

## KARSTIFICATION SOUTERRAINE EN MILIEU SATURÉ

par

Albert BRIFFOZ<sup>1</sup>, Camille EK<sup>2</sup> & Michel GEWELT<sup>2-3</sup>

(3 figures)

**RESUME.** – La lenteur de la circulation des eaux dans les fissures du karst ne permet dans bien des cas, pour expliquer le développement des cavités, que de faire appel à une action chimique : la corrosion. Mais, en milieu karstique, la saturation est souvent atteinte rapidement. On montre ici que la dissolution peut en fait continuer en milieu saturé.

### **ABSTRACT.** – *Underground solution in saturated water.*

In order to explain the development of caves, considering the slowness of water circulation into the fissures of the limestone, only a chemical action i.e. corrosion can be called upon in most cases. However, as saturation is rapidly reached, we consider, in order to extend the dissolution action of underground water, the possibility of dissolution in a saturated environment.

### **ZUSAMMENFASSUNG.** – *Unterirdische Kalklösung im gesättigten Milieu.*

Die langsame Zirkulation des Wassers in Karstspalten erlaubt es in den meisten Fällen nur die chemische Wirkung der Korrosion als Ursache der Hohlräumstehung heranzuziehen. Die Kalksättigung wird aber im Karst sehr schnell erreicht. Dass Lösung auch im gesättigten Milieu stattfinden kann, soll hier gezeigt werden.

## 1. – LES FAITS ET LE PROBLEME

En milieu karstique, les eaux de pluie percolant dans le sol se chargent de CO<sub>2</sub> d'origine atmosphérique et surtout biologique.

Elles manifestent dès lors un maximum d'agressivité vis-à-vis du CaCO<sub>3</sub> dans les premiers mètres de roches traversées. Mais il existe des cavités karstiques profondes ou longues et, pour expliquer la prolongation de l'action dissolvante de l'eau, diverses théories ont été avancées :

par exemple, les apports ultérieurs de CO<sub>2</sub> par voie directe ou par oxydation des matières organiques apportées par l'eau (Howard, 1964), la présence d'ions étrangers et d'ions communs (Picknett, 1977), l'intervention de micro-organismes (Caumartin & Renault, 1958), le mélange d'eaux à différents états de saturation (Bögli, 1964), le passage d'un écoulement laminaire à un régime turbulent (White & Longyear, 1964), la condensation d'eau sur les parois (Trombe, 1952), la vitesse de l'eau d'infiltration (Bakalowicz, 1977), le refroidissement de l'eau au cours de son infiltration (Renault, 1964), etc. Ces différents facteurs agissent principalement au niveau de la zone de percolation mais aussi, pour certains d'entre eux, au sein de la zone noyée.

A ces facteurs limités dans l'espace ou dans le

temps, nous proposons d'ajouter le travail chimique existant naturellement, même en solution saturée. Cette possibilité de karstification souterraine par l'eau saturée est expliquée par des mouvements d'échanges ioniques.

## 2. – ECHANGES ET DEPLACEMENTS ATOMIQUES

Le comportement de certains composés peut, notamment sur base d'une perte anormale de radioactivité, indiquer des phénomènes d'échange, même en milieu saturé. Par exemple, on a observé (Nesmeianov, 1957) que si un cristal de NaCl contenant du radio-sodium est plongé dans une solution saturée en NaCl non radioactive, il perd progressivement une part de son activité au profit de la solution. Cette perte d'activité du cristal est plus rapide que celle qui est due à la seule décroissance radioactive. Des précipités de carbonate de baryum

1 Rue de Dolembreux, 7, B-4050 Esneux.

2 Laboratoire de Géomorphologie et de Géologie du Quaternaire. Université de Liège. Place du Vingt-Août, 7, B-4000 Liège.

3 Centre d'Etude de l'Energie Nucléaire (C.E.N./S.C.K.) Boeretang, 200, B-2400 Mol. Aspirant du Fonds National de la Recherche Scientifique (F.N.R.S.).

utilisés comme standards  $^{14}\text{C}$  ont également montré une perte significative d'activité en quelques semaines, surtout quand ils sont stockés en atmosphère humide (Armstrong & Schubert, 1947). Cette perte de radioactivité, qui peut atteindre 50 %/o, indique un échange entre l'atmosphère et le précipité de  $\text{BaCO}_3$ . Ces phénomènes d'échange ne sont évidemment pas réservés aux composés radioactifs et il est bien connu par exemple que le standard en poudre NBS 20 (Solenhofen Limestone), utilisé en spectrométrie de masse pour l'expression du  $\delta^{18}\text{O}$  et du  $\delta^{13}\text{C}$  échange son oxygène avec l'humidité atmosphérique (Friedman & O'Neil, 1977).

Ces phénomènes d'échange constituent en quelque sorte un processus de renouvellement avec bilan chimique et massique pratiquement nul.

### 3. - ENERGIES MISES EN JEU

Les énergies mises en jeu dans les processus de karstification sont principalement les énergies de type chimique, l'énergie potentielle dont disposera l'eau pour sa traversée du massif calcaire, et l'énergie mécanique agissant directement sur la roche (fracturation, détente, . . .). Les modalités d'action de ces types d'énergie ont été récemment discutées (Quinif, 1983).

Dans le cas d'une fine fissure pré-existante, deux types de champs de forces semblent suffire à l'explication des phénomènes d'échanges entre l'eau et la paroi calcaire de la fissure.

Les échanges chimiques sont principalement guidés par les actions électromagnétiques entre atomes et molécules qui tendent à une distribution spatiale plus uniforme. La tendance vers l'équilibre se traduit par une meilleure isotropie spatiale. L'équilibre est dynamique et il représente un compromis entre deux tendances opposées : la tendance à l'entropie maximale (chaos moléculaire) et la tendance qu'ont les molécules à adopter un état d'énergie minimal. Ce sont donc les énergies thermodynamiques et la cinétique chimique qui interviennent ici. L'énergie potentielle gravifique minimum s'acquiert par une répartition plus homogène

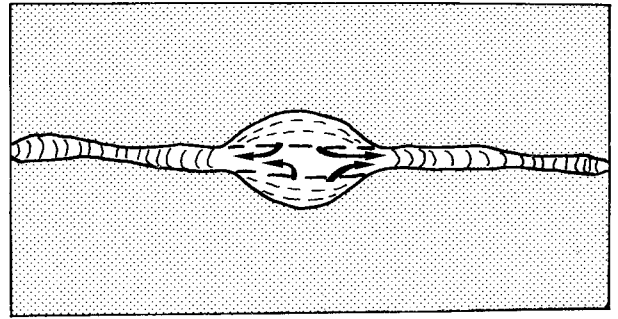


Figure 1

Section transversale dans une fissure. Du calcaire se précipite dans les zones étroites tandis que du calcaire est enlevé dans les parties plus larges

et ce sont en définitive les phénomènes demandant le moins d'énergie qui se produisent le plus facilement.

### 4. - APPLICATION A L'HYDROLOGIE KARSTIQUE LA FISSURE. SON ELARGISSEMENT EN MILIEU NOYE ET SATURE

Les cavités karstiques se forment en général à partir de fissures préexistantes dans lesquelles la saturation en calcaire des solutions est très rapidement atteinte (en peu de mètres ou de décimètres).

Les eaux saturées, dans ces étroites crevasses, disposent essentiellement des types d'énergie évoqués ci-dessus : l'énergie électrochimique et l'énergie mécanique d'origine gravifique.

On va voir que l'application de ce qui précède conduit l'évolution de la section transversale des fissures vers des formes plus isotropes, plus proches du principe de la moindre action, permettant une diminution progressive de la perte de charge hydraulique (Roques & Ek, 1973).

La saturation n'implique pas la cessation de toute réaction, mais un bilan nul des réactions en sens opposés.

Les fissures ne pouvant avoir une épaisseur parfaitement constante, il y a nécessairement des endroits où

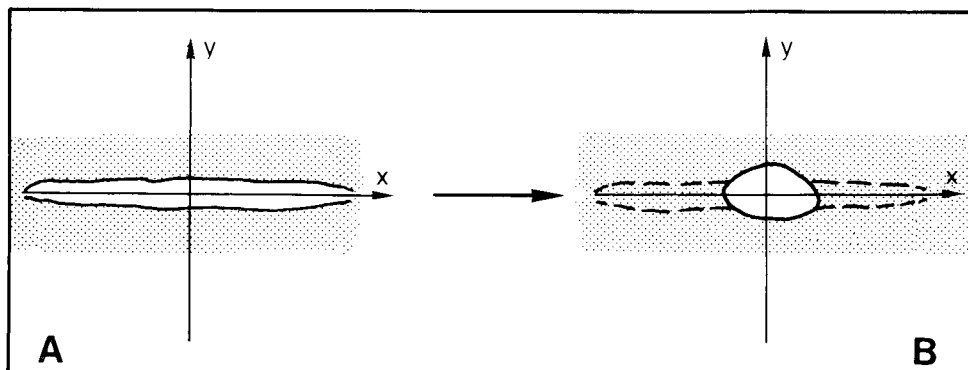


Figure 2. - Augmentation de l'isotropie d'un conduit (coupe transversale). En B, meilleure symétrie x et y qu'en A.

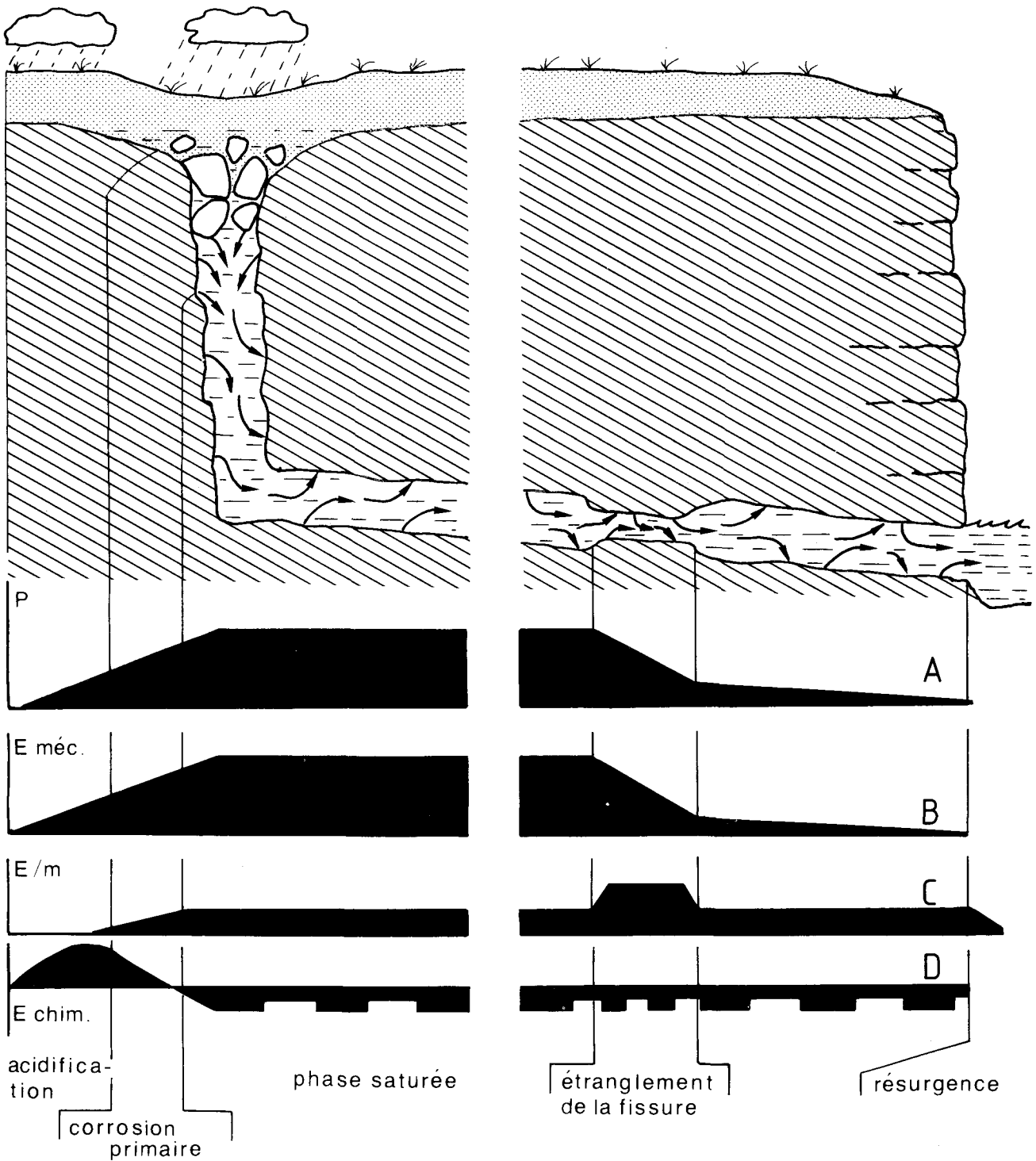


Figure 3. - Schéma de l'écoulement de l'eau dans un calcaire fissuré. (Coupe longitudinale dans laquelle la largeur du conduit a été exagérée plusieurs centaines de fois par rapport à la hauteur du massif).

- A. Pression statique du liquide dans le conduit (due à la dénivellation).
- B. Energie mécanique potentielle de l'eau transmise par la pression.
- C. Dépense d'énergie mécanique par mètre de conduit.
- D. Evolution de l'énergie chimique le long du conduit. Onde progressive de déplacement en milieu saturé.

Cette figure montre que la dépense d'énergie mécanique (C) est concentrée dans une zone étranglée à rapide perte de pression. Ceci accélère les échanges chimiques paroi-solution, ce qui peut créer avec le temps une reptation de matière évacuant l'étranglement.

l'eau circule plus aisément qu'à d'autres. Dès lors, si l'on considère une fissure en section transversale, il y aura enlèvement de matière par dissolution aux endroits où l'eau circule le plus vite, et précipitation simultanée aux endroits où la circulation est entravée, avec comme conséquence le comblement des endroits où la fissure est la plus mince et l'élargissement corrélatif des endroits où la circulation est plus rapide (fig. 1).

La section tendant à une plus grande "isotropie", la vitesse pourra dès lors s'y accroître (fig. 2).

Si l'on examine d'autre part la fissure en coupe longitudinale, on peut considérer que l'eau y est saturée après un parcours très bref. Il est cependant d'expérience courante que l'eau peut établir et maintenir des circulations en milieu fissuré sur de très longues distances. Dans certains cas, ceci peut s'expliquer simplement par des échanges locaux de calcaire, l'eau élargissant les étranglements (où sa vitesse et sa perte de charge sont les plus fortes) et précipitant simultanément du calcaire en d'autres endroits proches, dans les tronçons où la circulation est plus lente (fig. 3). D'où une régularisation de la forme du conduit.

A la sortie du système, dans l'eau saturée, on retrouvera quantitativement la même teneur en calcaire (la teneur de saturation) que celle que l'on aura déjà mesurée non loin de l'entrée, au bout de quelques mètres de parcours sous terre. Mais, par le jeu des micro-déplacements corrélatifs des réactions locales de dépôt et de dissolution, une partie du calcaire exporté proviendra en fait du conduit parcouru par l'eau déjà saturée (1).

Le calcaire redéposé peut d'autre part être plus sensible à l'ablation que le calcaire originel (Roques, 1964; Girou, 1970) et intervenir dans la formation de sables calcaires et peut-être dans l'érosion régressive qu'on observe à partir des points de confluence.

## 5. - CONCLUSIONS

Le développement de certains réseaux karstiques pose un problème du fait que leurs eaux apparaissent saturées dès l'entrée du réseau et que les conditions hydrogéologiques donnent à penser qu'il en a vraisemblablement toujours été ainsi.

L'explication réside en ce que l'équilibre chimique n'implique pas l'arrêt des réactions, mais l'égalité des réactions dans les deux sens : du calcaire peut être emporté d'un milieu saturé, pour autant que se préci-

pite en cet endroit du calcaire (éventuellement importé), par exemple dans des culs-de-sac du complexe fissural. Ceci conduit à des formes plus isotropes et comportant des pertes de charge moindres.

## REMERCIEMENTS

Nous remercions les Professeurs J. Depireux et A. Pissart de l'Université de Liège, et M. P. Jasselette, chef de travaux à la même université, pour leur discussion et leur critique constructive des idées ici présentées.

## BIBLIOGRAPHIE

- ARMSTRONG, W.D. & SCHUBERT, J., 1947. *Science*, 106, p. 403, cité par I.U. Olsson, 1965. New experience on  $C^{14}$ -dating of tests of foraminifera, Proc. 6th Int. Conf. Radio carbon and Tritium dating, Pullman : 319-331.
- BAKALOWICZ, M., 1977. Relations entre la dynamique des eaux du karst et les processus de karstification. Proc. 7th Int. Speleol. Congr. Sheffield : 10-12.
- BÖGLI, A., 1964. Corrosion par mélange des eaux. *Int. J. Speleol.*, 1 : 61-70.
- CAUMARTIN, V. & RENAULT, Ph., 1958. La corrosion biochimique dans un réseau karstique et la genèse du mondmilch, *Notes Biospéol.*, 13 : 87-109.
- FRIEDMAN, I. & O'NEIL, J.R., 1977. Data of Geochemistry. Compilation of isotope fractionation factors of geochemical interest. U.S. Geol. Surv. Prof. Pap., 440-KK, 12 p. + 49 fig.
- GIROU, A., 1970. Etude de la cinétique de précipitation des carbonates de calcium en phase aqueuse. Thèse de doctorat, Université de Toulouse, 137 p.
- HOWARD, A.D., 1964. Processes of limestone cave development. *Int. J. Speleol.*, 1 : 47-60.
- NESMEIANOV, A., 1957. Les éléments radioactifs et leurs applications. Ed. en langues étrangères, Moscou, 139 p.
- PICKNETT, R.G., 1977. Foreign substance and calcite solubility in carbonated waters. Proc. 7th Int. Speleol. Congr., Sheffield : 348-351.
- QUINIF, Y., 1983. Eléments d'une approche énergétique du karst. Application à quelques exemples réels de karst. *Karstologia*, 1 : 47-54.
- RENAULT, Ph., 1964. Remarque sur la signification des expériences en géodynamique karstique. *Int. J. Speleol.*, 1 : 109-152.
- ROQUES, H., 1964. Contribution à l'étude statique et cinétique des systèmes gaz carbonique-eau-carbonate. *Ann. de Spéol.*, 19 (2) : 225-484.
- ROQUES, H. & EK, C., 1973. Etude expérimentale de la dissolution des calcaires par une eau chargée en  $CO_2$ . *Ann. de Spéol.*, 28 (4) : 549-563.
- TROMBE, F., 1952. *Traité de Spéléologie*. Payot, Paris, 376 p.
- WHITE, W.B. & LONGYEAR, J., 1964. Some limitations on speleogenetic speculation imposed by the hydraulic groundwater flow in limestone. *N.S.S. Bull.*, 26 : 68-69.

1) Cette tendance est du reste bien illustrée par les plafonds des grottes ornées de stalactites, où l'eau des fissures (qui constituent en première approximation des plans de cheminement) circule en fait en canalicules espacés (cheminement de fait linéaire) alimentant chacun une stalactite.