

DES INFLUENCES POSSIBLES DE LA THERMODYNAMIQUE SUR LA FORME ET LE TRAJET DES CONDUITS KARSTIQUES ORIGINELS

par

Albert BRIFFOZ¹

(2 figures et 1 tableau)

RESUME. – Des approches thermodynamiques, hydrauliques et microchimiques proposées permettent de tirer quelques grandes lignes au travers de cas limites. Il s'ensuit un regard plus riche et plus critique sur l'orientation des phénomènes réels. Les conduits profonds et noyés, même ceux contenant de l'eau saturée chimiquement, pourraient évoluer vers la forme cylindrique et leurs étranglements disparaître. Dans les karst des plateaux calcaires, les trajectoires hydrauliques descendant verticalement, suivies d'un long parcours profond, horizontal, semblent les plus aptes à se maintenir désobstruées.

ABSTRACT. – Thermodynamics and the cross- and longitudinal sections of original karst conduits.

The proposed hydraulic, thermodynamical and microchemical approaches give a general view through limit cases. From these ones, we will have a more informed and more critical view about the tendency of actual phenomena. The conduits, even those containing chemically saturated water, deep and flooded, may evolve into a cylindrical shape and their narrow passages may be widened. In the plateau karst, the hydraulic paths flowing down vertically, and then flowing horizontally, deeply and longly, seem the most capable to remain unblocked.

1. – LES CONDITIONS GEOLOGIQUES : DE LA SURFACE A LA ZONE PROFONDE

Soient un massif d'une roche karstifiable de qualité constante sur toute son épaisseur, une très fine fissuration primitive (joints, diaclases), répartie également de façon isotrope, donnant aux circulations d'eau une grande liberté de sélection; les coordonnées horizontales : X; les coordonnées verticales : H (Fig. 1).

Dans l'exemple, $H_A - H_F = 100$ mètres; les pressions locales figurent en mètres d'eau, la pression atmosphérique valant zéro. Isolons un filet d'eau ininterrompu de débit D, passant de l'altitude H_A à H_F , par le parcours très lent ABCDEF, en écoulement laminaire, doué d'une énergie cinétique et d'une action mécanique négligeables.

Exemple : de A à B, sur 10 mètres (Achten, 1981), l'eau acidifiée surtout par l'humus (Ek, 1979) jusqu'à B où la saturation chimique sera atteinte (Roques & Ek, 1973). De B jusqu'à F vont agir les phénomènes "profonds". Malgré le faible enlèvement de roche (ex. : 20 mg/litre) entre B et F, les eaux profondes et saturées continueraient le processus de karstification. (Briffoz, Ek & Gewalt, 1985).

2. – LA MISE EN PRESSION DE MASSES GAZEUSES DANS LES CONDUITS

Dans les conduits étroits, de véritables pistons gazeux peuvent être propulsés vers la profondeur par des

apports d'eau ultérieurs. Sous la pression statique importante due au liquide amont (ex.: 10 bars sous colonne pressante de 100 m d'eau), l'eau profonde pourra dissoudre dix fois plus de CO_2 et dissoudre aussi deux fois plus de $CaCO_3$.

3. – CONDITIONS D'ÉVOLUTION IMPOSEES PAR L'HYDROLOGIE

L'écoulement décrit va traverser des éléments de fissure de longueur l, à section de passage hydraulique s, et le périmètre de cette section sera p. La fonction φ liera la vitesse moyenne locale v du débit écoulé D ($v = D/s$) à la forme du conduit et aux vitesses périphériques le long des parois. 1 kg d'eau écoulée de A à F aura à dépenser 981 joules d'énergie par 100 mètres d'altitude perdue ($H_A - H_F$). Pour un débit D isolé et constant, la perte d'énergie en friction pour un tronçon de conduit sera proportionnelle à sa perte dynamique de pression ΔH . C'est pourquoi, l'équation de Bernoulli égalisera $H_A - H_F = \sum_{A \text{ à } F} \Delta H$, tandis que l'hydraulique nous informe qu'à ces faibles vitesses, la dépendance du carré de la vitesse étant négligeable, subsiste la fonction linéaire :

$$\Delta H = l \cdot \varphi \cdot p/s \cdot v = l \cdot \varphi \cdot p/s \cdot D/s = D \cdot (l \cdot p \cdot \varphi/s^2) = D \cdot R \quad (1)$$

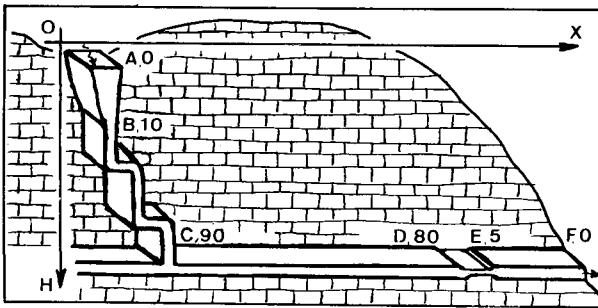


Figure 1

Parcours étroit, originel et isolé ABCDEF avec pressions locales (en mètres d'eau) pour $H_A - H_F = 100$.

avec R représentant la résistance hydraulique du tronçon de conduit.

Pour l'ensemble de A à F :

$$H_A - H_F = \sum \Delta H = D \cdot \sum R = D \cdot R_{AF}$$

permettant le calcul de $D = (H_A - H_F) / R_{AF}$ (2)

Dans notre exemple :

$$R_{AF} = R_{AB} + R_{BC} + R_{CD} + R_{DE} + R_{EF} \quad (3)$$

100	10	10	75	5
-----	----	----	----	---

Après un temps à l'échelle géologique, les sections locales moyennes auront évolué au maximum de

$$\Delta s_{AB} = 200 \text{ mg/l/100 m} = 20$$

et de $\Delta s_{BCDEF} = 20 \text{ mg/l/1000 m} = 0,02$ (4)

La corrosion aura surtout élargi près de A, tandis que les actions profondes seraient 1000 fois moins efficaces.

En agissant uniquement sur les sections s dans (1), les formes de conduit entre B et F restant inchangées, les actions profondes habituellement évoquées auront fini par faire chuter de 1 0/0 la résistance hydraulique à l'écoulement entre B et F qui vaut $R_{BC} + R_{CD} + R_{DE} + R_{EF}$; voir (3).

Le débit D sera augmenté d'un peu plus de 1 0/0; voir (2).

L'augmentation, dans le même temps, de s_{AB} de loin plus importante entraîne une nette chute de vitesse de A à B. La corrosion limitée à quelques jours aura alors lieu de plus en plus près de A (Roques & Ek, 1973). Au lieu de cette évolution régressive, une progression classique de la corrosion vers CDEF doit obligatoirement passer par une augmentation du débit D plus rapide que l'augmentation des sections s.

Le processus accélérateur demande pour s'accomplir une nette chute de R_{AF} .

Première possibilité : les actions profondes se portent par priorité sur la grande résistance hydraulique R_{DE} dont l'étranglement absorbe une grande part des 981 joules d'énergie, créant une importante perte de pression ΔH_{DE} , et limitant le débit global D : voir (2) puis (3).

Si dans (1) seules les sections s évoluent, s_{DE} devra alors grandir plus vite que s_{BC} , s_{CD} , s_{EF} ; d'où une chute de R_{DE} , élément majoritaire dans R_{AF} : voir (3). Le débit peut, par exemple, être multiplié par 3, les fissures ayant conservé leur forme plane.

Deuxième possibilité : sans même augmenter les sections s, ni nécessiter d'exportation globale de matière, l'équation (1) permet d'envisager une chute des valeurs de p et φ . Si des fissures planes de 100 mm sur 0,1 mm évoluaient jusqu'à des conduits cylindriques de même section (diamètre 3,56 mm), la chute de toutes les R permettrait en plus au débit écoulé de grandir au moins 18 fois. Les deux effets associés augmenteraient D de plus de $3 \times 18 = 54$ fois. **A matière enlevée égale, le conduit cylindrique tendant vers l'uniformité de B à F représente l'optimal hydraulique d'évolution et constitue probablement une étape indispensable dans les longues karstifications.**

4. - REGROUPEMENT DES DEBITS PROFONDS

L'arrivée, par exemple en C, d'autres eaux, augmente un peu la vitesse en CDEF mais aussi la contre-pression qui tend à limiter les arrivées; ($\Delta H_{CF} = D_{CF} \cdot R_{CF}$); D_{CF} ne peut ainsi dépasser une certaine valeur. Pour évoluer, ce système nécessite une baisse de R_{CF} qui ne pourra s'obtenir que par lente évolution des sections s : par exemple, mélanges d'eaux saturées différemment (Bögli, 1964) agissant faiblement vu la grande longueur : voir (4); mais aussi par les efficaces modifications de forme des conduits évoquées ci-dessus. Pour tous les autres exemples, un débit D unique est isolé de A à F.

5. - CONDITIONS D'ÉVOLUTION IMPOSÉES PAR LA THERMODYNAMIQUE

Par masse d'eau unitaire écoulée dans un tronçon de conduit, une masse locale de roche m_p recevra par friction une entropie S_{ep} telle que $S_{ep} \approx \Delta H / T_0$ où T_0 est la température de la roche avant friction. Il se produit un échauffement minuscule mais calculable ΔT tel que $S_{ep} = C \cdot m_p \cdot \ln(T_1 / T_0)$ avec C=chaleur spécifique de la roche et le logarithme népérien porte sur le rapport température après échauffement T_1 sur T_0 reliés par $T_1 = T_0 + \Delta T$, le tout en degrés Kelvin.

Après friction, tentons de renverser le processus thermodynamique : introduisons un gaz ou un liquide frais à la température T_0 dans le conduit. Chaque volume emprisonné par deux pistons imaginaires se dilatera en atteignant la température T_1 et restituera une petite énergie mécanique correspondant à une petite récupération d'entropie S_{pe} .

L'entropie restant dans la roche vaut S_p .

On aura $S_{ep} = S_p + S_{pe}$ et S_{pe} grandit proportionnellement à T_1/T_0 . Le deuxième principe thermodynamique veut que l'entropie irréversible tende à grandir dans les processus à friction. ($S_p \rightarrow \max$ donc $S_p \rightarrow S_{ep}$). Ceci se produit par dispersion des calories dans des masses de plus en plus grandes (m_p), y créant des températures de plus en plus proches de l'ordinaire ($T_1 \rightarrow T_0$ et $\Delta T \rightarrow \min$) peu exploitables en processus inverse ($S_{pe} \rightarrow \min$). Cette condition impose donc des ΔH locaux les plus petits possibles sur tout le parcours. Ainsi, l'étranglement DE à forte friction et échauffement ΔT plus élevé devra s'élargir.

La masse unitaire d'eau écoulée ayant toujours 981 joules à dépenser pour $H_A - H_F = 100$ m, les ΔT et ΔH locaux seront au minimum avec un conduit cylindrique uniforme de B à F échauffant également une masse rocheuse maximale de B à F. Un calcul séparé a permis de s'assurer que la friction décroît plus vite que la résistance thermique paroi-bedrock en passant de la fissure plane au conduit cylindrique.

Le contrôle naturel de l'uniformité du conduit en évolution ne peut se faire que via un signal physico-chimique porté par la solution et agissant à l'interface eau-roche. Les pressions et vitesses locales doivent y jouer un grand rôle pour adapter le travail microchimique des solutions saturées (Briffoz, Ek & Gewelt, 1985).

6. - TRAJET D'ÉCOULEMENT OPTIMAL SELON LES CRITERES HYDRAULIQUES ET THERMODYNAMIQUES ; ENERGIE DE DESOBSTRUCTION

Trois critères différents donnent un élément commun pour le calcul de l'énergie de désobstruction :

1. **La force statique** sur un point obstrué du conduit, qui vaut la pression amont moins la pression aval multipliée par la surface pressée au point obstrué.
2. **Le critère d'évolution hydraulique** qui demande à obtenir une réduction des pertes de pression locales ΔH sur tout le parcours.
3. **Le deuxième principe thermodynamique** dont la tendance à l'irréversibilité demande le moindre échauffement et la moindre perte de pression ΔH sur chaque élément du parcours.

De là un raisonnement commun :

- Si un point de ABCDEF se trouvait obstrué ou étranglé : **pression maximum amont** en mètres d'eau = $H_A - H$ si H est l'altitude du point obstrué; **dépression maximum aval** en mètres d'eau : si $(H - H_F) > 10$ mètres, elle vaudra 10 mètres d'eau.
- **Valeur d'anomalie** statique, hydraulique et thermodynamique de l'obstruction : $H_A - H + 10$ que l'évolution tendra à réduire au minimum.

- Au niveau de la surface $H = H_A$ la force maximum correspondra à 10 mètres d'eau soit max. 1 kg/cm² ou 10 tonnes/m². Cette composante peut aider le poids des matériaux lors d'effondrements karstiques avec sol étanche (gel, pluie), ce qui a été évoqué dans les effondrements de Kain-Tournai en Belgique (Derijcke, 1982).

- Si $(H_A - H_F) < 10$ m alors chaque point peut bénéficier de $(H_A - H_F)$: karsts bas, recoupements souterrains de méandres de rivières.

- Pour les dénivellations importantes $(H_A - H_F) \gg 10$ m, alors $H_A - H + 10 \approx H_A - H$.

La somme des capacités individuelles de tous les points d'un parcours à se désobstruer vaudra

$$\int_0^L (H_A - H) \cdot dl \text{ avec } L = \text{longueur totale du parcours}$$

et dl = élément de cette longueur qu'on peut exprimer en altitude en fonction de la distance horizontale :

$$dl = \sqrt{1 + \frac{dH^2}{dX^2}} \cdot dX \text{ où } H \text{ est fonction de } X$$

tout au long du parcours cherché, tandis que dH et dX sont les différentielles.

- Capacité moyenne de tout le parcours pour se maintenir désobstrué :

$$\int_0^L (H_A - H) \cdot dl / \int_0^L dl \text{ qui est l'énergie moyenne}$$

que le liquide peut apporter sur un point obstrué. Cette valeur grandit avec $(H_A - H_F)$ d'où l'importance d'une dénivellation motrice pour le début de karstification.

- Probabilité apportée par la roche et les sables détachés de laisser le parcours désobstrué : si $L = \infty$: proba. = 0; si $L = 0$: proba. = 1.

Elle s'exprimera ainsi par

$$1/(1 + L) \approx 1/L \approx 1/\int_0^L dl$$

- La qualité globale du meilleurs parcours vaudra

$$\int_0^L (H_A - H) \cdot dl / \int_0^L dl / \int_0^L dl \rightarrow \text{Max.}$$

$$\text{ou } \int_0^{X_F} (H_A - H) \cdot \sqrt{1 + \frac{dH^2}{dX^2}} \cdot dX / (\int_0^{X_F} dX)$$

$$\sqrt{1 + \frac{dH^2}{dX^2}} \cdot dX)^2 \rightarrow \text{Max.} \tag{5}$$

La recherche mathématique de la trajectoire optimale exacte H fonction de X n'a pas abouti, mais P. Léonard propose d'orienter mes essais comparatifs de courbes (droites, puissances, exponentielles, hyperboles) introduites dans (5) sur des pseudo-ellipses dont, excepté le centrage des axes, les formules générales sont :

$$\frac{X^M}{(X_A - X_F)^M} + \frac{H^N}{(H_A - H_F)^N} = 1$$

Ces pseudo-ellipses approchent bien le maximum cherché.

Les solutions proches de l'optimal dépendent du

rapport $\frac{X_A - X_F}{H_A - H_F}$

qui représente le rapport du parcours horizontal à la perte d'altitude entre A et F (tabl. 1). Une échelle de calcul est fixée en imposant $H_A - H_F = 100$. La valeur Q_E fixe la qualité du parcours et la probabilité d'instauration d'un écoulement selon une pseudo-ellipse (M et N indiqués) entre A et F. A titre de comparaison Q_D donne la probabilité d'instauration pour un écoulement rectiligne de A à F.

Le rapport Q_E/Q_D compare les qualités des deux possibilités indiquées. Les écoulements les plus courts ($X_A - X_F$ petit) bénéficient des meilleures chances avec leur Q_E plus élevés. **Pour une résurgence F fixée, on peut y voir la cause du recul dans le temps géologique du point A.**

Un point profond d'un parcours ABCDEF court et devenu majeur (air et pression atmosphérique en C) jouera le rôle du point F pour une nouvelle trajectoire, plus jeune, avec un nouveau A plus éloigné.

Tableau 1

$\frac{X_A - X_F}{H_A - H_F}$	TYPE DE KARST	1/4 PS. ELLIPSE Q_E MAX			DROITE A F Q_D	Q_E/Q_D
		M	N	Q_E		
1	court ou	4	2	0.407	0.353	1.15
3.1	montagne	4	2	0.223	0.153	1.46
10	long ou	16	8	0.0883	0.0497	1.77
31	plateau	32	16	0.0304	0.0161	1.88

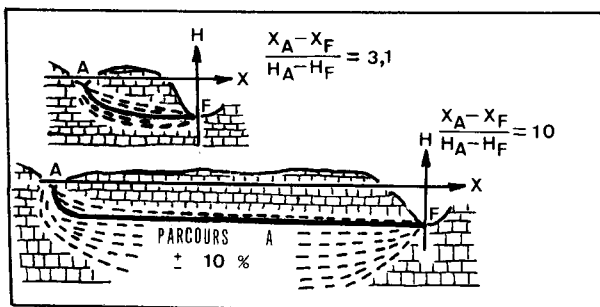


Figure 2

Écoulements les plus proches de l'optimal pour un karst court ou de montagne (3,1) et pour un karst long ou de plateau (10). En traits interrompus : les parcours à $\pm 10\%$ de l'optimal.

La figure 2 représente deux cas où $(X_F - X_A)/(H_A - H_F)$ valent 3,1 et 10 respectivement karst de montagne et de plateau.

Les zones en traits interrompus contiennent des trajectoires possibles ne s'écartant que d'une dizaine de % de l'optimal.

Pour les karsts longs ou de plateau, on remarque une **tendance au parcours profond vers le fond de vallée avec possibilité de siphons prolongés** et de formation d'une nappe phréatique.

Pour les karsts de montagne ou courts, une meilleure liberté de choix vers le haut orientée vers les **systèmes vadose, en escalier**, et éventuellement du **siphonnement limité et aval**. Les **eaux profondes** par rapport à leur pénétration mais **proches des versants de montagne pourront percer** ceux-ci grâce à leur forte pression statique ($H_A - H$ très élevé). On obtiendra alors plus tard des **résurgences en pleine falaise**.

7. - PASSAGE A L'ETAT EVOLUE DES CONDUITS

Si des fissures planes, le long d'un parcours optimal, ont évolué vers des conduits cylindriques, la capacité d'écoulement peut finalement devenir supérieure à la fourniture d'eau en A.

ABC devenu de plus en plus vaste, on observera une chute d'eau avec dépense d'énergie cinétique entre A et C. Le niveau d'eau vers C baisse jusqu'à équilibrer la friction d'écoulement CDEF. Nous aboutissons à une étude sur le creusement karstique actuel. (Quinif, 1983).

8. - CONSIDERATIONS FINALES

Pour les vérifications expérimentales qui s'imposent pour consolider et affiner les considérations théoriques ici présentées, il nous semble que les plus grands espoirs résident dans l'étude approfondie de la **géométrie des écoulements karstiques**; des **karsts noyés très longs à eau saturée**; dans la recherche des modalités de **l'alignement des stalactites** sur des fissures calcifiées, et dans une **fine expérimentation de laboratoire** expliquant les pertes sur le terrain des **traçeurs radioactifs** dont les isotopes sont abondants dans les calcaires : ^{14}C et ^{45}Ca (Lallemand & Grison, 1970).

REMERCIEMENTS

Pour leurs recherches, leur aide, pour les informations transmises, pour les nombreuses discussions sans lesquelles cet ensemble serait demeuré informé, je remercie vivement MM. F. Bolsée, chimiste à Socolie-Liège; G. Cerfontaine, Ingénieur A.I.Lg. et plusieurs

professeurs et chercheurs de l'Université de Liège, particulièrement M. le Professeur J. Depireux, MM. C. Ek, P. Jasselette et P. Léonard, tous trois chefs de travaux et M. M. Gewelt, aspirant FNRS.

BIBLIOGRAPHIE

- ACHTEN, 1981. A propos de Karst et autres aquifères; Centre B.Et. Doc. Eaux 414/415; Juin/Juillet 1981 : 17-26.
- BÖGLI, A., 1964. Corrosion par mélange des eaux. Int. Jour. Spéol., 1 : 61-70.
- BRIFFOZ, A., EK, C. & GEWELT, M., 1985. Karstification souterraine en milieu saturé; Ann. Soc. géol. Belg., 108 : 251-254, ce volume.
- DERIJCKE, F., 1984. Evolution hydrogéologique du Karst carbonifère du Tournaisis. Communication faite à la journée de protection des eaux karstiques SNDE-CNPSS, Bruxelles, 1982, p. 58.
- EK, C., 1979. Variations saisonnières des teneurs en CO₂ d'une grotte belge. Ann. Soc. géol. Belg., 102 : 71-75.
- LALLEMAND, A. & GRISON, G., 1970. Contribution à la sélection de traceurs radioactifs pour l'hydrologie. Centr. B. Et. Doc. Eaux, mai 1970, 318 : 230-235.
- QUINIF, Y., 1983. Eléments d'une approche énergétique du Karst. Application à quelques exemples réels. Karstologia, 1 : 47-54.
- ROQUES, H. & EK, C., 1973. Etude expérimentale de la dissolution des calcaires par une eau chargée de CO₂. Ann. Spéol., 28 : 549-563.