

CREUSEMENT EN PROFONDEUR ? OU DE LA KARSTOLOGIE APPLIQUEE A LA DYNAMIQUE DES PROCESSUS KARSTIQUES

par

Jacques CHOPPY ¹

(5 figures)

RESUME. - A partir d'informations données par des travaux pétroliers ou de géothermie sont examinées les circulations dans la zone saturée, la présence de gaz carbonique dans les eaux à grande profondeur, enfin la mise en solution du calcaire susceptible d'en résulter; le bilan n'est pas particulièrement favorable à l'hypothèse d'un creusement " bathyphréatique " dans les conditions classiques.

ABSTRACT. - Deep phreatic hollowing ?

On the basis of data provided by petroleum and geothermic research, we have investigated water circulations in the saturated zone, the presence of carbon dioxide in very deep groundwaters and the limestone solution that sometimes results. Deep phreatic hollowing remains dubious, at least under classical conditions.

Comme certains hommes, il est des sujets qui semblent marqués par le destin ! Ainsi, par une singulière coïncidence, bien des choses dites à propos du creusement karstique en profondeur paraissent mal assurées, voire contestable; j'ai abordé une partie de ces problèmes dans une note (1982) un peu hermétique, car elle n'était pas, en fait, destinée à la publication.

1. - CIRCULATION DANS LA ZONE SATURÉE

King a proposé un schéma des circulations dans la zone saturée, fondé sur des trajets courbes, dont le succès semble tenir à deux raisons :

- Dans la technique géophysique dite du sondage électrique, particulièrement utilisée en hydrologie appliquée, les lignes de flux électrique (fig. 1) ont un trajet courbe parce que la résistivité électrique décroît avec la profondeur, de sorte que, pour une même différence de potentiel entre deux points, un trajet plus long est possible s'il s'enfonce plus profondément.
- Avec sa très grande notoriété, Davis a repris le schéma de King, en l'adaptant (fig. 2) au cas des aquifères dans des roches perméables en grand; et, régulièrement, ce schéma reparait, plus ou moins modifié, dans la littérature karstique.

L'ennui, c'est qu'adapté ou pas, ce schéma est faux; car, au lieu de décroître comme dans le cas des courants électriques provoqués, la "résistance" à la circulation de l'eau croît avec la profondeur, parce

que les roches sont plus comprimées, et donc les vides moins ouverts.

En réalité, selon le principe de l'utilisation du trajet de perte de charge minimum, les eaux de la zone saturée empruntent le plus possible des trajectoires rectilignes.

Souvent, la pression en profondeur peut être supérieure à la pression hydrostatique. C'est l'une des raisons pour lesquelles, lors des forages, le fluide chargé de refroidir l'outil et de remonter les déblais est une boue à la bentonite, qui est une argile particulièrement lourde.

Lorsque le forage est "en perte", c'est-à-dire que cette boue envahit le terrain, cela prouve simplement que la perméabilité de celui-ci est notable, et non l'existence de cavités importantes. Lorsqu'au contraire l'eau de formation se mélange à la boue, c'est que sa pression est supérieure et pas nécessairement que sa circulation est particulièrement active, comme on l'a souvent admis. Corbel, par exemple, parle de "circulations d'eau jusqu'à plus de 2.000 mètres de profondeur" !

Cependant, les foreurs signalent parfois des "cavernes" dans lesquelles leur outil de forage chute brutalement, parfois de plusieurs mètres : observons qu'un vide tectonique subvertical de quelques décimètres de large suffit à produire le phénomène; mais il peut s'agir d'une vraie cavité, puisque bon nombre de gisements de pétrole se trouvent dans des paléokarsts.

¹ 68, Boulevard Pasteur, F 75015 Paris (France).

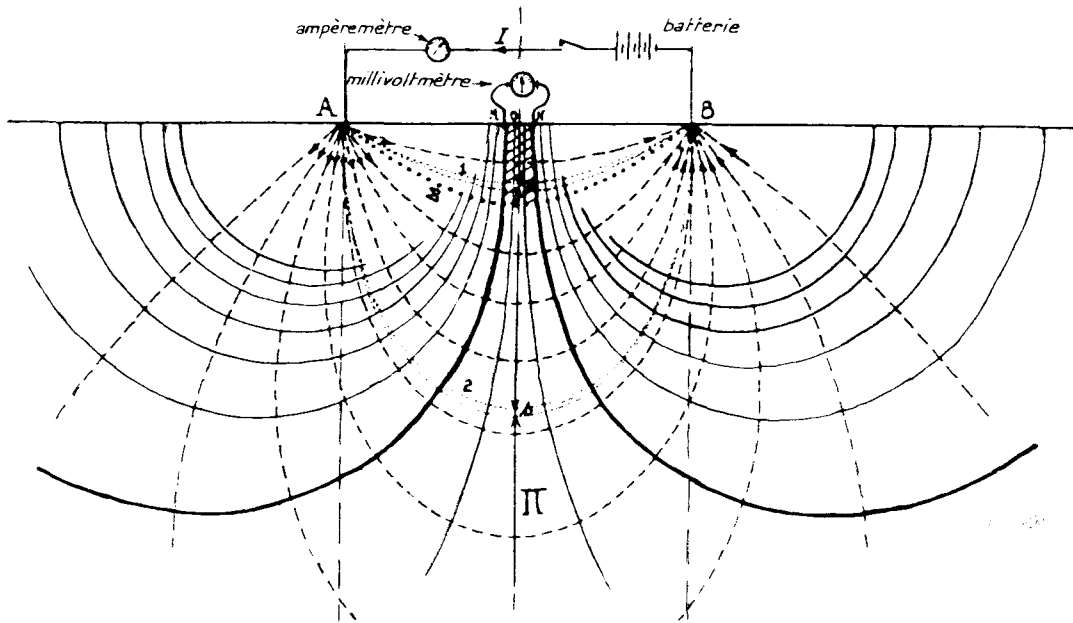


Figure 1. - Lignes de flux (en tireté) et courbes équipotentiels (en traits pleins) dans la prospection par méthode électrique d'après FAVRE).

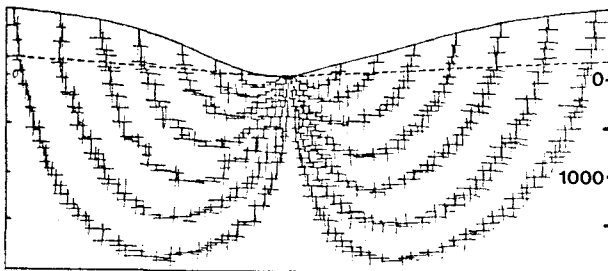


Figure 2. - Schéma de KING, modifié par DAVIS

Il reste que, dans le cas général, les circulations sont extrêmement lentes à grande profondeur; par application de la loi de Darcy, Birot admet "que la circulation est pratiquement nulle" lorsque la profondeur en-dessous du niveau de base est "approximativement égale à celle du volume montagneux au-dessus de la base". Et Schoeller a montré que la charge motrice liée à un éventuel fonctionnement en thermosiphon est négligeable.

En Floride, les mesures au ^{14}C rapportées par Hanshaw montrent que les vitesses de circulation sont de 2 à 12 mètres par an pour des profondeurs n'excédant pas 300 mètres, l'altitude au-dessus de la mer atteignant 100 mètres.

Même dans le cas d'une circulation provoquée par le pompage d'eau et la ré-injection de la même eau froide (en géothermie, fig. 3), on admet qu'une distance d'un kilomètre en plan suffit pour que le refroidissement ne se fasse pas sentir avant une dizaine d'années.

2. - PRESENCE DE GAZ CARBONIQUE DANS LES EAUX A GRANDE PROFONDEUR

En Floride, selon Corbel, 26 analyses d'eaux "prises très loin de la surface" ont été publiées. On a toujours trouvé du CO_2 libre (fréquemment jusqu'à 25 mg/l). L'agressivité de ces eaux reste donc réelle. Le CO_2 , plus lourd que l'air, semble descendre lentement à travers les roches fissurées, et peut s'accumuler ainsi à de grandes profondeurs.

On objectera que :

- Le CO_2 libre peut être "équilibrant" au sens de Trombe, de sorte que sa présence n'entraîne pas que l'eau soit nécessairement agressive; d'autant que les conditions de température et de pression rencontrées à grande profondeur peuvent modifier les équilibres considérés.
- Un transit de CO_2 à l'état gazeux jusqu'à 2.000 mètres de profondeur est, pour le moins, très improbable; Corbel envisage, du reste, d'autres possibilités.

Mais, à l'inverse, peut-on envisager une sursaturation en CO_2 , au sens où l'admet Vandenberghe ? Après avoir rappelé les conditions de solubilité du gaz carbonique dans l'eau, à l'équilibre, pour une gamme de températures et de pressions (fig. 4), celui-ci rappelle que, selon Pascal, "la vitesse avec laquelle l'équilibre est atteint varie considérablement selon que sera modifiée, soit la température, soit la pression"; de sorte "qu'une variation de température sera assez rapidement suivie d'une absorption ou d'une désorption de gaz, tandis que pour un changement de pression qui devrait théoriquement aboutir au même résultat, la vitesse d'absorption ou de désorption sera beaucoup moins élevée".

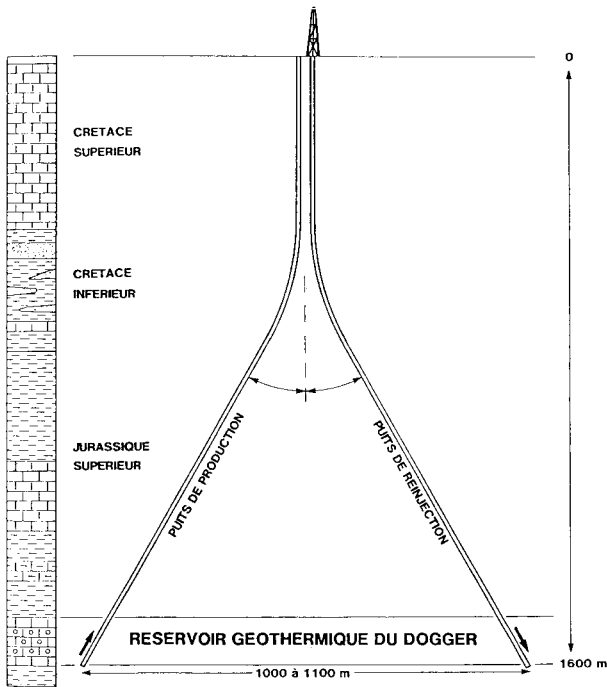


Figure 3. - Schéma de principe d'un doublet géothermique au Dogger en région parisienne.

Par conséquent, si nous considérons la solubilité de CO₂ dans une eau pure soumise à des températures et à des pressions croissantes, - et c'est le cas d'une eau pénétrant dans l'écorce terrestre -, nous voyons cette solubilité diminuer sous l'action de la température et l'influence de la pression n'intervenir que faiblement pour corriger ce phénomène".

Et Vandenberghe conclut : " Dans le cas du gradient géothermique (en moyenne 33 m pour 1°C) et de la pression hydrostatique, il existe pour les eaux souterraines une limite de profondeur au-delà de laquelle la solubilité du gaz carbonique diminue".

Alors qu'ils ont examiné cette " démonstration " il est surprenant que ni Caro, ni Schoeller ne l'aient contesté; elle est en effet pour le moins incomplète.

Car les gradients de température et de pression débutent dès la surface de la zone saturée, et l'on ne voit pas qu'il puisse y avoir d'autre " limite de profondeur au-delà de laquelle la solubilité du gaz carbonique diminue ", d'autant que c'est pour les températures les plus faibles que la solubilité du gaz carbonique décroît le plus vite. L'auteur veut-il dire que le gaz carbonique en solution atteint la limite pratique de saturation à une certaine profondeur ?

Surtout, compte tenu de la vitesse extrêmement faible des circulations profondes, il ne semble pas acceptable de négliger l'influence de la pression, même si elle est très lente.

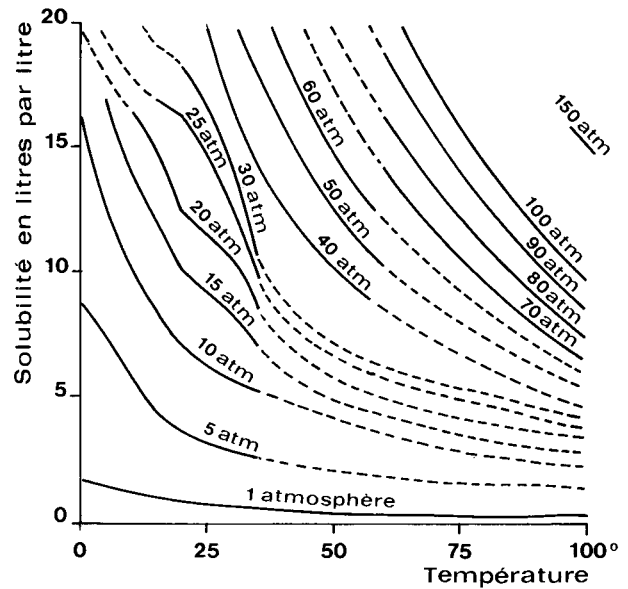


Figure 4. - Variations de la solubilité du gaz carbonique dans l'eau pure, en fonction de la température, pour différentes pressions. (d'après KOPPERS).

3. - MISE EN SOLUTION DU CALCAIRE

Vandenberghe admet ensuite que la diminution de solubilité du CO₂ entraîne une précipitation des carbonates; pour Schoeller, " ce problème est beaucoup moins simple qu'on ne pourrait le penser a priori ", et n'autorise actuellement que " quelques réflexions préliminaires".

On peut toutefois verser au dossier les informations apportées par des travaux techniques.

Pour situer ceux-ci, il faut rappeler que, d'un gisement de pétrole, environ 25 % seulement sont récupérés; et l'on imagine les efforts qui sont faits pour améliorer cette récupération.

L'une des solutions proposées est d'injecter dans le gisement du gaz carbonique, avec l'objectif de diminuer les phénomènes capillaires en partie responsables de la rétention du pétrole par la roche réservoir.

Ayant eu l'occasion de m'intéresser, en 1980, à une opération de ce type dans un réservoir calcaire non karstifié, je me suis demandé si le CO₂ injecté ne pouvait en outre, avec l'eau qui se trouve toujours dans les gisements, avoir un effet de corrosion du calcaire susceptible d'améliorer la perméabilité de la roche réservoir.

Mais que peut-on dire du fonctionnement d'un système eau salée - CO₂ - calcaire par 1800 mètres de profondeur et sous une température de 80°C ? En proposant l'un et l'autre une expérimentation, Henri Roques et l'Institut Français du Pétrole ont en fait répondu qu'on ne savait presque rien.

Les opérations in situ apportent un élément de réponse.

En effet, que va-t-il advenir si l'injection de CO_2 dans un puits (dit d'injection) se traduit par une forte dissolution de calcaire par l'eau ? Une partie de celle-ci devra finalement ressortir au jour par un puits de production en subissant une chute de pression brutale, qui va entraîner une sursaturation importante de CO_2 et par suite en calcaire.

Certes, selon Pascal, la sursaturation en CO_2 n'entraîne pas immédiatement la libération de ce gaz; mais on sait aussi qu'en cas de sursaturation d'une solution contenant du CO_2 et du calcaire, l'agitation provoque le dépôt; on pourrait alors craindre que celui-ci n'obstrue le puits de production. Or, ce phénomène, qui ne pourrait intervenir que lorsque l'eau chargée de calcaire a migré jusqu'au puits de production, n'est jamais évoqué par les techniciens à propos de l'injection de CO_2 ; il est dès lors très probable que la mise en solution du calcaire n'est pas très active lors d'une telle opération.

4. - LE CREUSEMENT "BATHYPHREATIQUE"

On sait que, depuis Davis, l'école américaine utilise le concept d'un creusement à l'intérieur de la zone saturée, la profondeur atteinte par ce creusement étant toutefois l'objet de discussions. Reproduisant à nouveau le schéma de King, Ford parle de "bathypneatic cave" (fig. 5).

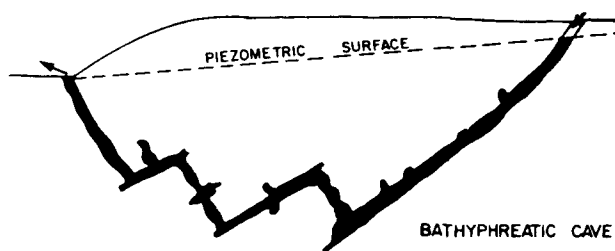


Figure 5. - "Bathypneatic cave" (d'après FORD).

Des circulations très lentes, une situation par rapport à la saturation en gaz carbonique dont on ne peut rien dire d'assuré, une corrosion du calcaire faible même en cas d'apport artificiel de CO_2 , alors qu'on ne peut guère compter sur un nouvel apport de CO_2 en profondeur dans les conditions naturelles, tel est le bilan de ce que l'on croit connaître.

Dans ces conditions, un creusement profond intervenant de manière sensible dans le processus karstique demeure hypothétique, du moins dans les conditions classiques.

Car il peut arriver, par exemple, que la structure géologique impose à des masses d'eau de descendre en profondeur pour rejoindre leur exutoire; ou qu'un fonctionnement hydrothermal aboutisse au même résultat.

BIBLIOGRAPHIE

- BIROT, P., 1966. Le relief calcaire; "Les cours de Sorbonne", Centre de Document. Univ., Paris, 238 p. : p. 28, 67-68.
- BLEAHU, M.D., 1974. Morfologia carstica; Editura Stiintifica, Bucuresti, 590 p. : 474.
- CARO, P., 1965. La chimie du gaz carbonique et des carbonates, et les phénomènes hydrogéologiques karstiques; "Chronique d'hydrogéologie", BRGM, Paris : 51-77, 69-70.
- CHOPPY, J., 1982. Observations écrites; "Karsts littoraux"; Mém. AFK, 4 : 75-76.
- CORBEL, J., 1957. Les karsts du Nord-Ouest de l'Europe et de quelques régions de comparaison, thèse; Rev. Géogr. de Lyon; Mém. et Docum. Etudes Rhodaniennes 12, 541 p., p. 478.
- DAVIS, W.M., 1930. Origin of limestone caverns; Bull. Geol. Soc. America 41 : 475-628; p. 549.
- FAVRE, B., 1956. Cours de Géophysique; Institut Français du Pétrole, 2 t; II, 25.
- FERGUSSON. The spring of Florida; Florida Geol. Survey Bull. 31, 190 p. (d'après Corbel).
- FORD, D.C., 1977. Genetic classification of solutional cave systems; Proceed. of the 7th. Intern. Speleological Congress, Sheffield : 189-192.
- HANSHAW *et al.*, 1985. Carbonate equilibria and radiocarbon distribution related to groundwater flow in the Floridan limestone aquifer, USA; Hhdrol. des Roches Fissurées; Actes Géol. Dubrovnik, AIHS - UNESCO II : 601-614 (d'après Bleahu).
- KING, F.H., 1899. Movement of ground water; Nineteenth Annual Report United States Geological Survey, part II, 59-294 (d'après Davis).
- KOPPERS, 1953. Löslichkeit von Kohlendioxyd in Wasser unter erhöhtem Druck; Handbuch der Brennstofftechnik, Essen (d'après Vandenberghe).
- PASCAL, P. Traité de chimie minérale, tome IV (d'après Vandenberghe).
- SCHOELLER, P., 1965. Sur la limitation de la circulation en profondeur dans le karst; "Chronique d'hydrogéologie", BRGM, Paris : 43-49.
- TROMBE, F., 1951. Quelques aspects des phénomènes chimiques souterrains; Annales de Spéléologie VI/1 : 3-21, p. 7.
- VANDEBERGHE, A., 1960. Obstacles à la circulation des eaux dans les terrains calcaires. Notion de limite d'un réseau karstique, Ann. Soc. Géol. Nord LXXX : 147-155.