

Vitesse d'érosion en Belgique de calcaires d'âge primaire exposés à l'air libre ou soumis à l'action de l'eau courante¹

M. Kupper, A. Pissart

Laboratoire de Géologie et Géographie Physique de l'Université de Liège

Introduction

Aucune publication ne donne, à notre connaissance, des vitesses d'altération des pierres calcaires en Belgique. En étudiant l'érosion de pierres mises en œuvre, des indications au sujet de ces vitesses ont été obtenues, aussi bien pour des pierres exposées aux agents atmosphériques que pour des pierres sur lesquelles s'écoule l'eau de 2 rivières différentes.

Dans la première partie de cet article, nous présenterons les résultats de mesures d'érosion observées sur des pierres tombales placées dans des cimetières de la région liégeoise entre 1850 et 1967. En prenant soin de considérer des pierres qui étaient au départ très planes (pierres sciées ou polies), il a été possible de définir avec une précision fort satisfaisante la vitesse du phénomène.

Dans la seconde partie, nous décrirons l'importance de l'érosion qui affecte les pierres du barrage de la Soor et de divers barrages de l'Ourthe sur lesquels l'eau de ces rivières s'est écoulée pendant respectivement 20 ans et 115 ans. Nous montrerons ainsi que la vitesse de l'eau est le facteur principal qui contrôle l'érosion de pierres calcaires immergées dans de l'eau courante.

L'érosion qui affecte la surface des pierres étudiées est avant tout le résultat de phénomènes de dissolution. Toutefois, comme l'ont montré C. EK et H. ROQUES (1972) en d'autres circonstances, la dissolution entraîne le détachement de petits éléments qui sont emportés par l'eau de pluie et le vent. C'est pour cette raison que nous parlons généralement ici de vitesse d'érosion des pierres calcaires, plutôt que de vitesse de dissolution.

¹ Nous remercions très vivement Monsieur Camille EK, docteur en sciences géographiques, qui a discuté très fréquemment avec nous au cours de la réalisation de cette étude, qui a dirigé la détermination pétrographique des roches et les analyses d'eau. Les conseils que nous a donné également le Professeur P. MACAR nous ont été très précieux.

I. Vitesse d'altération des pierres tombales de la région liégeoise

A) LA MÉTHODE D'ÉTUDE

Le "petit granite", roche calcaire primaire d'âge Tournaisien, a été et est toujours très fréquemment utilisé dans la construction des monuments funéraires de la région liégeoise. Très souvent, les pierres mises en œuvre sont sciées ou polies avant d'être mises en place dans les cimetières, de telle sorte que leur surface présente alors très peu d'irrégularités. Lorsque ces dalles sont exposées aux agents atmosphériques, leur surface devient progressivement irrégulière en raison de la dissolution différentielle des constituants de la roche. Le "petit granite" est en effet formé de crinoïdes entiers ou en débris, fossilisés au sein d'une vase calcaire. Dans la roche, existent aussi parfois des rhomboèdres de dolomite et plus rarement des fossiles silicifiés. Ces variations lithologiques contrôlent une micro-érosion différentielle provenant principalement de ce que le ciment calcaire est beaucoup moins résistant que les fossiles silicifiés qui sont pratiquement insolubles.

L'importance de l'érosion qu'ont subi ces pierres peut être connue en mesurant le volume de calcaire emporté. Pour effectuer cette mesure, il faut connaître où se trouvait la surface originelle de la pierre avant toute dissolution. Une telle détermination est aisée lorsque la roche comprend des éléments silicifiés, car ils apparaissent en relief sur la pierre dissoute en conservant intacts des témoins de la surface originelle. En l'absence de ceux-ci, les parties les plus résistantes de la roche peuvent permettre de mesurer une valeur minimum de l'érosion. Les mesures comparatives effectuées en prenant ces deux types de différences, à savoir les fossiles silicifiés et les articles de crinoïdes moins solubles, ont donné des résultats comparables et, dans le présent article, nous ne les distinguerons pas.

Les mesures dont nous venons de donner le principe ont été réalisées en laboratoire à 0,025 mm près, sur des moulages en plasticine. Le profil de la pierre a été dessiné en effectuant des visées au microscope tous les 0,5 mm sur une distance de 2,5 cm. Les 50 points obtenus ont permis, parce que le moulage a été prélevé en un endroit judicieusement choisi, de dessiner la surface originelle. La moyenne arithmétique des 50 mesures effectuées a été considérée comme valeur caractéristique du microrelief de la dalle étudiée.

Diverses mesures ont été prises pour connaître les variations qui peuvent se produire lorsque une mesure est recommencée à partir d'un moulage différent effectué sur la même pierre. Les fluctuations paraissent atteindre 1/5 de la valeur mesurée pour un résultat moyen de 0,375 mm. Bien entendu, des erreurs accidentelles diverses peuvent s'ajouter, comme par exemple celle qu'entraîne, dans la durée d'exposition considérée, tout décalage entre la date du décès et le moment de la pose de la pierre tombale.

Malgré toutes ces erreurs, la méthode permet de préciser assez bien la vitesse d'érosion du "petit granite" parce que, comme nous allons le voir, les mesures sont multiples et que, seul, le résultat d'ensemble est pris en considération.

B) LES RÉSULTATS

La **figure 1** rassemble les résultats des 250 mesures qui ont été réalisées. La droite tracée par la méthode des moindres carrés a pour équation $Y = 0,00227X + 0,21$ dans laquelle

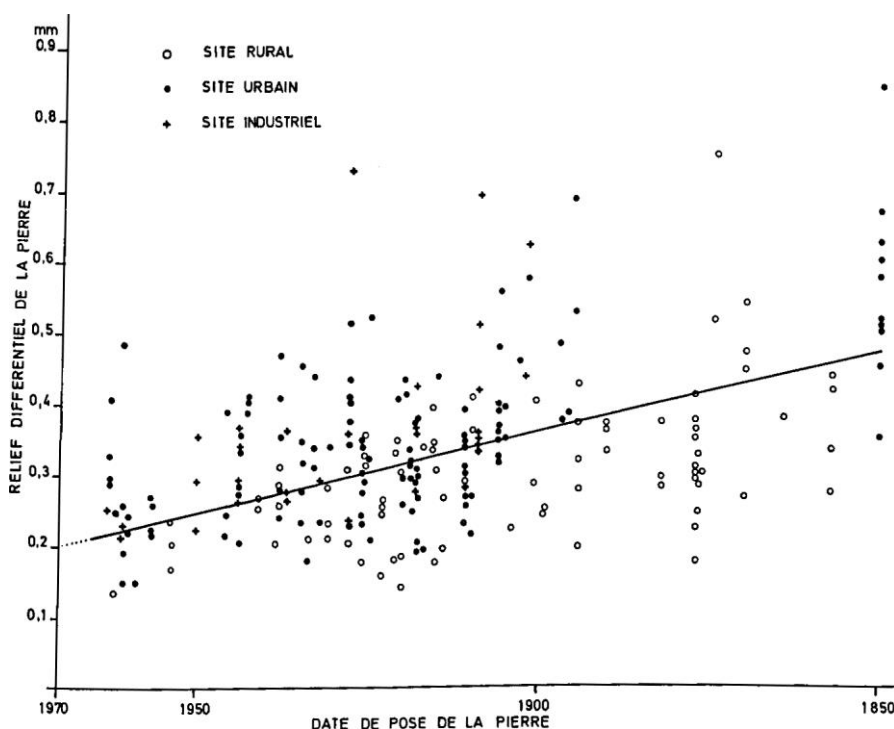
Y = la dimension moyenne des creux développés dans la pierre,

X = le nombre d'années séparant la date considérée de 1970.

Autrement dit, la pente de la droite indique que la dissolution moyenne de tous les "petits granites" étudiés est de *0,227 mm par siècle*. La valeur de 0,21 qui sépare la droite dessinée de l'abscisse à la date de 1971, signifie qu'au moment de la mise en place des pierres, un microrelief de valeur moyenne de 0,21 mm existait déjà. Des mesures diverses effectuées sur des surfaces sciées et meulées (identiques aux surfaces des pierres étudiées) n'ayant subi aucune dissolution, ont effectivement donné des valeurs de l'ordre de 0,18 mm, qui cadrent parfaitement avec la valeur de 0,21 mm indiquée sur la **figure 1**.

Fig. 1. Graphique montrant la relation existant entre le relief différentiel de toutes les pierres étudiées dans la région liégeoise et la date de leur mise en place. Ce graphique sépare les points obtenus dans les cimetières localisés dans des sites ruraux, urbains et industriels.

La droite dessinée a pour équation $Y = 0,00227 X + 0,21$.

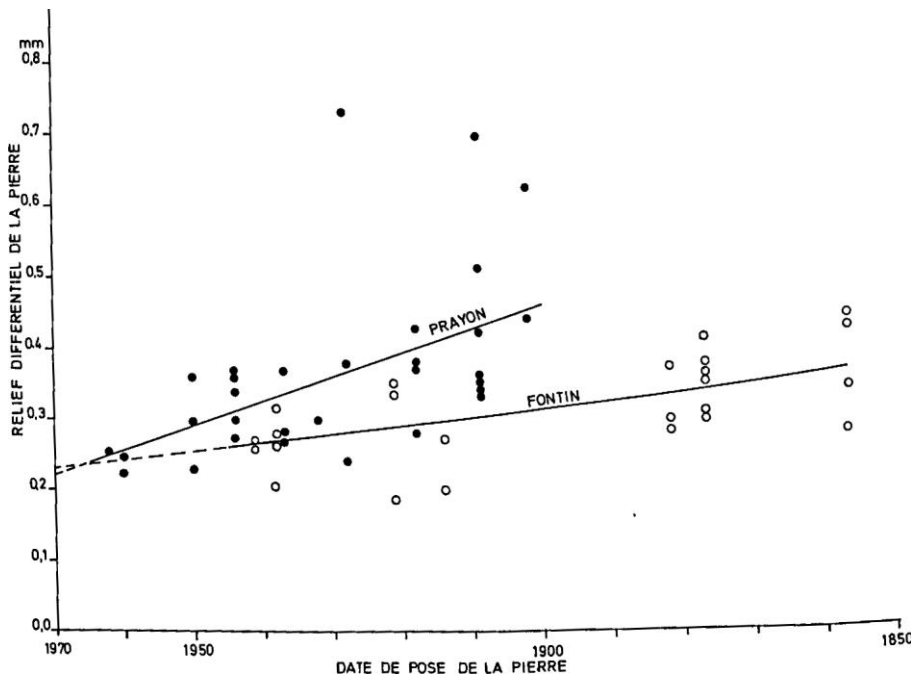


La dispersion des points sur la **figure 1** est considérable. Elle résulte du fait que sont mélangées des observations provenant de pierres situées dans des sites et dans des positions très diverses. Sont en effet rassemblées sur cette figure, les données provenant de cimetières ruraux, urbains et d'autres encore situés à proximité de sites industriels ; au sein de ces cimetières, des pierres verticales sont exposées aux quatre points cardinaux, d'autres sont horizontales, etc.

En isolant chacun des facteurs susceptibles d'intervenir, il a été possible de mettre en évidence leur importance dans la vitesse de dissolution. La **figure 2** montre ainsi que la vitesse de dissolution est trois fois plus rapide dans le cimetière de Prayon (0,365 mm/siècle) que dans celui de Fontin (0,12 mm/siècle). Le cimetière de Prayon est situé à une dizaine de kilomètres au SE de Liège, dans un site industriel, à proximité immédiate d'une usine à zinc. Le cimetière de Fontin est, par contre, à une douzaine de kilomètres au S de Liège dans un secteur rural où la pollution est particulièrement faible. Les valeurs obtenues pour les autres cimetières étudiés sont en relation immédiate avec leur degré de pollution, comme le montre le tableau ci-dessous :

Fontin	= milieu rural	0,120 mm/siècle
Juprelle	= transition entre le milieu rural et le milieu urbain	0,173 mm/siècle
Saint-Gilles	= site urbain caractéristique	0,239 mm/siècle
Sclessin	= transition entre le milieu urbain et le milieu industriel	0,245 mm/siècle
Prayon	= site industriel	0,365 mm/siècle

Fig. 2. Graphique montrant la vitesse de dissolution des pierres calcaires du cimetière de Prayon (site industriel : 0,365 mm par siècle) et de celui de Fontin (site rural : 0,120 mm par siècle).



Les différentes vitesses de dissolution selon les sites étudiés résultent des variations des composants atmosphériques. Il est vraisemblable que c'est avant tout l'activité humaine, et spécialement le dégagement d'anhydride sulfureux à la suite de la combustion du charbon qui est responsable du phénomène². En tous cas, dans le site industriel de Prayon, le dégagement de SO₂ est particulièrement important.

2 D'après E. LECLERC (1935), "la quantité de SO₂ rejetée dans l'atmosphère est en moyenne de 20 gr par kilo de charbon brûlé et ces 20 gr sont susceptibles de se transformer en 27 gr d'acide sulfurique pur".

Dans un même cimetière, l'érosion s'effectue à des vitesses différentes sur les pierres horizontales et verticales. De grandes différences existent aussi sur ces dernières suivant leur exposition. Dans les cimetières ruraux de Fontin et de Juprelle où les pierres sont orientées selon les quatre directions cardinales, les valeurs de la dissolution moyenne en mm par siècle sont les suivantes:

<i>Fontin :</i>	Pierres verticales :		
	Exposition	Nord	0,13
		Est	0,09
		Sud	0,12
		Ouest	0,18
	Pierres horizontales :		0,11
<i>Juprelle :</i>	Pierres verticales :		
	Exposition	Nord	0,10
		Est	0,06
		Sud	0,17
		Ouest	0,19
	Pierres horizontales :		0,13

Dans les cimetières urbains et industriels, où l'orientation des pierres est différente les valeurs suivantes ont été trouvées :

<i>Saint-Gilles :</i>	Pierres verticales :		
	Exposition	Nord Est	0,22
		Sud Est	0,25
		Sud Ouest	0,39
		Nord Ouest	0,18
	Pierres horizontales :		0,12
<i>Sclessin :</i>	Pierres verticales :		
	Exposition	Nord Est	0,17
		Sud Est	0,42
		Sud Ouest	0,54
		Nord Ouest	0,22
	Pierres horizontales :		0,10
<i>Prayon :</i>	Pierres verticales :		
	Exposition	Nord Est	0,34
		Sud Est	0,18
		Sud Ouest	0,41
		Nord Ouest	0,25
	Pierres horizontales :		0,10

La **figure 3** rassemble, pour chaque orientation des pierres verticales, les moyennes des vitesses de dissolution mentionnées ci-dessus. Par comparaison avec la **figure 4**, il apparaît clairement que les pierres exposées aux vents dominants et surtout aux vents pluvieux du SO subissent le

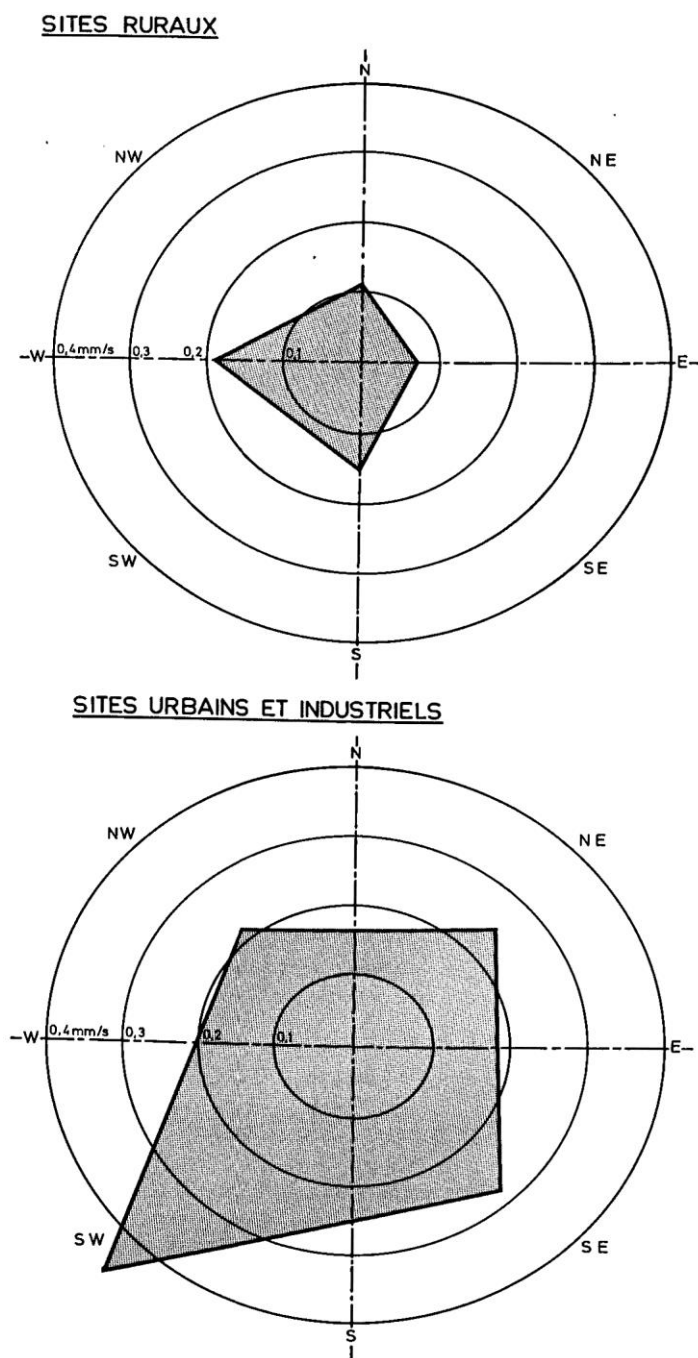
maximum d'érosion. La dissolution est deux ou trois fois moindre pour les pierres exposées à l'Est et au Nord.

La vitesse d'érosion des faces horizontales est toujours moins grande que celle des faces verticales les plus rapidement érodées.

C) CONCLUSION

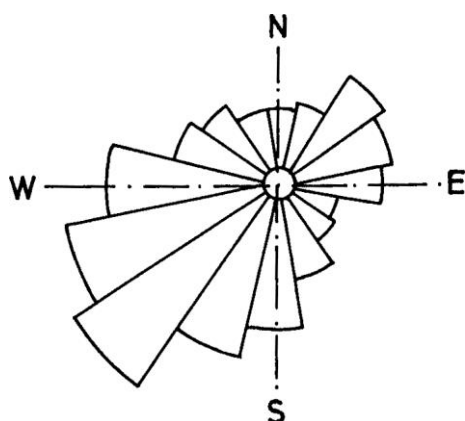
Si la vitesse moyenne d'érosion du "petit granite" fraîchement taillé et exposé aux agents atmosphériques dans la région liégeoise est de 0,25 mm par siècle, les valeurs varient cependant entre 0,54 et 0,06 mm/siècle. La première valeur résulte de mesures effectuées sur des faces verticales exposées au SO dans le cimetière de Sclessin, la seconde de mesures réalisées sur des faces verticales exposées à l'E dans le cimetière de Juprelle. La vitesse d'érosion du "petit granite" paraît donc, dans la région liégeoise, varier du simple au décuple selon les conditions locales. Une valeur précise pour caractériser le phénomène est donc sans signification ; ce qui importe, c'est son ordre de grandeur.

Fig. 3. Graphique dormant la dissolution des pierres verticales étudiées selon leur orientation. Le premier graphique rassemble les valeurs obtenues dans les cimetières ruraux de Fontin et de Juprelle ; le second donne les valeurs mesurées dans les cimetières urbains industriels de Saint-Gilles, Sclessin et Prayon.



A cet égard, signalons que les données obtenues sont sensiblement moins élevées que celles données par divers auteurs. En effet, J. CORBEL (1957) détermine une vitesse de 10 mm par siècle dans les Burren Hills ; A. BÖGLI (1961) obtient 1,51 mm par siècle dans les Alpes ; M. SWEETING (1966) mesure 4,08 mm par siècle au Nord Ouest du Yorkshire ; P. W. WILLIAMS (1968) montre un bloc erratique dans le bassin du Fergus en Irlande où la dissolution est d'environ 1,02 mm par siècle.

Fig. 4. Direction des vents à Uccle (Bruxelles) pour comparaison avec la **figure 3**. Figure extraite de l'Atlas National de Belgique, planche n° 12, préparée par L. PONCELET.



La comparaison des résultats obtenus dans la région liégeoise avec les valeurs que nous venons de rappeler, ne se justifie cependant pas ; les calcaires étudiés de part et d'autre sont, en effet, différents, les conditions climatiques ne sont pas les mêmes, et, dans cette brutale comparaison de chiffres, nous ne tenons pas compte des conditions locales.

L'étude réalisée montre que la technique employée permet d'obtenir de bons résultats ; toutefois, il faut souligner qu'une seule donnée est, en raison de l'importance des erreurs accidentelles, sans valeur. Seules les pentes de courbes tracées en se basant sur un grand nombre de mesures fournissent des valeurs significatives de la vitesse de l'érosion.

II. Vitesse de l'ablation de pierres calcaires par les eaux de rivières

A) LE DÉVERSOIR DE LA SOOR

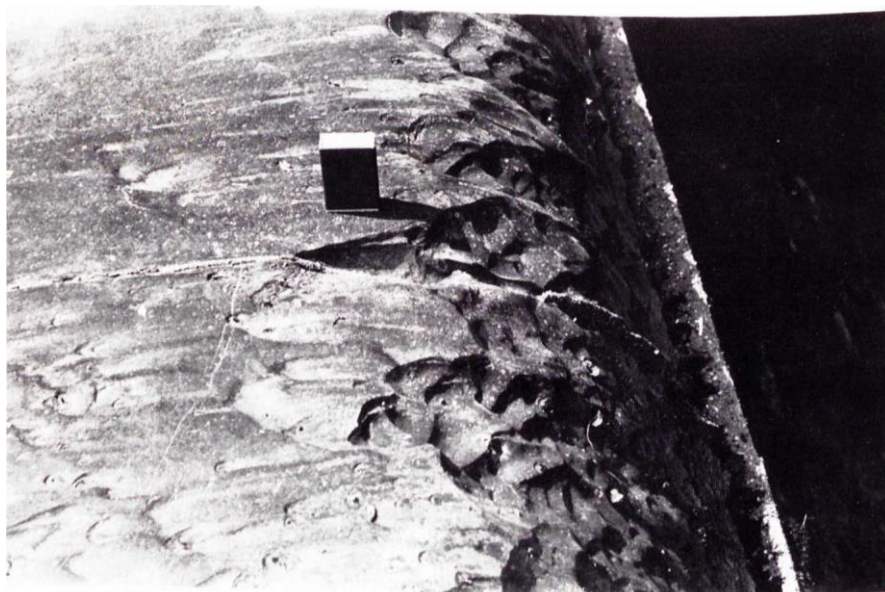
La comparaison des profils actuels et des profils originels des pierres calcaires du déversoir de la Soor sur lesquelles l'eau de cette rivière s'est écoulée pendant 20 ans, permet de mesurer l'importance de l'érosion qui s'est exercée pendant cette période.

La Soor est une petite rivière descendant du plateau des Hautes Fagnes et dont les eaux arrivent dans la Vesdre à Eupen. Les eaux de cette rivière sont très douces puisque le pH moyen mesuré à l'emplacement du barrage est de 3,90.

Les pierres sur lesquelles cette eau s'est écoulée sont formées d'un calcaire d'âge primaire dont la provenance exacte n'est pas connue. Il s'agit d'un calcaire de teinte gris foncé comprenant des fossiles divers : brachiopodes, articles de crinoïdes et coraux. D'une pierre à l'autre, l'abondance des fossiles qui sont emballés dans une pâte microgrenue varie.

Les pierres étudiées sont disposées à l'exutoire d'une retenue d'eau où se déposent les sédiments tractés au fond du lit et les sédiments déplacés par saltation (**Fig. 5**). Seul, l'impact de fines particules minérales en suspension a pu contribuer aux phénomènes d'érosion dont nous allons parler.

Fig. 5. Vue de pierres étudiées sur le barrage de la Soor.



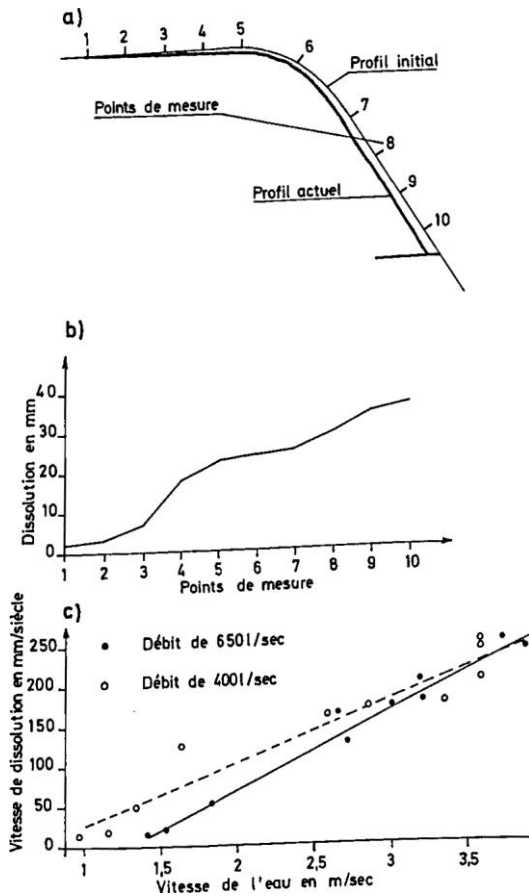
Ce barrage a été construit en 1952. Depuis lors cependant, l'eau ne s'est pas écoulee sans interruption sur les pierres du déversoir, car un tunnel soutire parfois les eaux du barrage. L'étude des enregistrements fournis par le limnigraphe installé sur le déversoir montre que, de 1952 à 1972, l'eau s'est écoulee environ pendant les deux tiers du temps soit pendant une durée continue approximative de 15 ans.

La **figure 6a** montre le profil initial d'une pierre étudiée et son profil actuel. L'épaisseur de calcaire enlevé a été mesurée en 10 points. Cette figure en donne la localisation. Bien entendu, étant donné les différences lithologiques, spécialement la présence de fossiles, la valeur de la dissolution n'est pas identique d'une pierre à l'autre. Les valeurs moyennes obtenues à partir des 35 profils étudiés (350 mesures) permettent de s'affranchir de ces variations. Elles sont rassemblées sur la **figure 6b** et montrent que l'érosion varie de 2 mm pour le point 1, à 38 mm au point 10, avec une augmentation constante de l'amont vers l'aval. Cette variation énorme de la vitesse d'érosion qui s'étale entre 13 et 240 mm par siècle est en relation immédiate avec le profil de la pierre, et plus spécialement avec la vitesse de l'eau qui s'écoule sur celle-ci. Des mesures de la vitesse de l'eau pour deux débits différents, effectuées aux dix points du profil étudié et leur comparaison avec l'importance de la dissolution, montrent une relation linéaire directe entre les 2 phénomènes (voir **figure 6c**). Il est normal d'ailleurs, quand on y réfléchit, que la vitesse d'écoulement de l'eau contrôle le phénomène de dissolution. Il en résulte que toute expression de la dissolution des calcaires soumis à l'action de l'eau courante des rivières doit non seulement préciser les caractères de la roche et ceux de l'eau, mais encore la vitesse de celle-ci à l'endroit considéré.

Fig. 6. Barrage de la Soor :

- a) Profil initial et profil actuel d'une pierre du barrage de la Soor. Les points de mesure sont les points où la distance entre ces 2 profils a été mesurée.
- b) Graphique donnant les valeurs moyennes de l'érosion des pierres du barrage de la Soor.

c) Graphique montrant les relations existant entre les dissolutions moyennes mesurées aux différents points de mesure et les vitesses d'écoulement de l'eau en ces endroits.



Etant donné les variations de débit de la Soor au cours de l'année, la vitesse de la lame d'eau qui s'est écoulée sur les pierres du déversoir a constamment varié. Dans ces conditions, on ne peut établir une vitesse de dissolution précise pour une vitesse déterminée d'écoulement de l'eau. Tout au plus, des approximations peuvent être fournies, comme celles que nous formulons ci-dessous.

Le débit moyen de la Soor pendant la période où l'eau s'est écoulée sur le déversoir est de 0,660 m³/sec (calcul effectué pour la période 1961 à 1966). Toutefois comme la dissolution est un phénomène continu, ce n'est pas le débit moyen qui est important, mais le débit qui s'est écoulé pendant le laps de temps le plus long. Or, le débit médian (dans le temps) est de l'ordre de 0,300 m³/sec. Nous ne possédons malheureusement pas les vitesses de l'eau sur le déversoir pour ce débit, mais seulement, comme nous l'avons vu sur la **figure 6c**, pour les débits de 0,650 m³/sec et 0,400 m³/sec. A partir de ces données très imprécises et comme première approximation, on peut estimer que l'eau de la Soor dissout les pierres calcaires du déversoir à la vitesse approximative de 100 mm par siècle lorsque l'eau s'écoule à la vitesse de 2 m par seconde, et à la vitesse de 160 mm par siècle quand l'eau coule à la vitesse de 3 m par seconde.

B) LES DÉVERSOIRS DE L'OURTHE

Les barrages étudiés ont été construits sur l'Ourthe (rivière qui se jette dans la Meuse à Liège) entre 1854 et 1857. Ils devaient assurer dans la rivière un mouillage minimum de 1,20 m et faisaient partie des travaux projetés pour relier la Meuse à la Moselle.

Les phénomènes d'érosion qui ont affecté les pierres de ces barrages ont été étudiés sur quatre ouvrages situés à Rivage, Esneux, Hony et Méry. Les pierres de ces déversoirs sont formées de calcaire primaire constitué d'une pâte microgrenue comprenant en proportion variable des articles de crinoïdes et d'autres fossiles. De petits rhomboèdres dolomitiques existent surtout à Hony et Méry.

Depuis la construction de ces barrages, il y a environ 120 années, l'eau de l'Ourthe, dont le pH varie entre 7.0 et 7.4, s'est écoulée pratiquement sans interruption sur les pierres étudiées.

En l'absence de repères, il n'a pas été possible de mesurer l'érosion des faces extérieures des pierres, comme cela a été fait dans la vallée de la Soor. Une seule mesure de la dissolution a pu être réalisée : elle porte sur l'ouverture des joints verticaux qui séparent deux pierres contiguës. L'eau s'est en effet infiltrée entre les pierres et a agrandi petit à petit l'espacement qui les sépare au point qu'actuellement, en certains endroits, cet espacement atteint 15 cm.

Des mesures de l'écartement maximum existant entre toutes les pierres des barrages ont été réalisées à la partie sommitale (où, vu la forme convexe du déversoir, la pente n'est pas très forte) et à la partie inférieure des barrages. La moyenne des 110 mesures réalisées de chaque côté est, pour le barrage de Rivage, que nous prendrons ici pour exemple, de 56 mm à la base et de 34 mm au sommet. Cette différence s'explique immédiatement par les différences de vitesse de l'eau en ces deux endroits.

Cette ablation pourrait être exprimée en parlant d'une vitesse de dissolution moyenne de 28 mm par siècle pour le sommet du barrage et de 47 mm par siècle pour la base, si du moins ces termes avaient une signification. Ils n'en ont cependant pratiquement aucune car, comme nous l'avons montré pour le barrage de la Soor, la vitesse de dissolution doit être exprimée en tenant compte de la vitesse d'écoulement de l'eau. Or, au cours des 120 ans considérés, celle-ci a sans cesse varié non seulement en fonction des débits, mais aussi avec l'élargissement progressif des joints mesurés. Par ailleurs, comme une certaine abrasion par les sédiments transportés par traction ou saltation sur le fond de la rivière a pu s'ajouter aux phénomènes de dissolution, nous n'avons pas considéré les valeurs obtenues comme représentatives de la vitesse de dissolution.

Les variations d'ablation reconnues pour les quatre barrages étudiés peuvent s'expliquer essentiellement par les différences de vitesse d'écoulement de l'eau. Bien entendu, les vitesses sont très différentes de celles qui ont été trouvées à la Soor et cela en raison des qualités différentes de l'eau.

Conclusion

Cet article a avant tout pour but de faire connaître des techniques d'étude originales permettant de déterminer la vitesse d'érosion des calcaires. Ces techniques ont permis de chiffrer la vitesse

d'érosion de dalles polies de "petit granite" exposées aux agents atmosphériques au cours du dernier siècle, et de déterminer la vitesse d'érosion de dalles calcaires immergées pendant plusieurs dizaines d'années dans l'eau de rivières.

L'un de nous (M. KUPPER) étend actuellement ce travail et s'efforce entre autres de mettre en évidence l'importance des facteurs climatiques dans ce domaine.

Summary

Measurements of the rate of weathering have been made on tomb-stones of "petit granite" (Lower Carboniferous limestone), by determining the amount of relief developed on the polished or sawn surface after exposure to atmospheric processes for a period of between 5 and 120 years. The results give a mean value of erosion of 0.25 mm a century for all stones studied, ranging from 0.12 mm for a rural cemetery to 0.365 mm for a cemetery in an industrial district. Solution is clearly more rapid on stones exposed to the main rain-bearing winds.

Erosion due to the flow of water over limestone blocks forming the top of the Ourthe and Soor dams has also been measured. The reliefs of the blocks in the case of the Ourthe indicate a rate of erosion of between 2.5 and 30 mm a century over a period of 115 years, those of the Soor dam a rate of between 2 and 245 mm a century after 15 years of flow. Solution here is determined above all by the rate of flow of the water.

Bibliographie

- BOGLI, A. (1961) : Karrentische, ein Beitrag zur Karstmorphologie. *Zeitschr. Geomorph.*, N.F., 5, 3, 93–185.
- CORBEL, J. (1957) : Les karsts du Nord-Ouest de l'Europe. *Mem. Doc. Inst. Etudes Rhodaniennes*, Lyon 12.
- EK, C. et ROQUES, H. (1972) : Dissolution expérimentale de calcaires dans une solution de gaz carbonique. Note préliminaire. *Trans. of the cave research group of Great Britain*, vol. 14, p. 67–82.
- SWEETING, M.M. (1966) : The weathering of limestone. In *Essays in geomorphology*, ed. G.H. Dury, 177–210.
- WILLIAMS, P.W. (1968) : An initial estimate of the speed of limestone solution in Country clare. *Irish geogr.*, 4, 6, 432–441.