

RECHERCHES DANS LA RÉGION LIÉGEOISE (BELGIQUE)  
SUR L'ALTÉRATION DES PIERRES CALCAIRES  
EXPOSÉES A L'AIR LIBRE (\*) (\*\*)

par MIRIAM KUPPER (\*\*\*)

(6 fig. et 2 photographies dans le texte)

RÉSUMÉ

Les vitesses différentielles d'altération (\*\*\*\*) des pierres calcaires soumises à l'action des agents atmosphériques ont été étudiées sur les pierres tombales de la région liégeoise.

Grâce à une méthode nouvelle, l'auteur a pu mesurer cette dissolution et mettre en lumière les facteurs qui la contrôlent, à savoir la situation en milieu rural, urbain ou industriel, l'exposition, la position des dalles, la présence de végétaux épilithiques et la hauteur par rapport au sol. Il a mesuré la dissolution différentielle entre les parties plus ou moins résistantes de la pierre et obtient comme valeur moyenne la vitesse de dissolution de 0,25 mm par siècle.

ABSTRACT

The differential rates of weathering of limestone exposed to atmospheric processes have been studied on tombstones from the region of Liège (Belgium). Thanks to a new method, it has been possible to measure the amount of dissolution and to throw light on the processes involved.

By measuring the differential solution between the more or less resistant parts of the stone, the author obtains a mean value of 0,25 mm/century for the rate of dissolution.

ZUSAMMENFASSUNG

Mit einer neuen Methode, ist die Geschwindigkeit der Beschädigung des Kalksteins bei Verwitterung auf Gebäuden gemessen.

Die mittlere Geschwindigkeit der Lösung ist 0,25 mm pro Jahrhundert in den Umgebungen von Lüttich (Belgien).

Gesucht werden die eigenen Bedingungen, die Unterschiede der Lösungsgeschwindigkeit herbeiführen.

(\*) Communication présentée le 4 février 1975. Manuscrit déposé le 17 janvier 1975.

(\*\*) Cet article reprend brièvement les principaux résultats d'une partie d'un mémoire de licence que nous avons consacré aux « Vitesses d'altération des calcaires, Première partie : l'altération par les agents atmosphériques ». Université de Liège, 1972.

(\*\*\*) Miriam KUPPER, aspirant au Fonds National belge de la Recherche Scientifique, Laboratoire de Géologie et Géographie physique, Université de Liège, place du Vingt-Août 7, B-4000 Liège.

(\*\*\*\*) « altération » : Par ce terme, H. Baulig [1] entend le « résultat des modifications complexes subies par la partie superficielle des roches exposées aux agents atmosphériques ». Ce terme est couramment utilisé dans la littérature traitant de l'action des agents atmosphériques sur les pierres de taille. C'est dans ce sens large que nous l'utilisons ici.

## I. INTRODUCTION

1.1. *But de l'étude*

Le présent article est consacré à l'étude des vitesses différentielles d'altération des pierres calcaires mises en œuvre à une date connue.

Cette étude a été réalisée dans le but de connaître les vitesses des processus morphologiques qui régissent l'altération des calcaires naturels.

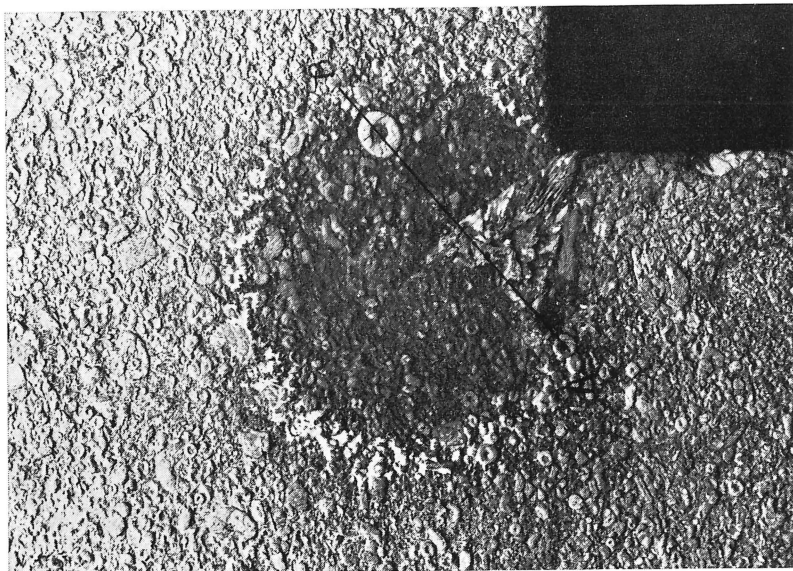
Notre objectif a été de quantifier l'ablation (\*) de calcaire au cours du temps puis de dégager les différentes influences susceptibles d'expliquer les variations décelées.

1.2. *Technique de mesure*

Nous avons étudié les pierres tombales de divers cimetières de l'agglomération liégeoise, taillées dans du « petit granit ».

Le « petit granit » est un calcaire crinoïdique tournaisien (T2b = Tn3) dont la matrice est tantôt cristallisée, tantôt constituée d'une pâte fine (cristaux de moins de 5 microns). La teneur en carbonate est toujours très élevée (95 à 100 %); la teneur en dolomite toujours inférieure à 10 %.

Le « petit granit » a l'avantage de présenter, après dissolution (\*\*), un relief différentiel, car des fossiles restent en relief au sein d'un ciment plus dissous (voir photographie a).



Photographie a. — Surface présentée par le petit granit après dissolution.

(\*) Bien que le mot « ablation » soit peu employé en français, nous en ferons ici usage dans le sens que lui accorde la littérature allemande : « enlèvement de substance à une roche pour quelque cause que ce soit (physique, chimique ...) ».

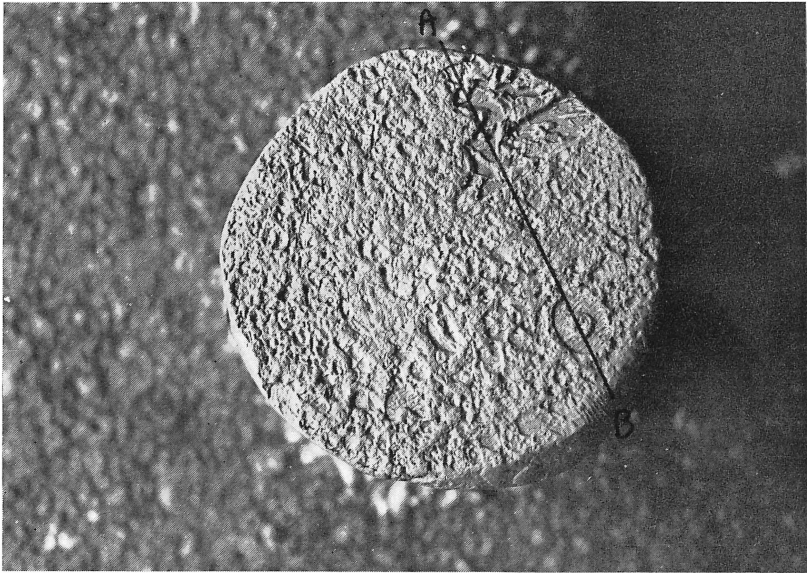
(\*\*) Dans un sens plus strict, nous parlons ici de « dissolution » et non plus d'« altération » (sens plus large).

En effet, comme le souligne P. Macar [2] : « Bien que la dissolution dans l'eau pure

Étant donné l'aspect plan de la surface-enveloppe passant par les sommets des fossiles restés le plus en relief, nous avons considéré celle-ci comme représentant la surface originelle de la pierre, tout en sachant que ces fossiles eux-mêmes étaient déjà affectés par la dissolution.

Nous avons estimé la quantité de calcaire enlevée en mesurant la distance séparant la surface-enveloppe passant par les sommets des fossiles et la surface actuelle de la pierre.

Cette mesure a été effectuée sur des moulages réalisés au moyen de pâte à modeler après un dépoussiérage soigneux de l'endroit choisi. La photographie b montre le moulage effectué sur la pierre présentée à la photographie a.



Photographie b. — Moulage effectué sur la pierre présentée à la photo a.

L'endroit du moulage a été judicieusement sélectionné de façon à éviter des influences accidentelles évidentes (par exemple : un joint stylolithique) et de manière à pouvoir faire ressortir les facteurs susceptibles d'influencer les vitesses différentielles de dissolution (par exemple : des moulages ont été effectués sur les quatre faces des pierres afin de mettre en évidence l'influence de l'exposition).

Les profils du moulage sont ensuite dressés en examinant l'échantillon au microscope.

Le profil est réalisé en mettant au point au moyen de la vis micrométrique du microscope le relief observé.

L'expérience nous a montré que, pour obtenir des profils statistiquement significatifs, il convenait de prendre une mesure tous les demi-millimètres le long de l'axe de mesure.

soit à proprement parler un phénomène physique, l'action de l'eau est principalement du domaine chimique ». De plus, l'élimination des produits de la dissolution est immédiate. Pour désigner l'action subie par les pierres calcaires (roches solubles), soumises aux agents atmosphériques ce terme nous semblait le plus adéquat.

Les points ainsi obtenus sont reportés sur un graphique. Nous avons ensuite procédé au calcul de la distance de chacun des points observés à la droite de référence, c'est-à-dire à la droite passant par les points bas du graphique ou points bas de la pierre.

Le profil est choisi à l'endroit du moulage présentant des fossiles particulièrement en relief.

La figure 1 est le graphique obtenu suivant le profil A-B des photographies a et b.

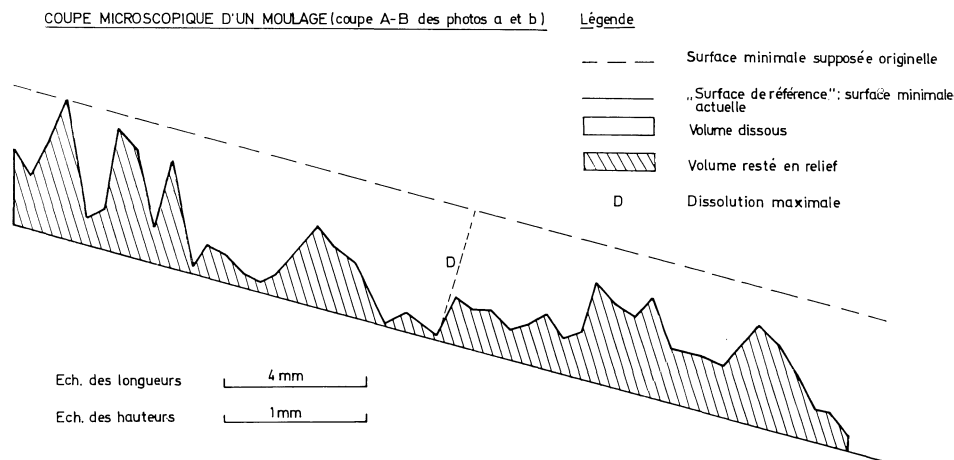


Fig. 1. — Graphique obtenu suivant le profil A-B des photographies a et b.

Pour chaque échantillon prélevé, nous avons calculé :

- 1° la moyenne arithmétique des distances des points à la droite de référence. Cette moyenne donne ainsi un résultat chiffré de la dissolution moyenne minimale.
- 2° la distance maximale à la droite de référence, ce qui donne la valeur de l'écart maximum entre la surface originelle et la surface actuelle de la pierre, c'est-à-dire la dissolution maximale, à condition que le point le plus élevé n'ait pas subi lui-même de dissolution.

## II. LES RÉSULTATS OBTENUS

Les résultats de l'étude de quelques 250 échantillons sélectionnés sont présentés ci-dessous.

Nous considérerons successivement :

- 2.1. Les vitesses de dissolution.
- 2.2. Les influences lithologiques.
- 2.3. L'influence du milieu (rural, urbain, industriel).
- 2.4. L'influence de l'exposition et de la position.
- 2.5. L'influence de la distance au sol.
- 2.6. L'influence de la présence des végétaux épilithiques.

2.1. *Les vitesses de dissolution*

La figure 2 rassemble les résultats des 250 mesures 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 de la pose de la pierre de 1971.

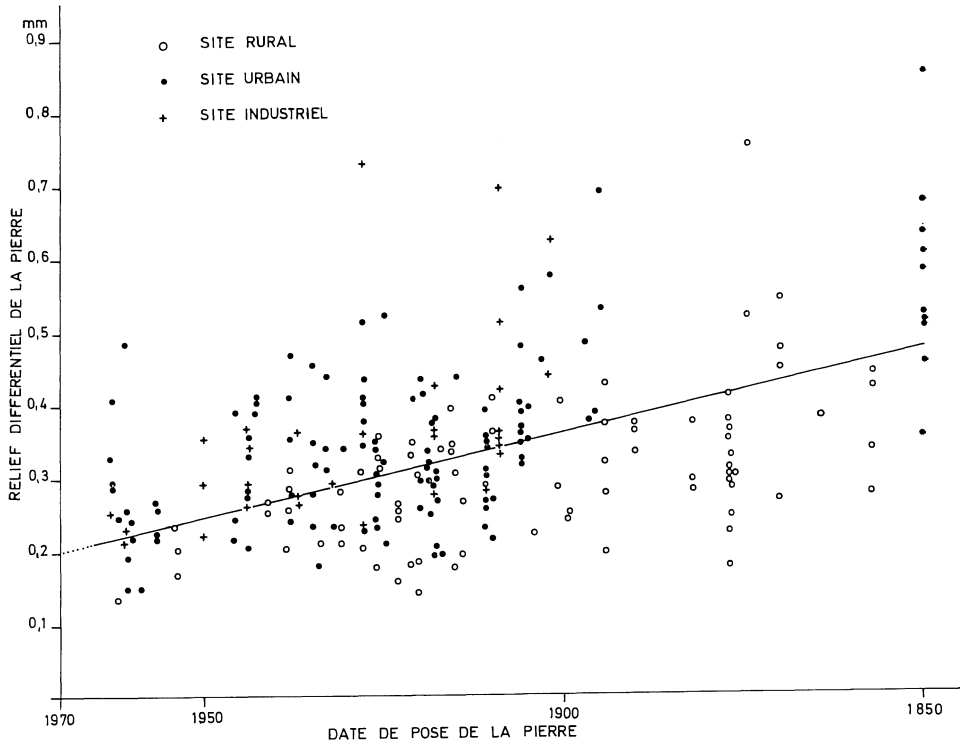


Fig. 2. — en ordonnée :  $y$  = dimension moyenne des creux développés dans la pierre.  
en abscisse :  $x$  = le nombre d'années séparant la date de la pose de la pierre de 1971.

Autrement dit, la pente de la droite indique que la dissolution moyenne des « petits granits » étudiés est de 0,227 mm par siècle. La valeur de 0,21 qui sépare la droite dessinée de l'abscisse en 1971, signifie qu'au moment de la mise en place de la pierre, 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 2.

La dispersion des points sur la figure 2 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.

La dissolution maximale observée est de 0,56 mm par siècle environ.

Par ailleurs, dans quelques cas, nous avons découvert dans les pierres tombales des fossiles silicifiés. La présence de ces éléments siliceux est du plus grand intérêt puisque ce n'est qu'en considérant de tels fossiles comme repères de la surface originelle que l'on mesure l'importance réelle de la dissolution. En effet, on peut supposer que la silice subit une action négligeable de la dissolution — et même une action insignifiante dans les eaux météoriques naturelles — eu égard à l'action exercée sur le calcaire (\*). La dissolution moyenne générale donnée ici est donc

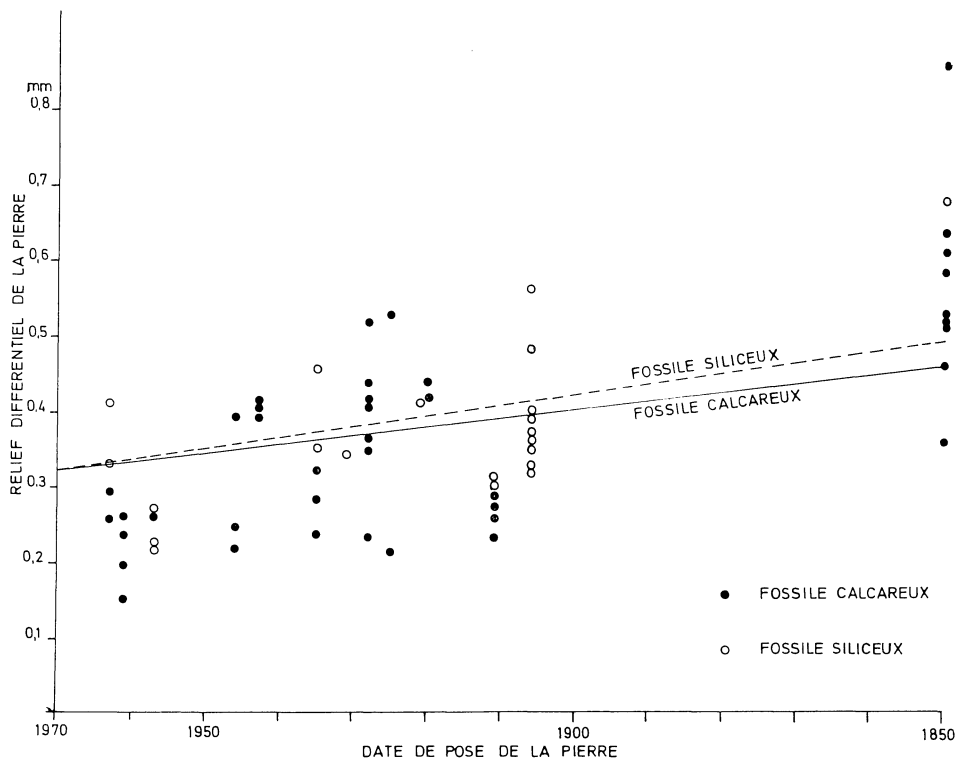


Fig. 3. — Relief différentiel des pierres en fonction de leur date de pose. Comparaison entre les moulages effectués sur des fossiles siliceux et sur des fossiles calcaireux.

légèrement inférieure à la réalité, du seul fait que les fossiles calcaireux au départ desquels la surface originelle est estimée, subissent, eux aussi, la dissolution. A titre d'exemple, nous donnons ici les résultats obtenus sur les mêmes moulages mais en considérant dans un cas les fossiles calcaireux et dans l'autre cas les fossiles siliceux (ex. fig. 3).

(\*) Communication orale de C. Эк.

A. FONTIN (milieu rural)

Temps d'exposition	Mesure par rapport à un fossile siliceux	Mesure par rapport à un fossile calcaireux
78 ans	0,551 mm/siècle	0,356 mm/siècle
43 ans	0,719 mm/siècle	0,474 mm/siècle

B. SAINT GILLES (milieu urbain)

60 ans	0,525 mm/siècle	0,452 mm/siècle
36 ans	0,964 mm/siècle	0,653 mm/siècle

SITUATION GEOGRAPHIQUE DES CIMETIERES

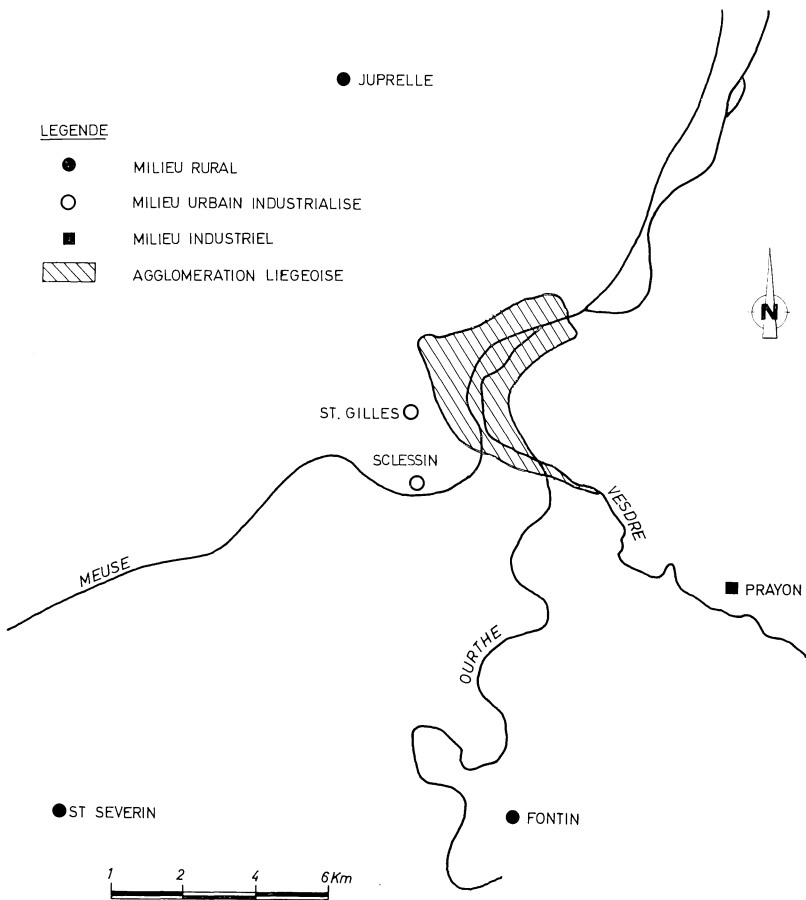


Fig. 4. — Situation géographique des différents cimetières étudiés.

## 2.2. Les influences lithologiques

Des lames minces effectuées au sein des échantillons prélevés dans les bancs ordinairement utilisés pour l'édification des monuments funéraires d'une part, et, d'autre part, au sein d'échantillons en provenance de dalles brisées, ont montré des faciès peu différenciés.

Au vu de cette constatation et comme nous avons restreint notre étude au seul « petit granit », nous avons estimé que l'influence des variations lithologiques était négligeable vis-à-vis des autres facteurs.

## 2.3. L'influence du milieu (voir localisation sur la figure 4)

Les 250 dalles étudiées ont donc été choisies dans différents cimetières :

La figure 5 montre ainsi que la vitesse de dissolution est trois fois plus rapide dans le cimetière de Prayon (0,365 mm par siècle) que dans celui de Fontin (0,12 mm par 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 sud de Liège, dans un secteur rural où la pollution est particulièrement faible. Les valeurs obtenues pour

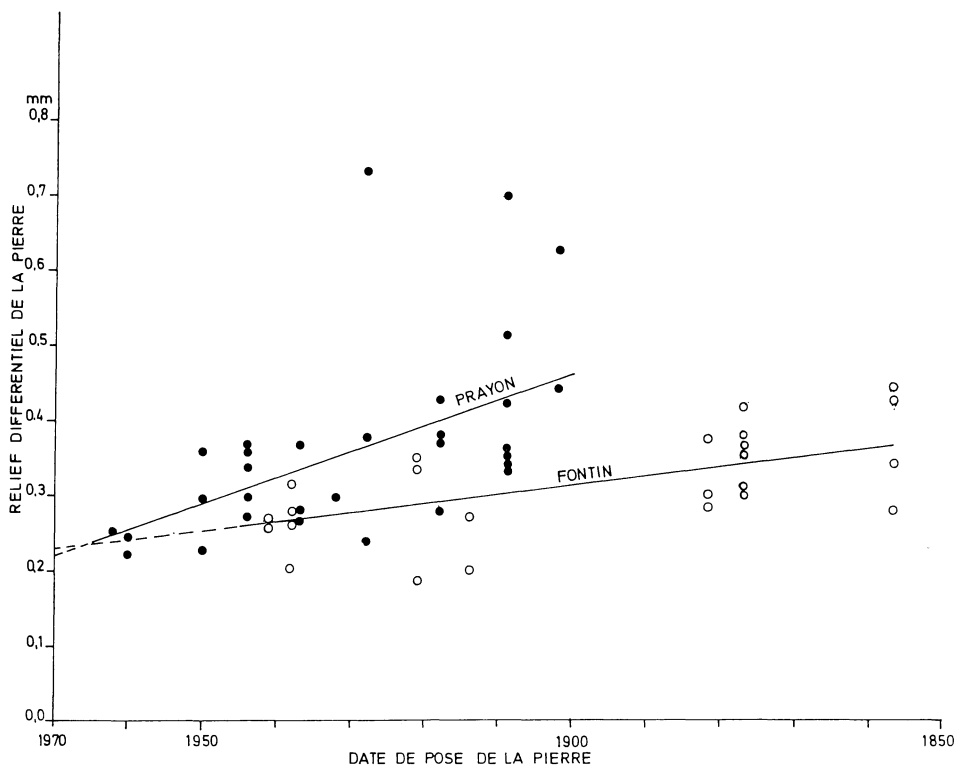


Fig. 5. — Relief différentiel des pierres en fonction de leur date de pose. Comparaison entre les dalles d'un cimetière d'une région rurale (Fontin) et celles d'un cimetière d'une région fortement industrialisée (Prayon).



les autres cimetières étudiés sont en relation immédiate avec leur degré de pollution comme le montre le tableau suivant :

Fontin (milieu rural)	0,120 mm/siècle
Juprelle (transition milieu rural et milieu urbain)	0,173 mm/siècle
Saint-Gilles (site urbain caractéristique)	0,239 mm/siècle
Sclessin (transition milieu urbain et milieu industriel)	0,245 mm/siècle
Prayon (site industriel)	0,365 mm/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 phénomène (\*). En tous cas, dans le site industriel de Prayon, le dégagement de  $\text{SO}_2$  est particulièrement important.

#### 2.4. L'influence de l'exposition et de la position

Dans un même cimetière, la dissolution 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 suivant les directions des points cardinaux, les vitesses moyennes de la dissolution (en mm par siècle) sont les suivantes :

<i>Fontin</i> :	Pierres verticales
	exposition
	N 0,13
	E 0,09
	S 0,12
	W 0,18
	Pierres horizontales
	0,11
<i>Juprelle</i> :	Pierres verticales
	exposition
	N 0,10
	E 0,06
	S 0,17
	W 0,19
	Pierres horizontales
	0,13

Dans les cimetières urbains industriels orientés suivant les sous-points cardinaux, nous avons obtenu les valeurs suivantes :

(\*) En raison de l'adaptation des moyens de transport, le « petit granit » n'a fait son apparition dans une utilisation courante, dans la région liégeoise, que vers 1850. Ceci nous porte à ne considérer que des pierres tombales ayant au maximum un peu plus d'un siècle.

<i>Saint-Gilles</i> :	Pierres verticales
exposition	NE 0,22
	SE 0,25
	SW 0,39
	NW 0,18
	Pierres horizontales
	0,12
<i>Sclessin</i> :	Pierres verticales
exposition	NE 0,17
	SE 0,42
	SW 0,54
	NW 0,22
	Pierres horizontales
	0,10
<i>Prayon</i> :	Pierres verticales
exposition	NE 0,34
	SE 0,18
	SW 0,41
	NW 0,25
	Pierres horizontales
	0,99

La figure 6 rassemble, pour chaque orientation des pierres verticales, les moyennes des vitesses de dissolution mentionnées ci-dessus. Il apparaît clairement que les pierres exposées aux vents pluvieux du SW subissent le maximum de dissolution. Pour les pierres exposées au N et à l'E, la dissolution est 2 ou 3 fois moindre.

Par ailleurs, la vitesse de dissolution des faces horizontales est toujours moins grande que celle des faces verticales les plus rapidement dissoutes.

### 2.5. *L'influence de la distance au sol*

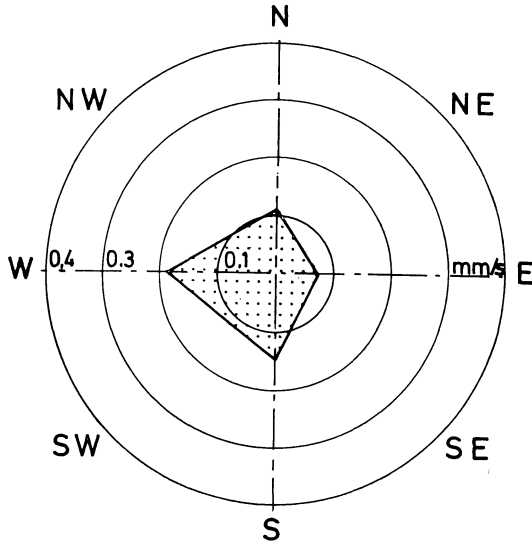
L'étude de la position nous a permis de déceler des variations dans les vitesses de dissolution quand on considère des dalles placées à des hauteurs différentes par rapport au sol, qu'elles soient horizontales ou verticales.

C'est dans le but de voir si l'effet du « splash » (éclaboussures du bas des pierres par les eaux arrivant au sol ou sur une dalle horizontale) joue sur la dissolution, qu'un tel chapitre a été abordé. Toutefois, jusqu'ici, les résultats n'ont guère été probants.

### 2.6. *L'influence des végétaux épilithiques*

La présence des végétaux épilithiques : lichens (*candellariella aurella*, *lecanora dispersa* et *muralis* ...), mousses (*Bryum argenteum*, *ceratodon purpureus* ...), algues (*Protococcus* surtout) semblent freiner les vitesses de dissolution (rôle protecteur). Cependant, le nombre restreint d'échantillons qui a pu être étudié ne nous permet guère de conclure.

SITES RURAUX



SITES URBAINS ET INDUSTRIELS

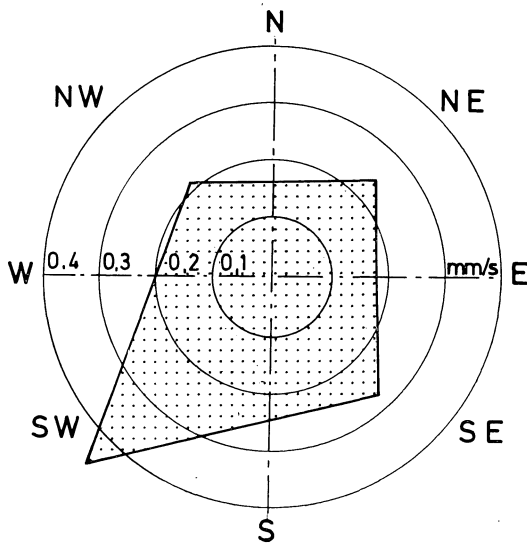


Fig. 6. — Les vitesses de dissolution suivant l'orientation des dalles.

## CONCLUSIONS

Si la vitesse moyenne de dissolution du « petit granit » 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 par siècle. La première valeur résulte de mesures effectuées sur des faces verticales exposées au sud-ouest dans le cimetière de Sclessin, la seconde, de mesures réalisées sur des faces verticales exposées à l'est dans le cimetière de Juprelle.

La vitesse de dissolution du « petit granit » paraît donc, dans la région liégeoise, varier du simple au décuple selon les conditions locales. Une valeur précise isolée pour caractériser le phénomène est donc sans grande signification.

A ce propos, signalons que les valeurs obtenues par nous sont sensiblement moins élevées que celles données par divers auteurs.

En effet, J. Corbel (1957) [3] détermine une vitesse de 10 mm par siècle dans les Burren Hills. A. Bögli (1961) [4] obtient 1,51 mm par siècle dans les Alpes. M. Sweeting (1966) [5] mesure 4,08 mm par siècle au Nord-Ouest du Yorkshire; P. W. Williams (1968) [6] montre un bloc erratique dans le bassin du Fergus en Irlande où la dissolution est d'environ 1,02 mm par siècle.

La comparaison des résultats obtenus dans la région liégeoise avec les valeurs que nous venons de rappeler montre des différences très nettes. Celles-ci sont probablement dues au fait que les calcaires étudiés, les conditions climatiques et locales (région industrielle ou non, précipitations plus ou moins réduites...) ainsi que les méthodes de mesure (bicarbonate de Ca en solution dans l'eau) sont différentes.

En conclusion, les résultats établis sont encourageants et montrent l'efficacité de la technique employée.

Toutefois, en terminant, il faut souligner qu'une seule donnée est, en raison de l'importance des erreurs accidentelles, sans grande valeur. Seules les pentes moyennes des courbes tracées en se basant sur un grand nombre de mesures fournissent des valeurs significatives de la vitesse de dissolution.

## BIBLIOGRAPHIE

- [1] BAULIG, H., 1970. — Vocabulaire Franco-Anglo-Allemand de Géomorphologie. *Publ. Fac. Lettres de Strasbourg*, t. IV, Gap.
- [2] MACAR, P., 1946. — Principes de Géomorphologie Normale, Liège.
- [3] CORBEL, J., 1957. — Les karsts du Nord-Ouest de l'Europe. *Méms. Docs. Inst. Études Rhodaniennes*, Lyon 12.
- [4] BOGLI, A., 1961. — Karrentische ein Beitrag zur Karstmorphologie. *Zeits. Geomorph.*, N.F. 5, 3, 93-185.
- [5] SWEETING, M. M., 1966. — The weathering of Limestone. In *Essays in geomorphology*, ed. G. H. Dury, 177-210.
- [6] WILLIAMS, P. W., 1968. — An initial estimate of the speed of Limestone solution in Country clare. *Irish. geogr.*, 4, 6, 432-441.