance hydraulique est la plus faible est la ligne droite, puisque c'est le plus court. Les captures successives, qui permettent aux circulations de se rapprocher d'un chemin de drainage proche d'une ligne droite, tendent vers une situation stable. Ainsi débute une **structuration des circulations**.

À partir du réseau de fentes vont se développer des cavités plus amples, dont le creusement serait impossible sans ce préalable. Ces cavités confisqueront une partie des circulations, ce qui limitera le développement du réseau de fentes, et plutôt à des zones particulières.

ZONE ÉPIDERMIQUE

Dans toutes les roches, les forages et les travaux de géophysique montrent l'existence d'une zone altérée superficielle (*weathered zone*) ; son épaisseur est d'ordinaire décimétrique. Dans le réseau de fentes, on distingue une **zone épidermique** (MAIRE 1976 ⁽⁵⁾ - figure 1.1), de perméabilité relativement élevée ; car,

(⁵) Cet emploi est conforme à l'évolution sémantique du mot « épiderme ».

Fig. 1.3 (d'après le Bulletin du Spéléo-club de Touraine 1977) : Grotte de Roche Percée (Lot), exclusivement composée de cheminées en cloche jointives, codifiées P, dont l'ouverture en surface semble résulter d'un effondrement ; celles nommées P1, P2, P3, P4, à l'ouest forment une salle unique, avec un pilier résiduel restant au milieu (il porte des fractures résultant d'une compression).

sous une faible épaisseur de terrain, les roches sont peu comprimées, et l'agressivité de l'eau est maximum. Parmi les **cavités épidermiques**, certaines au moins, bénéficient de ces conditions favorables :

- Il existe des cavités d'aspect « ancien », situées peu profondément sous la surface et de telle manière que leur creusement ne semblerait pas « actuellement possible » ; elles se rencontrent dans le massif du Salève (Haute-Savoie - MARTINI 1964) ou celui du Vercors (grottes du Col de la Machine, Pabro, par exemple) ; ont-elles un jour fait partie d'un réseau de conduits ?

- Les spéléologues trouvent en altitude des gouffres nombreux, souvent de profondeur décimétrique, mais sans prolongement. Puisque des sédiments en occupent le fond, on peut se demander s'ils sont des témoins obstrués d'anciens réseaux de conduits, ou s'ils sont dépourvus de toute continuation pénétrable à l'homme.

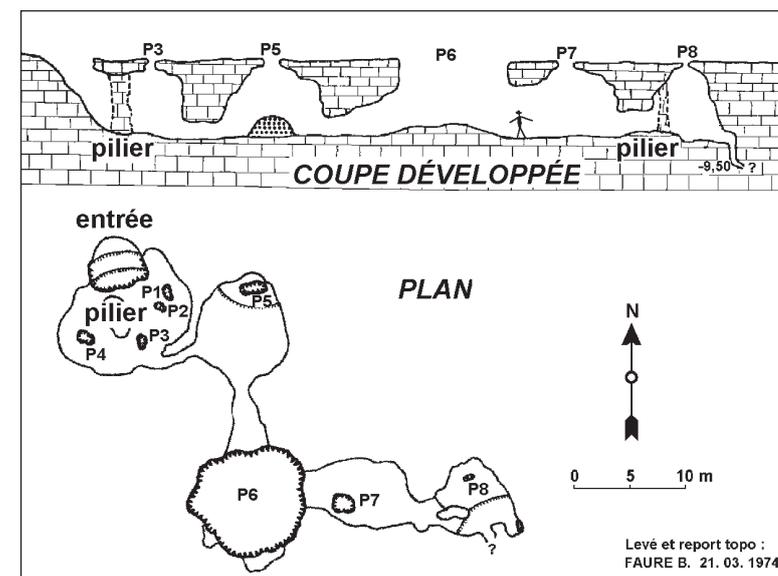
- Des **cavités [dites] cutanées** ⁽⁶⁾, à domi-

nante horizontale, n'ayant « aucun rapport avec le réseau karstique général » (CIRY 1959), se développent quelques mètres sous la surface du sol. Elles sont souvent mentionnées dans la littérature et leur existence ne peut guère faire de doute ; certaines sont vraisemblablement des exutoires latéraux de la nappe transitoire ayant continué de se développer, car recevant en crue de l'eau agressive grâce à la proximité de la surface.

- Il existe des cheminées en cloche qui sont observables seulement par le bas, dans la craie de Normandie (RODET 1992) ou dans une excavation artificielle (carrière souterraine de Savonnières-en-Perthois, Meuse - JAILLET 1995). Elles semblent résulter d'une infiltration diffuse au travers d'une couverture, la concentration des eaux se faisant à l'intérieur de la masse karstifiable. Une **pseudo-galerie** (MAUCCI 1952) est exclusivement composée de cheminées, d'ordinaire en cloche, proches de la surface, plus ou moins jointives, résultant d'arrivées d'eau modestes infiltrées souvent à partir d'une circulation de surface. La pseudo-galerie ne présente pas d'indice d'une circulation subhorizontale, mais le remplissage, à la base des cheminées, peut permettre de cheminer de l'une à l'autre, donnant l'illusion d'une galerie. Parfois les parois sont remarquablement lisses, comme dans la grotte de Roche Percée (figure 1.3). Par la prolongation du creusement, la torca de la Yusa (Espagne), atteint la profondeur de 209 mètres, toujours sans indice de circulation subhorizontale.

- De petites dépressions superficielles, drainant leur propre bassin versant, sont encore des vides épidermiques ; si l'on retirait leur remplissage, certaines seraient nommées gouffres !

Les cavités épidermiques résultent du drainage d'une faible surface. Certaines se développent latéralement, souvent avec une évacuation autonome. D'autres se développent vers le bas, où l'eau saturée est drainée par le réseau de fentes. La profondeur modeste de presque toutes ces cavités confirme la difficulté pour l'eau de descendre vers le bas ; mais elles ont pu se développer assez précocement, durant le creusement du réseau de fentes.



La cloche P6 est en partie effondrée.

⁽⁶⁾ Les cavités « cutanées » furent attribuées au creusement en conditions périglaciaires dans une couche superficielle de terrain, lors du dégel estival. Pendant celui-ci, la conductivité thermique du calcaire et la chaleur latente de fusion de la glace ne permettent d'escompter le dégel que d'un ou deux mètres de terrain durant quelques semaines par an. Comme la dynamique des réactions est réduite à basse température, le creusement de cavités « cutanées » aurait nécessité des conditions périglaciaires à peu près continues pendant probablement des centaines de milliers d'années ; dans les régions où la plupart de celles-ci ont été décrites, cela ne semble pas avoir existé.

RÉSEAU DE CONDUITS

Le réseau de conduits est composé de galeries, de puits et de salles, qui sont en partie pénétrables par l'homme ; on peut y distinguer des sous-ensembles qui sont en continuité car ils ont été creusés par une même circulation passée ou actuelle. Inversement une grande partie des grottes, des gouffres sont des éléments d'un réseau de conduits, même s'ils en sont maintenant déconnectés.

Mais les choses n'ont pas la simplicité supposée par cet exposé mille fois entendu : « En traversant l'atmosphère et le sol végétal, l'eau des précipitations dissout du CO₂ ; elle arrive agressive au contact du calcaire, en élargit les fentes ; certaines de ces fentes s'agrandissent jusqu'à devenir pénétrables à l'homme : ce sont les réseaux spéléologiques ».

D'abord, on l'a vu, le réseau de fentes est moins élargi vers le bas. Comment les circulations abondantes nécessaires pour creuser des conduits, partant de la surface, pourraient-elles franchir la partie inférieure, moins perméable, d'un massif karstique ? Et si cela était possible, l'eau étant moins agressive, les conduits devraient se rétrécir vers l'aval ; ils devraient aussi présenter de nombreuses confluences, alors que cela se présente plutôt dans des cas particuliers. En surface, les pertes devraient être un phénomène généralisé, ce qui n'est pas le cas. Un nouveau paradoxe semble ainsi s'opposer au creusement du réseau de conduits.

Donc un creusement en continuité des conduits, progressant du haut vers le bas, n'est pas crédible dans le cas général.

Il faut alors s'interroger sur le début du creusement des conduits : quand la largeur d'une surface de discontinuité de la roche dépasse environ 5 millimètres, une circulation qui la parcourt peut passer de laminaire à turbulente ; le brassage de l'eau accélère son renouvellement au contact des parois, et la mise en solution est multipliée par un facteur atteignant fréquemment 5 ou 10, parfois plus (DREYBRODT 1987). Il est probable que le réseau de fentes fut essentiellement creusé en écoulement laminaire, et qu'un passage au régime turbulent a provoqué le début du creusement des conduits (MÉGNIEN 1964). Or le régime turbulent suppose que la circulation trouve des vides en continuité et puisse s'évacuer, donc qu'elle

aboutisse à une émergence.

Dans ces conditions, le **creusement** des conduits débute et progresse nécessairement **à partir de l'aval** (RHOADES, SINACORI 1941), la gravité étant le moteur du déplacement de l'eau. La grotte de Font Anguillère (Dordogne) et une autre s'ouvrant sur la même vire que celle des Eaux-Chaudes (Pyrénées-Atlantiques), les galeries du Trou des Mongols (Ain), de plus en plus étroites vers l'amont, sont peut-être les rares témoins d'un début de creusement des conduits. Au Yucatan (Mexique), où les circulations sont pour la plupart « tributaires du niveau de base marin sous une faible charge hydraulique », les vides sont « de moins en moins transmissifs à mesure que l'on s'éloigne de la côte » (THOMAS 1999).

Mais ce creusement régressif constitue un nouveau paradoxe puisque à l'aval l'eau est déjà saturée. Le processus le plus efficace semble l'effet-piston mentionné ci-dessous, qui peut y provoquer un renouveau d'agressivité. De plus, lorsque l'amorce de conduit qui se creuse à l'aval est noyée, des condensations d'eau, des échanges de CO₂ entre l'air et l'eau se produisent dans l'air piégé et comprimé dans des zones hautes, qui majorent l'agressivité de l'eau (LISMONDE 2002).

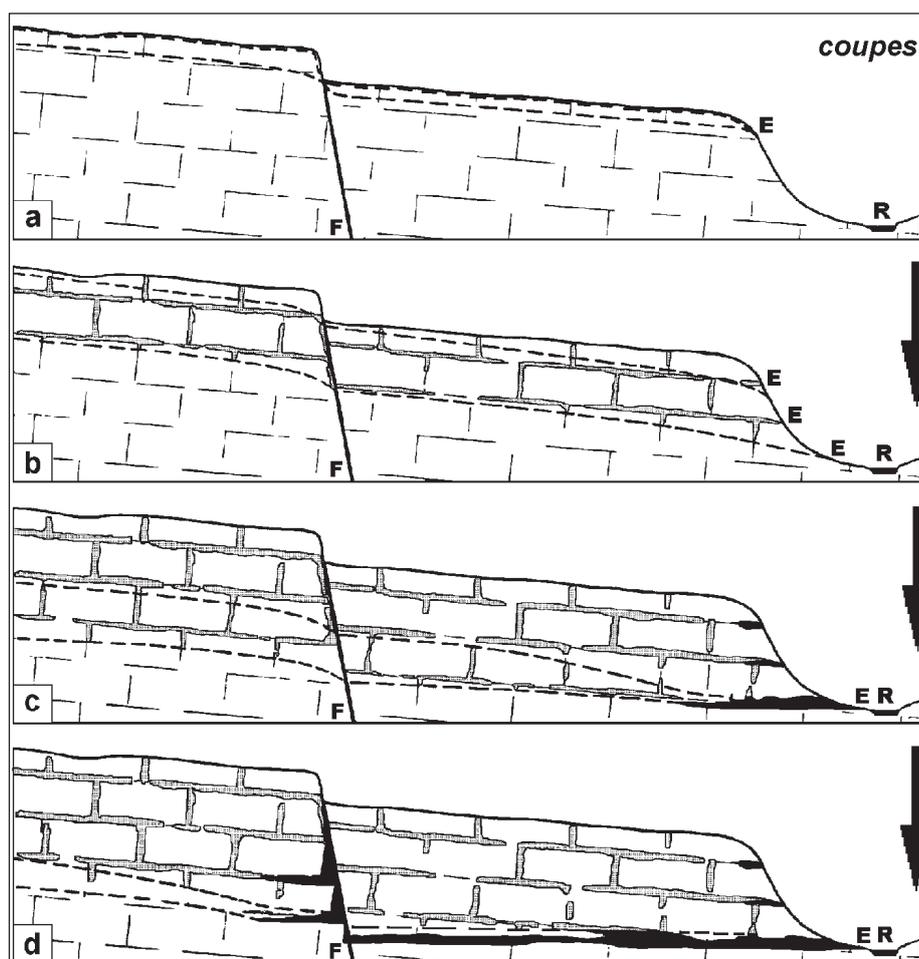
La figure 1.4 schématise le creusement progressif du réseau de fentes, puis du réseau de conduits.

a - Partant de la surface, le battement de la nappe transitoire n'atteint dans un premier temps qu'une faible profondeur ; certaines surfaces de discontinuité géologiques proches de la surface sont progressivement élargies ; il faut attendre que cet élargissement crée les intercommunications suffisantes pour qu'un drainage latéral s'organise, aboutissant à une émergence **E**.

b - Progressivement, le battement de la nappe transitoire s'amplifie, le drainage latéral se développe ; en période de pluie, l'eau sort à l'air libre par des émergences multiples. Actuellement, de tels exutoires, suspendus depuis longtemps, re-fonctionnent en temps de crue, déposant des traînées noires sur certaines falaises calcaires. Il peut aussi se déposer du tuf calcaire en cas d'orientation favorable (près du gisement archéologique de la Balme-de-Thuy (Haute-Savoie), mais plus habituellement sous

Fig. 1.4 : Dans un massif, hypothèse de stades de creusement successifs (voir le texte) du réseau de fentes (en gris, dimensions très exagérées), puis du réseau de conduits (en noir). E = émergence, R = rivière de surface, F = faille.

Le battement habituel de la nappe transitoire, puis celui dans le réseau de fentes est représenté par l'intervalle entre deux traits tiretés ; en forte crue il peut dépasser le trait supérieur. L'évolution simultanée du relief et le creusement dans la zone épidermique ne sont pas figurés.



climat chaud. L'élargissement du réseau de fentes est de plus en plus difficile vers le bas. Et aucune circulation en conduit ne se dessine (sauf peut-être dans la zone épidermique à partir des émergences suspendues).

c - Lorsque la nappe transitoire atteint le niveau de la rivière **R**, représentant le niveau de base, ou s'en rapproche beaucoup, son évacuation se concentre en basses eaux vers l'émergence la plus basse, proche de la rivière. Alors commence à se creuser l'amorce de conduit, qui va progressivement jouer un rôle de drain vers l'amont.

d - Dans son creusement régressif, l'amorce de conduit utilise les chemins de drainage définis ci-dessus, d'ordinaire en direction de l'alimentation la plus abondante. Lorsqu'elle atteint la zone épidermique, l'amorce de conduit reçoit directement les eaux agressives venant de la surface ; les crues la parcourent plus rapidement, la corrosion est plus homogène, donc aussi le creusement. Les confluences de conduits demeurent relativement rares, et le ré-

seau de fentes débite plutôt dans le conduit par des drains latéraux successifs. Une nouvelle structuration des circulations résulte du creusement des conduits.

Tout au début de leur creusement, la plupart des conduits fonctionnent le plus souvent en régime noyé. Puis leur section devient suffisante pour acheminer aisément les débits habituels ; ils ne sont pleins que lors des crues, et celles-ci envahissent alors seulement des **zones inondables** (voir les figures 1.1 et 4.50). Tout conduit actif, ou ensemble de tels conduits, possède une zone inondable, où se concentre son creusement. La hauteur de cette zone inondable est nettement plus ample que celle d'une rivière de surface puisque la crue ne peut s'étaler en largeur. Évacuant rapidement l'eau qu'il contient, un conduit a presque toujours un comportement inondable.

Que la plupart des gouffres semblent s'ouvrir en surface de manière aléatoire est un argument supplémentaire pour un creusement des conduits progressant à partir de l'aval.

RÉSEAU DE FENTES ET CONDUITS

Entre les vides karstiques de deux natures que sont les fentes et les conduits (y compris ceux des cavités épidermiques), on ne mentionne guère de formes de passage progressif ; mais nous les connaissons par des voies tellement différentes que beaucoup d'interactions demeurent du domaine de l'hypothèse.

La plus grande part des eaux pénétrant dans un karst s'infiltré via le réseau de fentes, éventuellement par l'intermédiaire de cavités épidermiques, et rejoint les conduits en profondeur. La pénétration directe des eaux superficielles par des pertes est d'ordinaire minoritaire ; mais presque toutes les eaux aboutissent à l'émergence en passant par un conduit.

Ainsi le réseau de fentes conserve un rôle hydraulique pendant toute la vie du karst. Les recherches d'eau par forage confirment l'existence d'une **double circulation** : dans les fentes, la circulation est plutôt verticale, et généralement lente ; dans les conduits, la circulation est rapide, à dominante horizontale. Dans un réseau de conduits, entre les infiltrations ou les pertes et l'émergence, la pente moyenne n'est pas considérable : elle peut excéder 25 % dans les réseaux de montagne ; ailleurs, elle est plus souvent inférieure à 10 %, et il n'est pas rare qu'elle ne soit que de quelques %.

Les différences de vitesse font que les variations de niveau sont beaucoup plus rapides dans les conduits que dans les fentes ; et les crues sont décalées. Aux contacts des deux systèmes, se produit une **alimentation mutuelle alternée** : le réseau de fentes débite dans les conduits en basses eaux, et c'est l'inverse au plus fort de la crue (figure 1.5). Ces échanges contribuent à l'élargissement des fentes à proximité des conduits.

La double circulation favorise probablement un creusement au sommet de la nappe transitoire. Toujours est-il qu'à la base de la grotte des Petites-Dales (Seine-Maritime - RODET 2003), dans la craie, existent de nombreux conduits de diamètre millimétriques qui, par captures successives, semblent avoir donné naissance au conduit actuel, de diamètre métrique.

Quand survient une pluie, l'eau s'infiltré sans difficulté dans les fissures les plus larges du réseau de fentes. Dans les plus étroites, la capillarité retarde la descente de l'eau jusqu'au moment où elles sont suffisamment pleines d'eau pour que la gravité devienne prépondérante. L'eau exerce alors un **effet-piston** sur l'air que ces fentes peuvent contenir, l'obligeant à descendre. Comme la composition de cet air est d'ordinaire, comme celle de la couverture de terre végétale, à haute teneur en CO₂, cet « **écoulement diphasique** » (ANDRIEUX 1983) apporte du CO₂ dans des conduits profonds.

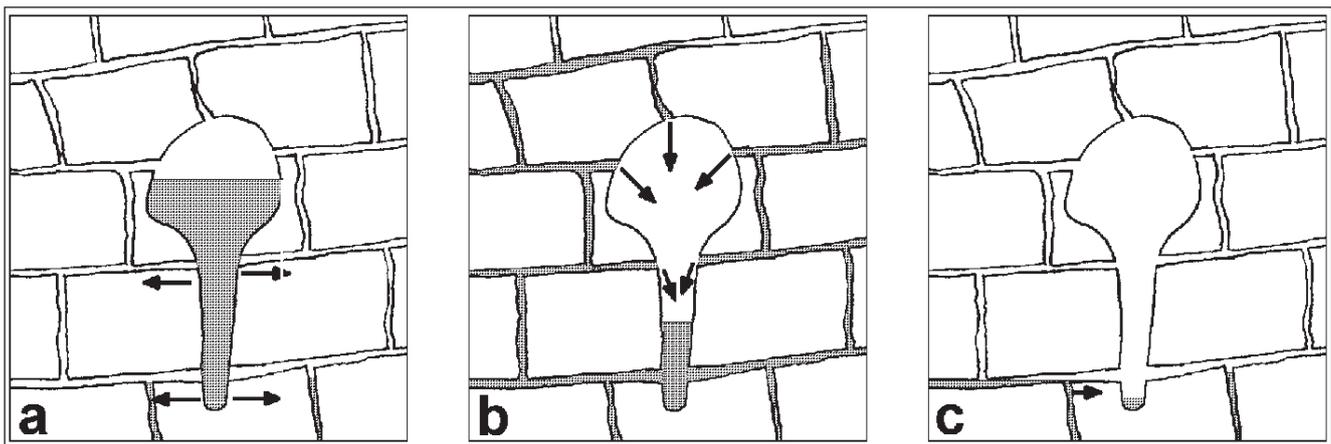


Fig. 1.5 : En coupe, schéma de la double circulation dans les fentes (de dimensions très exagérées) et le conduit. L'eau est représentée en gris.

a - début de la crue ; le conduit est plein et débite dans le réseau de fentes ;

b - la décrue est rapide dans le conduit ; quand celui-ci se vide, les fentes débitent vers lui ;

c - basses eaux ; le conduit est presque vide, les fentes continuent de se vider et débitent dans le conduit, y assurant une circulation plus ou moins permanente.

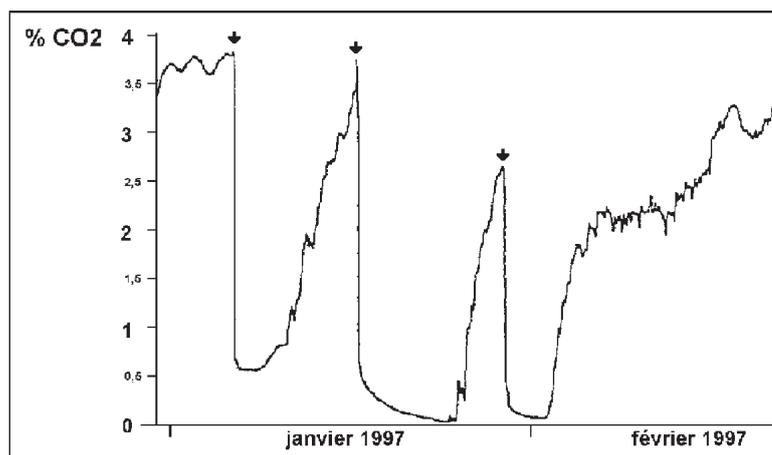


Fig. 1.6 (d'après BOURGES et al. 1998) : Aven d'Orgnac (Ardèche), canyon des Salles Rouges, 200 mètres sous la surface, variations de la teneur en CO_2 de l'air.

En hiver, de l'air extérieur froid, donc dense, pénètre parfois (petites flèches) par l'entrée de l'aven et descend jusqu'à la base du canyon où il fait chuter brutalement la teneur en CO_2 ; par l'effet-piston, en 10 jours environ, la teneur en CO_2 dans le canyon remonte à une valeur proche de celle existant dans le réseau de fentes.

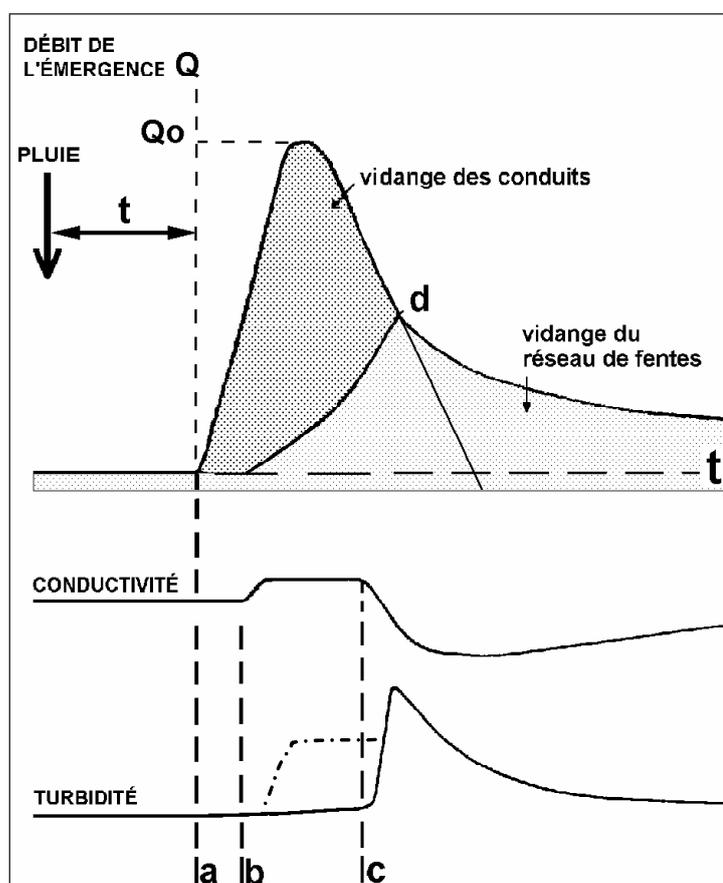


Fig. 1.7 (inspirée de WILLIAMS 1983) : Crue - décrue d'une émergence ; débit, conductivité (qui varie d'ordinaire comme la teneur en CaCO_3), turbidité. Selon les caractéristiques du réseau de conduits, le débit maximum se situe avant ou après l'abscisse c.

Le réapprovisionnement en CO_2 de l'air observé dans l'aven d'Orgnac (figure 1.6) le confirme. L'eau qui circule en profondeur, dissolvant ce CO_2 , peut redevenir agressive (figure 1.6).

Dans une émergence, l'arrivée d'une crue provoque un ensemble de phénomènes (figure 1.7).

- À partir de la pluie (ou de la fonte des neiges), le niveau de l'eau monte dans les conduits. La surpression qui en résulte se transmet vers l'aval, et accélère la circulation jusqu'à l'émergence, où le débit commence d'augmenter au bout d'un temps de **transfert** (de pression) t (abscisse **a**). Le maximum de débit à l'émergence est d'ordinaire lié à ce transfert.

- Poussées par les infiltrations résultant de la pluie, les eaux provenant du réseau de fentes peuvent contribuer à la circulation dans les conduits, d'ordinaire avec un certain retard. Étant plus minéralisées, leur conductivité est supérieure à celle de l'eau circulant dans les conduits ; ce qui se répercute à l'émergence (abscisse **b**). Éventuellement une augmentation de la turbidité est observable si la vitesse de circulation est suffisamment augmentée pour mobiliser des sédiments granulaires présents dans les conduits (contrairement au pic de turbidité mentionné ci-dessous, cette augmentation n'est évidemment pas corrélable avec une variation de la conductivité).

- Au bout d'un temps de **transit** (abscisse **c**) l'eau de crue ayant circulé dans les conduits arrive à l'émergence sans influencer sur la courbe de débit, celle-ci étant commandée par la pression. Par contre, cette eau est de conductivité plus faible et, chargée de matières en suspension, elle provoque une augmentation de la turbidité. Une pluie en surface s'ajoute à la crue précédente, si celle-ci est récente, et réduit son temps de transit (KOGOVSĚK 1996). Pour la Fontaine de Vaucluse (Vaucluse), le transfert est compris entre 24 et 48 heures, et le transit est de l'ordre d'un mois (SCHOELLER 1962).

- Sur la figure 1.7, on distingue le volume ayant transité dans les conduits (représenté en gris foncé). Puis, à partir du point **d** de la courbe, la décroissance du débit résulte seulement de l'écoulement de l'eau du réseau de fentes, stockée ou infiltrée à partir de la pluie

ayant provoqué la crue : c'est le **tarissement** (en gris clair). Autrement dit, la courbe décroissante enregistrée à l'émergence se décompose en deux branches tangentes au point **d**, dont les formules mathématiques diffèrent.

On nomme :

- Q le débit de l'émergence au temps t ;
- Q_0 le débit maximum de l'émergence au cours de la crue ;
- q l'infiltration via le réseau de fentes ;
- q_0 cette même infiltration quand le débit est maximum à l'émergence ;
- α un coefficient différent selon que le régime d'écoulement est laminaire ou turbulent ;
- η l'inverse de la durée d'infiltration à partir du moment où le débit est Q_0 ;
- ε un coefficient fonction de la rapidité de l'infiltration.

Au début de la décroissance du débit, à l'évacuation de l'eau contenue dans les conduits peut s'ajouter l'eau de pluie infiltrée ayant rejoint l'émergence ; le débit est représenté par la formule :

$$Q = Q_0 \times e^{-\alpha t} + q \text{ avec } q = q_0 \times (1 - \eta t) / (1 + \varepsilon t)$$

(formule de MANGIN 1975).

Ensuite, le tarissement a pour formule :

$$Q = Q_0 \times e^{-\alpha t}$$

(formule de MAILLET 1905)

Cette deuxième formule, exponentielle, est représentée par une droite en coordonnées semi-logarithmiques, ce qui permet de déterminer le point de tangence **d**.

Le karst est parfois considéré comme un filtre, au sens physique du terme : c'est-à-dire qu'il fait passer d'une fonction d'entrée (les précipitations, phénomène assez bref) à une fonction de sortie (le débit aux émergences). Durant le trajet, la courbe du débit de crue s'étale, et se déforme en fonction de caractéristiques telles que stockages, diffusions, confluences, rétrécissements du conduit, fonctionnements avec trop-plein ; sa forme peut donc varier d'une fois sur l'autre (exemple de la fontaine de Vaucluse, Vaucluse - PUIG 1990), ou d'une émergence à une autre dans un même massif, comme celui de la Sainte-Baume (Bouches-du-Rhône -

Var - MARTIN 1991). Cette courbe n'est donc que très approximativement la « signature » du karst en réponse au phénomène relativement ponctuel qu'est une précipitation ou une fonte des neiges. Faute de mieux, c'est à partir d'elle que l'on évalue d'ordinaire les volumes d'eau contenus respectivement dans le réseau de fentes et celui de conduits. Et la méthode les distingue assez arbitrairement : des conduits isolés par un bouchon de sédiments peu perméables seront compris comme des fentes. Il reste que le volume du réseau de fentes apparaît d'ordinaire supérieur à celui des conduits (dans le rapport de 9 à 1 pour le réseau de la Foux de la Vis, Gard - PALOC 1971).

CAVITÉS ÉPIDERMiques ET RÉSEAU DE CONDUITS

Les cavités épidermiques ont une évacuation latérale, mais n'ont pas de prolongement vers le bas, sauf par le réseau de fentes, et n'ont généralement pas de relation avec le réseau de conduits.

Cependant une partie du réseau de conduits se poursuit dans la zone épidermique. Mais, dans les grands lapiaz nus d'altitude, alors que les points d'absorption abondent en surface, seuls quelques gouffres donnent accès à des réseaux de conduits.

Il arrive donc que des cavités des deux types communiquent, mais la liaison humaine peut se révéler difficile : dans la grotte de l'Église (Var), « comme en beaucoup d'autres, à proximité du versant », la communication avec « le réseau d'origine profonde... est exiguë et difficile à trouver » (RENAULT 1969). Et, à partir de ce qui est pourtant une doline-perte, le Trou des Mongols (Ain), il fallut 400 tirs d'explosif pour agrandir le réseau de fentes et rejoindre 50 mètres plus bas des conduits actifs pénétrables (CHARVENET *et al.* 1997).

Puisqu'elles résultent des mêmes processus, il n'est pas surprenant que les formes observées dans les réseaux de conduits et les cavités épidermiques se ressemblent ; dans ces dernières, les formes de creusement énergétique sont toutefois absentes.

RÉSEAU MAILLÉ

Si le réseau de fentes évolue en tant que tel, sans que les circulations puissent se structurer en conduits faute de charge hydraulique, l'élargissement des fentes se poursuit, les écoulements restant laminaires.

- Si les surfaces de discontinuité sont denses, il peut en résulter un **affaissement-dissolution**, c'est à dire l'élargissement par dissolution des surfaces de discontinuité de la masse karstifiable en régime noyé, donc la réduction progressive du volume des blocs limités par ces surfaces. En se tassant (voir la figure 4.50), ces blocs conservent leur disposition respective, « comme des morceaux de sucre dans une boîte », dans les réseaux de fentes de la craie de Normandie élargis sous couverture, ou à l'entrée de la grotte du Folaven (Doubs). Dans la grotte des Trois Frères (Ariège), les blocs désolidarisés par un affaissement-dissolution sont volumineux.

- Si les surfaces de discontinuité sont plus espacées, l'élargissement peut aboutir à la création d'un réseau maillé (figure 1.8), d'ordinaire constitué de vides plus ou moins pénétrables et de nombreux culs-de-sac. La figure 2.7 en est un exemple classique. Le réseau maillé se creuse en régime noyé, avec prédominance de la dissolution différentielle selon les surfaces de discontinuité. Il est le plus souvent à nette

dominante subhorizontale, montrant que son élargissement est lié à un niveau de base.

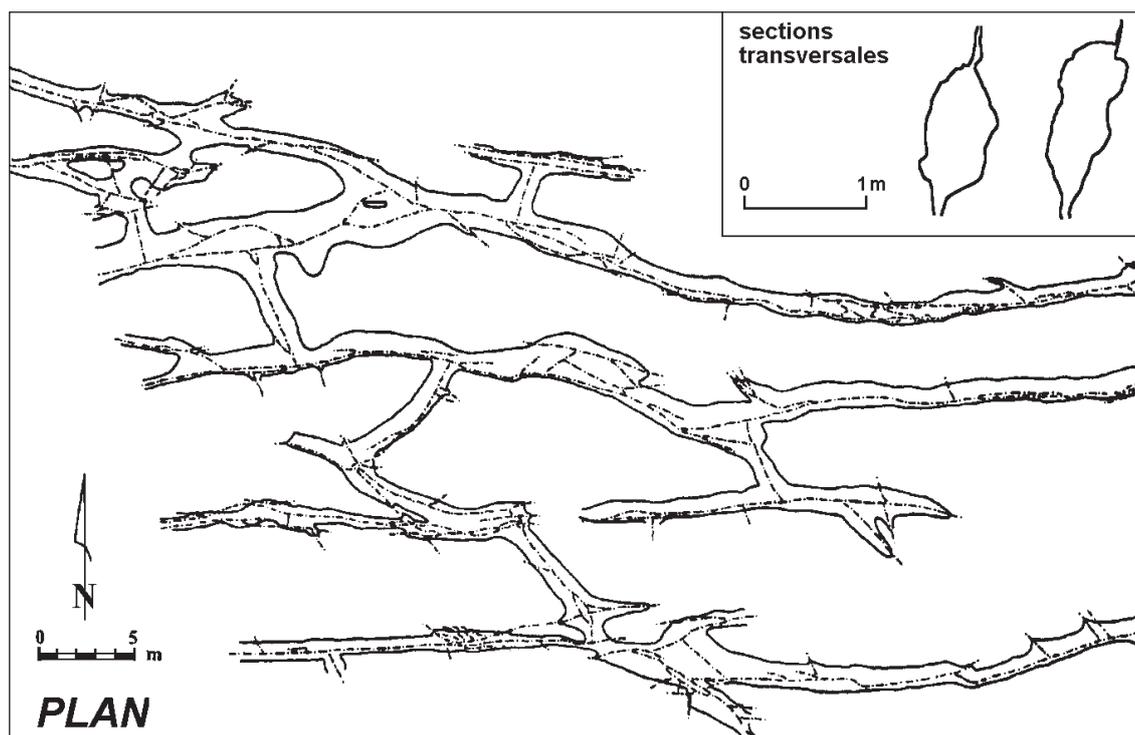
Les cavités dans lesquelles coexistent un réseau maillé et un réseau de conduits pouvant être attribués au même stade de creusement, sont au moins très rares : cela signifie que les genèses sont bien différentes. La répartition très variable selon les pays le confirmerait par ailleurs : en France, le réseau maillé est exceptionnel. Il semble néanmoins que, dans le gouffre du Mas Raynal (Aveyron), où des témoins de piliers se trouvent dans une salle (MARTEL 1894), celle-ci résulte de l'élargissement d'un réseau maillé.

Dérivés du même réseau de fentes, il existe donc trois types de vides souterrains aux genèses différentes : cavités épidermiques, réseau de conduits, réseau maillé. De leur creusement résulte une **perméabilité karstique** (MANGIN 1982), beaucoup plus importante que la perméabilité antérieure à la karstification. Elle peut atteindre 10 mètres/seconde à l'intérieur d'un massif si l'on prend en compte les conduits. Dans le réseau de fentes, elle est très variable autour de 10^{-6} mètres/seconde, ce qui demeure une valeur de roche relativement peu perméable (JEANNIN 1996).

Le passage de circulations superficielles à des circulations souterraines organisées est l'une des caractéristiques essentielles du karst.

Fig. 1.8 (d'après RODET 1998, complété) : Grotte de la Mansonnière (Orne), plan partiel avec indication en tireté des fractures observées dans le plafond. D'après photos, sections transversales.

Ce réseau maillé dérive d'un réseau de fentes fantômées, et d'importants résidus encombrant encore les conduits.



RESUME DE LA PREMIÈRE PARTIE

Cet ouvrage suppose connus la plupart des processus en oeuvre dans le karst et des formes qui en résultent. Car il se situe en amont, afin de préciser comment des facteurs géologiques et géographiques, puis des évolutions agissent sur ces processus ; c'est-à-dire « pourquoi » les processus engendrent les formes karstiques.

LA KARSTIFICATION INITIALE

Si toute interprétation concernant le karst conserve une part d'incertitude, c'est particulièrement vrai pour les hypothèses concernant le début de la karstification, qui n'est d'ordinaire plus observable, même dans les formes qui en sont résultées.

Puisque ce creusement initial est le début de tout développement karstique, il faut pourtant parvenir à un modèle permettant de le comprendre.

Le **karst résulte** d'une mise en solution de la roche, donc de **circulations d'eau**. Le début d'une karstification profonde est commandé par l'apparition d'une charge hydraulique. Dans les cas habituels, l'eau contenue dans la roche se trouve d'abord sous forme d'une « nappe transitoire », dont la progression vers le bas utilise pour corroder le fait que le CO₂ est un gaz lourd, et la décomposition de matières organiques. Il en résulte un réseau de fentes, non pénétrable à l'homme, qui finit par atteindre un niveau de base, avec une « perméabilité karstique » un peu supérieure à celle de la roche originelle, mais décroissante vers le bas. Dès ce stade commencent à se définir les « chemins de drainage » selon lesquels la résistance hydraulique est plus faible, et qui jouent un rôle directeur dans la « structuration des circulations ».

Dans le réseau de fentes, on distingue une « zone épidermique », plus perméable ; profitant de ce que l'agressivité des eaux y est im-

portante, il existe des « cavités épidermiques » dont certaines ont probablement pu se creuser prématurément.

Si le passage du réseau de fentes au réseau de conduits correspond à celui d'une circulation en écoulement laminaire à un écoulement turbulent, ce dernier suppose que l'eau trouve des vides en continuité aboutissant à une émergence. **Donc le creusement des conduits ne peut se faire que de l'aval vers l'amont, la gravité étant le moteur. L'effet-piston**, dans lequel l'eau du réseau de fentes pousse vers le bas l'air à forte teneur en CO₂ qui s'y trouve aussi, permet de comprendre une réactivation de l'agressivité à l'aval du réseau de conduits. Tout conduit actif possède une « zone inondable », dans laquelle il se creuse.

Cependant, le réseau de fentes conserve pour une part son fonctionnement hydraulique ; de sorte que le karst présente une « double circulation », à dominante verticale pour les fentes, peu pentée sur l'horizontale pour les conduits. La complexité spatiale et temporelle de ces circulations fait qu'en toute rigueur, à l'émergence, **la courbe de débit ne peut être considérée comme la « signature » du karst**, en réponse à une précipitation considérée comme un phénomène impulsif.

Entre les cavités épidermiques et le réseau de conduits d'un même massif, les relations apparaissent aléatoires.

Lorsque les circulations ne peuvent se structurer pour créer des conduits, elles demeurent lentes et le réseau de fentes tend à s'élargir en un « réseau maillé ».

Dérivés du même réseau de fentes, il existe donc trois types de vides aux genèses différentes : cavités épidermiques, réseau de conduits, réseau maillé.

Le karst provoque le passage de circulations superficielles à des circulations souterraines organisées.

