

LES VITESSES D'ÉROSION DU CALCAIRE DANS L'EAU : ÉTUDE DE PHÉNOMÈNES ACTUELS

par

Miriam KUPPER¹

(3 tableaux)

RESUME. – Une nouvelle méthode de mesure de la vitesse d'érosion du calcaire dans l'eau est proposée (plaquettes de calcaire). On cherche à mettre en évidence les variables spécifiques de ce type d'érosion et à isoler ces variables : acidité, vitesse d'écoulement de l'eau, température, nature du calcaire, . . .). Relation d'une étude approfondie, mesures et analyses, réalisées dans la Helle en haute Belgique.

ABSTRACT. – *Erosion speed of the limestone in a Belgian river.*

New measurements of the erosion speed of the limestone in the water have been carried on with standard limestone plates, in order to point out the specific variables and discriminate them : acidity, speed of water flow, temperature, kind of limestone. A thorough research is reported in the Helle river, High Belgium.

ZUSAMMENFASSUNG. – *Erosionsgeschwindigkeit des Kalkes in ein belgischer Fluss.*

Neue Messungen über die Erosionsgeschwindigkeit des Kalkes in Wasser wurden an Standard Kalkplatten durchgeführt. Die spezifischen Variablen wie Härte, Fließgeschwindigkeit, Temperatur, Gefüge des Kalkes usw. wurden herausgearbeitet und isoliert untersucht. Die Messungen und Analysen wurden im Fluss Helle (Haute Belgique) durchgeführt.

Les terrains calcaires sont très souvent le théâtre d'une intense circulation d'eau d'origines diverses d'ailleurs : cours d'eau aériens et souterrains, sources, résurgences, eaux de percolation, eaux de fonte, etc. . . Les vitesses de dissolution des terrains calcaires proposées jusqu'ici ont habituellement été déduites de l'étude d'un bassin hydrographique dans lequel les auteurs ont analysé et mesuré les diverses propriétés de l'écoulement de l'eau (formule de Corbel et ses variantes).

Nous avons cherché à mettre en évidence les variables qui régissent les processus d'érosion des pierres calcaires sous eau et à définir le rôle de ces variables dans des conditions d'érosion particulières. Différentes expériences ont été réalisées. Nous avons d'abord cherché à mettre au point une méthode de mesure, puis à isoler des variables spécifiques de l'érosion des pierres calcaires sous eau.

METHODE

Des plaquettes de calcaire de dimensions connues (50 x 50 x 5 mm) provenant d'un même bloc de calcaire (ici, "petit granit", Tn3b, 98 % de CaCO₃) sont placées dans des conditions déterminées (sous eau). Ces plaquettes sont soigneusement pesées avant expérience,

puis à nouveau après l'expérience. La différence entre leurs deux pesées permet de déterminer l'érosion subie par la plaquette dans les conditions définies scrupuleusement par l'expérience.

Dans chaque rivière, on travaille dans une section rectiligne aménagée de façon que les caractéristiques de l'écoulement soient le plus proche de celles d'un canal, sur 25 m en longueur environ. Les plaquettes de calcaire sont suspendues au milieu du courant, au 2/3 de la hauteur par rapport au fond et à une distance des rives telle que le frottement contre celles-ci n'influence pas non plus l'écoulement. La plaquette est maintenue en position verticale; la distance entre 2 plaquettes est de 40 cm minimum.

EXPERIENCES PRELIMINAIRES

Une première expérience a été réalisée dans une rivière de Haute Belgique, la Soor (Kupper, 1975). Une centaine de mesures ont été prises, sur des plaquettes de calcaire de nature pétrographique différente. On mesure le débit de la rivière, la température, le pH, TH, TAC, dureté calcique et magnésique, la pluviométrie. Une

¹ Laboratoire de Géomorphologie et Géologie du Quaternaire, Université, place du Vingt-Août, 7, B-4000 Liège.

analyse de variance suivie d'une étude de régression ont permis de mettre en évidence l'importance du facteur lithologique. Sur le plan expérimental, cette expérience démontre qu'une étude précise de la vitesse d'érosion ne peut se concevoir sans une détermination préalable du matériel rocheux sur lequel cette érosion s'exerce. (A ce niveau, les facteurs lithologiques les plus importants paraissent être la teneur en carbonates, l'homogénéité, la compacité et la porosité des roches). Cette expérience démontre en outre l'impérieuse nécessité de mesurer la **vitesse de l'eau** proprement dite et de travailler si possible tous autres facteurs égaux (par exemple, température, pH, etc. . . afin d'isoler les facteurs intervenant.

Une autre expérience a été menée dans quelques sources de Basse-Provence calcaire mais sur peu de plaquettes, en provenance de Belgique (pas les calcaires locaux). Cette expérience démontre que pour obtenir des résultats statistiquement valables, il faut pouvoir utiliser de nombreux échantillons dans des conditions sensiblement pareilles. L'importance du pH est révélée dans de nombreux cas. Mais c'est l'écoulement de l'eau qui paraît présider aux phases érosion-encroûtement.

Quelques expériences menées dans des eaux de fonte au Canada (Morel *et al.*, 1979) montrent que la stagnation dans ces eaux n'engendre qu'une érosion infime tandis que les plaquettes soumises à l'écoulement de ces eaux se dissolvent beaucoup plus vite. La nature du sol intervient : végétation, acides organiques (humiques, ...).

EXPERIENCES DANS LA HELLE

Les expériences citées ci-dessus ont confirmé l'importance de la mesure de la vitesse de l'écoulement de l'eau dans l'étude des vitesses d'érosion des calcaires sous eau. Par ailleurs, le rôle d'autres variables est aussi mis en évidence : la nature du calcaire utilisé, l'acidité de l'eau et son agressivité vis-à-vis du calcaire (pH, acides humiques, . . .), la température.

Le but de ces expériences sera donc de déterminer avec autant de précision que possible, l'importance relative de ces différentes variables.

Sur le plan de la méthode, toutes les plaquettes sont issues d'un même bloc de calcaire ("petit granit" belge, d'âge Tournaisien, gros banc). Le site choisi est un tronçon rectiligne d'une petite rivière de Haute Belgique, la Helle. Ses eaux sont très douces, non polluées et ont un pH acide, voisin de 4,0. L'expérience est de courte durée (4 h) de façon à pouvoir en première approximation, supposer constantes d'autres variables (pH, TH, température . . .). Le tronçon de la rivière est aménagé de façon à obtenir une série d'emplacements où des vitesses d'eau différentes peuvent être mesurées. Ces dernières sont mesurées avec précision à

plusieurs reprises durant les 4 h. Les méthodes d'analyses des eaux utilisées sont, sur le terrain : mesure du pH, et de la température; au laboratoire : mesure du pH, TH, duretés calciques et magnésiennes, titre alcalin complet (TAC).

Cette expérience a été répétée douze fois, sur une dizaine de plaquettes environ chaque fois. A titre d'exemple, nous présentons les résultats obtenus lors des mesures du 28.10.75 (tabl. 1).

RESULTATS

L'examen des résultats obtenus (une centaine de mesures) montre que la vitesse d'érosion est directement liée à la vitesse d'écoulement de l'eau mais que lors d'expériences différentes, une même vitesse de l'eau ne donne pas nécessairement lieu à une même vitesse d'érosion. Il existe donc une ou plusieurs variables susceptibles d'expliquer ces différences.

ETUDE STATISTIQUE

Pour chaque expérience, nous cherchons d'abord à établir la loi de variation moyenne entre la vitesse d'érosion et la vitesse d'écoulement de l'eau et à caractériser l'intensité de cette relation par un coefficient. Cette relation est linéaire et a la forme $y = ax^b$ où y = la vitesse de l'érosion (mm/millénaire)
 x = la vitesse de l'eau en cm/sec.
 a et b coefficients de la droite.

Elle peut aussi s'écrire $X_1 = \log y$; $X_2 = \log x$; a_0 = intercept et a_1 = coefficient de la droite.

Les droites de régression ainsi obtenues lors de chaque expérience sont reprises dans le tableau 2 avec, en regard, les autres variables soit le pH, la température et le TH (T.A.C. étant presque toujours égal à 0 dans ces eaux très peu minéralisées).

L'examen du tableau 2 suggère les observations suivantes :

- aux pH les plus faibles correspondent les vitesses d'érosion les plus élevées;
- aux pH les plus faibles correspondent les intercepts (a_0) les plus élevés tandis qu'aux pH les plus élevés correspondent les intercepts les plus faibles.
- le pH varie au cours de l'année entre 3,83 (mars) et 4,88 (octobre) mais les différences restent minimales et n'atteignent jamais l'unité pH.
- la température de l'eau varie au cours de l'année entre 0°C (hiver 1976) et 18,3°C (été 1976) ce qui représente une variation relativement importante. On sait que la solubilité du carbonate de calcium dans l'eau en présence du CO₂ diminue quand la température croît; on pourrait donc s'attendre à d'importantes variations dans cette solubilité. L'examen des résultats montre qu'à vitesse d'eau égale, la vitesse d'érosion est plus élevée quand la tempéra-

ture est faible (exemple : le 25.11.75 pour une vitesse d'eau de 36,3 cm/sec., à la température de 0,2°C, on a obtenu une vitesse d'érosion de 11.357 mm/millénaire tandis que le 28.04.76, pour une température de 1,4°C, à la même vitesse d'eau on obtient une vitesse d'érosion de 5.883 mm/millénaire).

- Le degré hydrométrique de l'eau (TH) varie aux environs de 20 mg/l, ceci étant dû au fait que nous ne travaillons pas dans une rivière au substratum carbonaté mais dans une région où affleurent surtout des quartzites et des phyllades. Les eaux de la Helle contiennent très peu de sels minéraux et sont très douces.
- Le coefficient de détermination r^2 est toujours supérieur à 0,70 et souvent à 0,90. Les variations de la vitesse de l'érosion sont donc expliquées pour une part très importante par la vitesse de l'eau.

Etant donné que d'autres variables que la vitesse de l'eau semblent jouer un rôle non négligeable sur la vitesse d'érosion, nous avons cherché à introduire dans cette relation ces autres variables et à déterminer la part de la régression expliquée par chacune d'elles. C'est l'étude de la **régression multiple**.

Au niveau de tolérance fixé (0,01), cette loi de variation moyenne de la vitesse de l'érosion peut s'écrire sous la forme de l'équation de régression multiple suivante :

$$X1 = 5,103 + 0,423 X2 - 0,442 \text{ pH} \quad [1]$$

où $X1$ = log vitesse de l'érosion en mm/millénaire

$X2$ = log de la vitesse de l'eau en cm/sec.

La variable $X2$, c'est-à-dire la vitesse d'écoulement de l'eau explique à elle seule 69 % des variations de $X1$ dans la régression tandis que le pH explique encore 14 %.

Au total, 83 % des variations de la vitesse d'érosion sont déjà expliqués par ces deux variables. (Au niveau de tolérance fixé ici, les variables température et TH n'interviennent pas).

DISCUSSION

1. L'étude de la vitesse d'érosion du calcaire dans les eaux de la Helle montre que celle-ci dépend directement et pour une part très importante de la vitesse d'écoulement de l'eau sur le calcaire.

Cette relation est positive.

2. L'influence de l'acidité de l'eau est également importante : des variations de pH bien inférieures à l'unité entraînent des variations importantes dans la vitesse d'érosion du calcaire.

Il est intéressant de signaler que dans cette étude nous avons examiné le départ de matière (pour quelque cause que ce soit), c'est-à-dire en ce compris, les processus de décomposition chimique et d'abrasion mécanique mais nos observations nous conduisent à penser

qu'il est extrêmement difficile de déterminer la part qui revient à chacun de ces processus ("part" qui varie en outre dans le temps et dans l'espace). Il apparaît toutefois que dans l'érosion sous eau, ces processus sont intimement liés.

Pour fixer les idées en ce qui concerne l'importance des variations introduites par ces deux variables à la Helle (vitesse d'écoulement et acidité de l'eau), nous présentons dans le tableau 3 quelques vitesses d'érosion théoriques d'une plaquette de "petit granit" dans les eaux de la Helle.

Les vitesses d'érosion ont été calculées au moyen de l'équation [1]. Elles sont données à titre indicatif et exprimées en mm par millénaire (ou micron par an ou m^3 par km^2 et par an). Si cette expression a incontestablement un côté pratique, elle n'en est pas moins peu réaliste dans la mesure où nous avons pu démontrer dans nos travaux antérieurs que l'érosion est un phénomène variable dans le temps. On se gardera donc d'utiliser ces données dans toute extrapolation à l'échelle du siècle, du millénaire et a fortiori des temps géologiques.

Tableau 3

pH	Vitesse d'écoulement de l'eau (cm/sec.)			
	1	10	50	100
4,0	2.163	5.728	11.315	15.171
5,0	782	2.070	4.089	5.483
(6,0)	282	748	1.478	1.982
(7,0)	102	270	534	716
(8,0)	37	98	193	259

Cette extrapolation au moyen de l'équation de régression multiple obtenue expérimentalement à la Helle, nous montre, par exemple, que pour une même vitesse d'écoulement de l'eau, la vitesse d'érosion du calcaire est 50 fois plus élevée lorsqu'on passe du pH 8 au pH 4 et environ 7 fois plus élevée pour un même pH lorsque la vitesse d'écoulement est 100 fois plus forte.

CONCLUSIONS

Ces expériences démontrent qu'il est difficile d'établir une vitesse d'érosion des calcaires, ni même son ordre de grandeur sans préciser au départ dans quelles conditions et sur quel type de calcaire cette érosion s'exerce.

La vitesse d'érosion des calcaires sous eau dépend directement de la **quantité** d'eau (surtout) mais aussi des **qualités** de l'eau s'écoulant sur la roche.

Les résultats obtenus dans la Helle corroborent ainsi tous les autres résultats obtenus précédemment.

Ils confirment le fait que l'étude de l'érosion sous eau est avant tout une question d'écoulement. **La vitesse d'érosion du calcaire est directement proportionnelle à la vitesse de cet écoulement.**

L'**acidité** de l'eau (pH) vient en seconde position. Un pH acide entraîne une vitesse d'érosion du calcaire plus forte.

La vitesse d'érosion des calcaires sous eau est différente suivant la **nature même du calcaire** étudié.

Dans cette expérience précise, nous n'avons pas pu mettre en évidence le rôle de la température de l'eau bien que dans les expériences préliminaires, elle paraissait être telle qu'une basse température entraîne une érosion plus forte. De même le rôle du degré hydrotimétrique n'a pu être confirmé par l'analyse statistique.

Ces expériences démontrent en outre que grâce à une méthode relativement simple, il est possible de prévoir dans une certaine mesure la vitesse des processus d'érosion des calcaires sous eau. Toutefois, ces "prévisions" restent subordonnées à la connaissance précise d'un certain nombre de variables, à l'invariabilité de ces conditions ou de certaines d'entre elles en cours d'expérience, enfin, à la répétition de ce type d'expérience.

BIBLIOGRAPHIE

- KUPPER, M., 1975. Recherches en Haute Belgique sur les vitesses de dissolution des calcaires soumis à l'action de l'eau de rivière. *Ann. de Spéol.*, 30 (2) : 255-265.
- MOREL, R., KUPPER, M. & EK, C., 1979. Vitesse de dissolution du calcaire sous l'effet de la fonte de la neige: expérience en milieu naturel. *Spéleo-Québec*, 6 : 12-25.