

SEANCE MENSUELLE DU 20 JANVIER 1953.

Présidence de M. A. GROSJEAN, président.

Dons et envois reçus :

De la part des auteurs :

- 10742 ... Carte géologique de l'Espagne et Portugal, publiée par l'Institut Géologique et Minier d'Espagne. 3^e édition. Madrid, 1952 (4 feuilles).
- 10743 ... Memoria que el Director de la Biblioteca Nacional presenta al Sr. Ministro de Educacion Publica, 28 de Julio de 1950-31 de Diciembre de 1951. Lima, 1952, 40 pages.
- 10744 *Ancion, Ch. et Cahen, L.* Les minerais de fer du Congo belge. Bruxelles (?), 1952, 17 pages et 1 carte.
- 10745 *Bailey, Sir E.* Geological Survey of Great Britain. London, 1952, 278 pages, 39 figures et 4 planches.
- 10746 *Chaudoir, H., Lambrecht, L., PASTIELS, A. et Willière, Y.* Étude géologique du Bassin houiller de Liège. La concession Espérance, Violette et Wandre. Bruxelles, 1952, 132 pages et 5 planches.
- 10747 *Deleers, Ch. et PASTIELS, A.* Contribution à l'étude biométrique de *Lingula Mytilloides* SOWERBY du Westphalien de la Belgique. Bruxelles, 1952, 67 pages et 14 planches.
- 10749 *Laurentiaux, D.* Découverte d'un *Homoptère Prosboloïde* dans le Namurien belge. Bruxelles, 1956, 16 pages et 2 planches.
- 10750 *Lombard, A. et Zimmermann, A.* Himalaya. Rapports sur les travaux de la Mission scientifique déléguée par les autorités cantonales et municipales de Genève, mars-juillet 1952. Genève-Paris, 1953, 56 pages, 16 illustrations, 2 croquis et 5 cartes.
- 10751 *Université d'Alger.* Travaux de l'Institut de Recherches sahariennes, tome VIII. Alger, 1952, 239 pages, figures et 1 carte.
- 10752 *Sluys, M.* La géologie des environs de Stanleyville. Gembloux, 1952, 10 pages.
- 10753 ... XIX^e Congrès géologique International. Résumés des communications parvenus au secrétariat avant le 1^{er} juillet 1952. Alger, 1952, 175 pages.

- 10754 *Alimen, H., Le Maître, D., Menchikoff, N., Petter, G. et Poueyto, A.* Les chaînes d'Ougarta et la Saoura. Alger, 1952, 114 pages, 7 planches et 26 figures.
- 10755 *Arambourg, C.* La paléontologie des vertébrés en Afrique du Nord française. Alger, 1952, 62 pages.
- 10756 *Bolfa, J., Hilly, J. et Roubault, M.* Massifs cristallins du Nord-Constantinois. Alger, 1952, 183 pages, 44 figures et 1 carte.
- 10758 *Duplan, L.* La région de Bougie. Alger, 1952, 39 pages, 15 figures et 2 planches.
- 10759 *Flandrin, J.* La chaîne du Djurdjura. Alger, 1952, 48 pages.
- 10760 *Follot, J.* Ahnet et Mouydir. Alger, 1952, 80 pages, 36 figures et 4 planches.
- 10761 *Glangeaud, L.* Histoire géologique de la province d'Algèr. Alger, 1952, 141 pages, 41 figures et 3 planches.
- 10762 *Gourinard, V.* Le littoral oranais (Mouvements verticaux et anomalies gravimétriques). Alger, 1952, 62 pages, 14 figures et 5 planches.
- 10763 *Lucas, G.* Bordure Nord des Hautes Plaines dans l'Algérie occidentale. Primaire, Jurassique. Analyse structurale. Alger, 1952, 139 pages et 59 figures.
- 10764 *Repal, S. N.* Le Bassin Néogène du Chéelif. Alger, 1952, 53 pages et 1 carte.
- 10765 *Repal, N. S.* Régions Sud-Telliennes et Atlas Saharien. Alger, 1952, 39 pages, 3 figures et 7 planches.
- 10766 *Sadran, G.* Les roches cristallines du littoral oranais. Alger, 1952, 78 pages et 16 figures.
- 10767 *Sigal, J.* Aperçu stratigraphique sur la micropaléontologie du Crétacé. Alger, 1952, 45 pages et 46 figures.
- 10768 *Visse, L.* Genèse des gîtes phosphatés du Sud-Est algéro-tunisien. Alger, 1952, 58 pages et 2 planches.
- 8443 *Corsin, P.* Études des gîtes minéraux de la France. Bassin houiller de la Sarre et de la Lorraine. I. Flore fossile. 4^e fascicule. *Pécoptéridées*. Loos-Nord, 1951, 197 pages et planches CVIII-CIC.

Communications des membres :

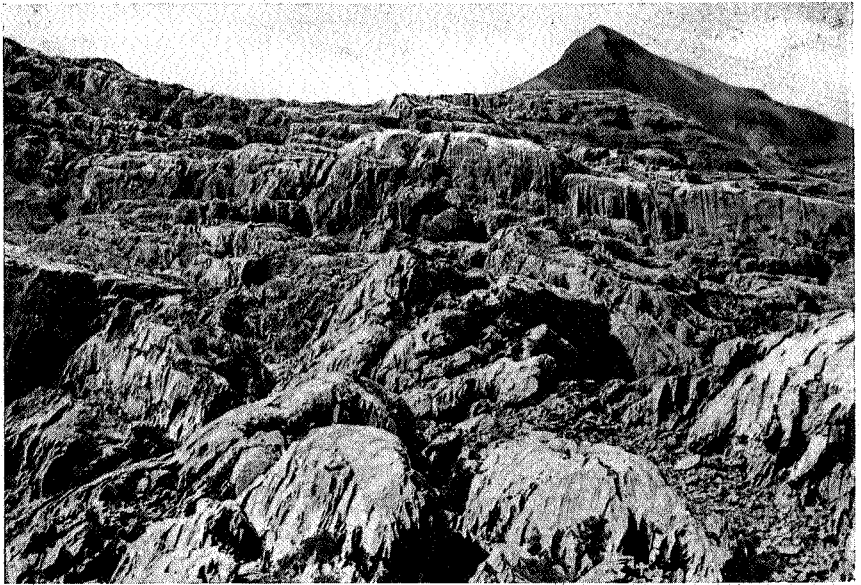
A. LOMBARD et J. P. VANDEN EECKHOUT. — *Observations sur les formations karstiques du lapiaz de Camp-Long (Basses-Pyrénées)* (projections lumineuses). (Texte ci-après.)

C. CAMERMAN. — *La gélivité des matériaux rocheux*. (Texte ci-après.)

**Note sur les phénomènes karstiques
dans les Pyrénées (Bracas et Camp-Long, B.-P.),**

par A. LOMBARD et J.-P. VAN DEN EECKHOUDT.

La présente communication a pour simple objet de présenter quelques observations de détail sur la formation de figures d'érosion dans les calcaires. Notre pays n'en offre guère d'exemple; c'est pourquoi il nous a paru intéressant d'en présenter quelques cas typiques.



**FIG. 1. — Le lapiaz de Camp-Long, partie 2.
Au fond, le pic d'Arlas (2.064 m).**

Ces observations et les photographies ont été faites par l'un de nous (J. VAN DEN EECKHOUDT) au cours des étés 1948 et 1949.

Le lapiaz de Camp-Long (fig. 1) s'étend sur environ 10 km² à l'altitude de 1.650 m à 2.000 m. Ses limites sont, au Sud le territoire espagnol, au Nord la vallée de Saint-Engrâce, à l'Est le pic d'Anie (2.504 m) et à l'Ouest le pic d'Arlas (2.064 m). Sa pente générale est dirigée vers l'Ouest.

Elle est d'origine structurale.

La figure 1 est prise vers l'Ouest avec le pic d'Arlas dans le fond; elle montre une partie profondément érodée du lapiaz avec de nombreux blocs accumulés dans les crevasses. Ces faits laissent supposer que l'activité de l'érosion est grande dans cette portion du lapiaz et qu'elle est peut-être plus ancienne qu'ailleurs.

Les cannelures profondes (fig. 2, lieu dit Pescamou) et verticales sont fréquentes le long des parois abruptes bordant les

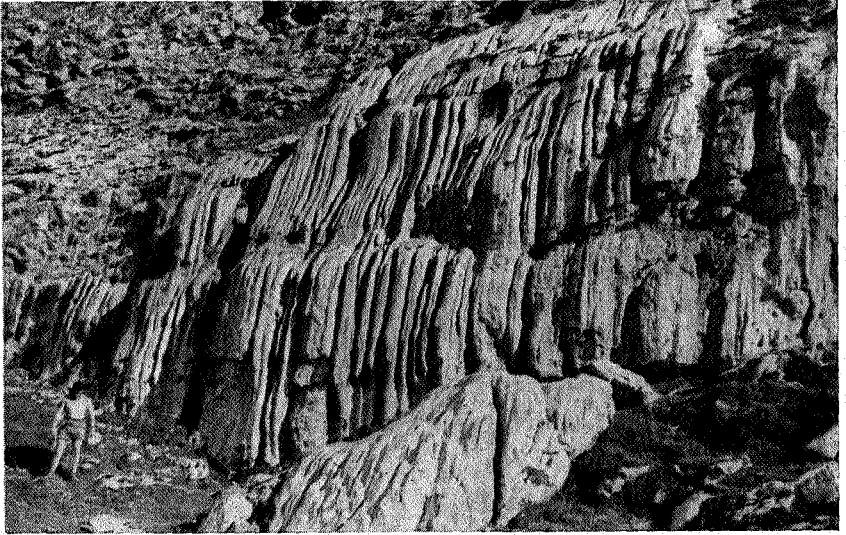


FIG. 2. — **Parois abruptes cannelées.**

gros bancs. Elles sont parallèles et se prolongent de part et d'autre des joints de stratification ou des passées de calcaire moins pur, généralement voisins de l'horizontale.

Ces passées marmo-calcaires sont moins solubles que le calcaire pur et dispersent localement les filets d'eau de ruissellement. Les cannelures s'atténuent à leur hauteur, puis reprennent plus bas. La forme de ces cannelures profondément incisées coïncide avec une vaste surface d'impluvium et dont une partie est localement couverte de gazon. L'eau se charge en acides humiques, ce qui augmente son pouvoir d'érosion.

Ailleurs, le long de cette paroi, lorsque l'eau de ruissellement se fait plus rare, les rigoles deviennent moins profondes et s'espacent.

Sur des surfaces horizontales (fig. 3) les figures de dissolution se disposent suivant un réseau de drainage convergeant vers les points bas que sont les crevasses. On va trouver une série de figures semblables à celles des vallées d'érosion à grande échelle dans lesquelles on distingue un bassin de réception bordé de crêtes cannelées, un cours de plus en plus encaissé et un conduit final d'engouffrement. Suivant l'âge et l'activité

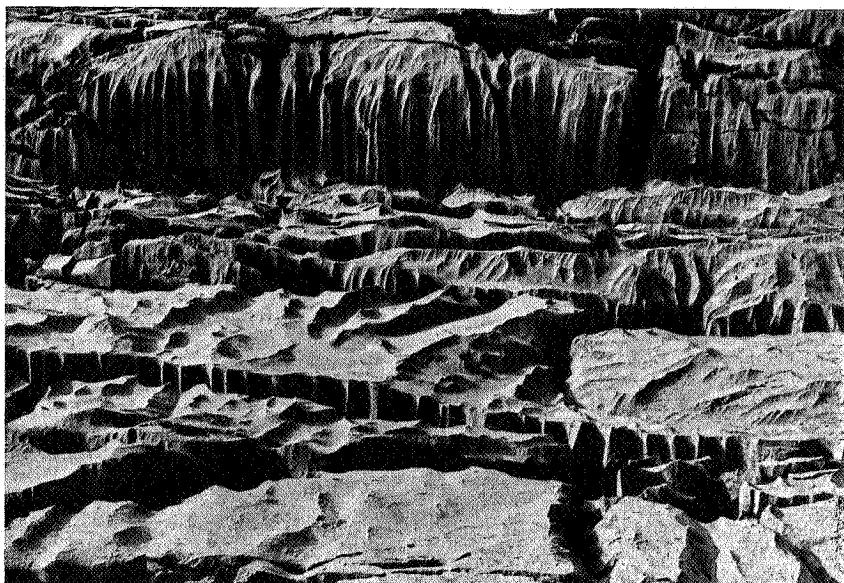


FIG. 3. — Surfaces horizontales à crêtes et crevasses.

de la formation, les bassins s'isolent les uns des autres par des crêtes toujours plus élevées, tranchantes et cannelées.

Chaque crête se découpe avec l'incision des cannelures. Ces dernières se correspondent de part et d'autre d'une crête commune. Leur largeur, voisine de 1,5 cm, est sensiblement constante. Elles sont bien marquées dans le haut et s'effacent vers le bas, ne mesurant guère plus de 20 cm de longueur maximale.

Les parois des crevasses verticales sont cannelées. Ces cannelures sont parallèles, verticales et profondes. Le réseau est fossile. C'est le témoin d'une période active désormais arrêtée faute d'alimentation suffisante. Les rigoles dans lesquelles se rassemblent les eaux d'un réseau de petites vallées sont pro-

fondément incisées à l'endroit où elles plongent dans une crevasse. Il arrive souvent que l'incision détermine une coupure profonde qui isole du banc une lame aiguë de calcaire.

Au premier plan de la figure 3, on remarquera la convergence de deux systèmes de vallées dont l'un est déjà profondément enfoncé.

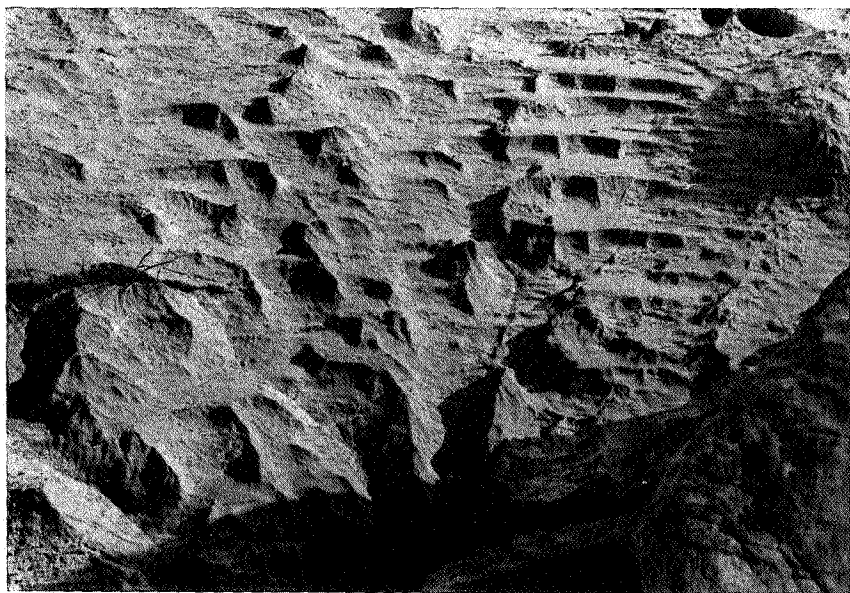


FIG. 4. — Surface de pente moyenne à terrasses.

Sur des surfaces modérément inclinées (26° - 30°) (fig. 4) l'érosion a déterminé une série de terrasses successives en gradins, dont les replats sont indépendants de la stratification de la roche calcaire.

Le talus, haut de 10 cm environ, est incurvé en petits cirques jointifs, séparés par une crête aiguë. Ailleurs, notamment sur la gauche du cliché, le gradin est réduit à un éperon prolongé par une crête. Ici encore, l'existence d'un gradin paraît indépendante des petits accidents de la stratification du calcaire (stylolithes, lamelles argileuses). Ce phénomène est fréquent sur ces lapiaz.

Les méandres se voient souvent dans la partie basse des petites vallées. Dans le cas de la figure 5, trois cours conver-

gent et se rassemblent en un quatrième qui s'écoule vers l'angle inférieur gauche de la photo.

La profondeur moyenne de chaque cours est de 25 cm environ. L'étude de détail de ces méandres montre la répétition des faits connus à l'échelle supérieure : érosion à l'extérieur de la courbe, abandon de méandres, méandres coupés et suspen-

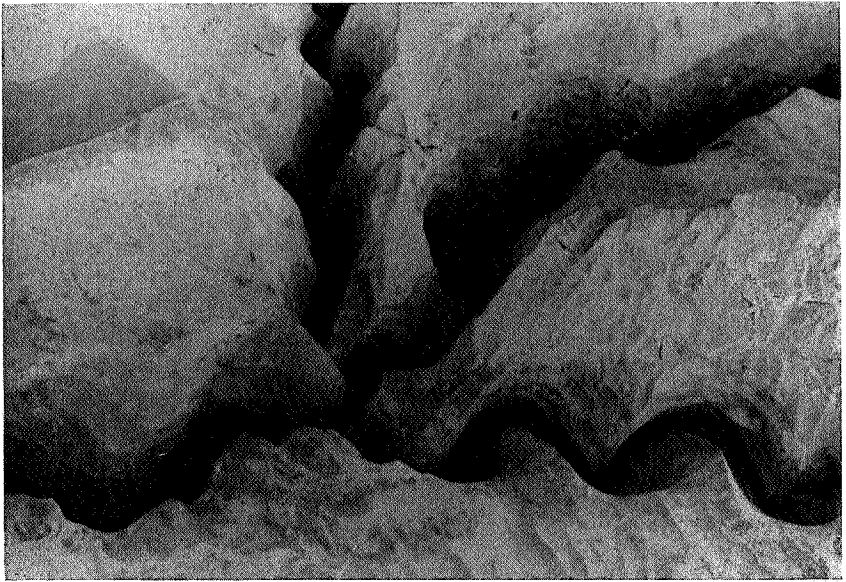


FIG. 5. — **Convergence de cours en méandres.**

dus. Avec l'âge, les méandres s'élargissent mais un abaissement du niveau de base peut rajeunir le cycle et l'on passe à un nouvel approfondissement.

Les canaux en méandres sont parfois interrompus, notamment lorsque, coupant une veinule de calcite particulièrement soluble, le cours d'eau la dissout, y détermine un trou qui va s'approfondir et correspondre avec quelque conduit profond. L'eau s'y perd en totalité et ne passe pas au delà.

On assiste alors à une capture d'un genre particulier et le cours amont seul va poursuivre son évolution. Le cours aval est désormais isolé et mort. C'est ce que montre la figure 6. Les eaux s'écoulent du premier plan vers le fond. L'interruption du cours est bien visible au centre de la photo, bien que la différence entre l'amont et l'aval ne soit pas très marquée.

La figure 7, par contre, représente mieux cette différence entre les deux secteurs, car la veine transverse de calcite a été profondément élargie. Le cours d'eau procède de l'avant-plan vers la grande crevasse médiane et transversale.

Après avoir examiné quelques cas d'érosion par l'eau en mouvement, il est intéressant de suivre l'action de l'eau presque stagnante. Sur une surface calcaire faiblement inclinée,

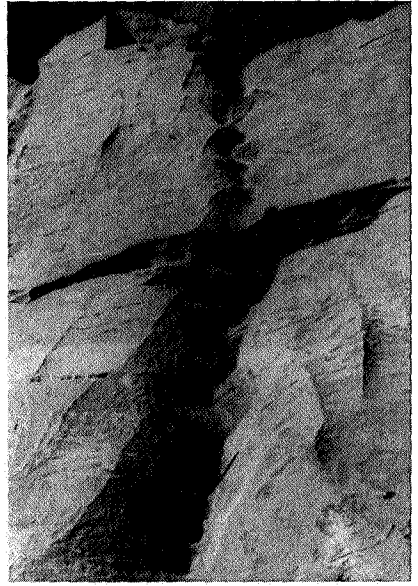


FIG. 6. — Cours interrompu, 1^{er} stade.

FIG. 7. — Cours interrompu, 2^e stade.

il se forme des terrasses successives à fond plat et horizontal (fig. 8) en hémicycle. Quelques crêtes séparent des bassins et l'une de ces crêtes est réduite à une crête-témoin.

Lorsque la surface devient horizontale (fig. 9) et que l'eau y séjourne jusqu'à son évaporation, on observe quelques figures typiques. L'érosion commence par le creusement de petites cupules isolées. Leur diamètre est de l'ordre du centimètre ainsi que leur profondeur. Plus tard, elles évoluent en s'éta-
lant, se rejoignent et forment des cavités planes plus vastes. Les bords restent verticaux ou fortement inclinés et souvent concaves.

Plus tard encore, de nouvelles petites cupules se forment au centre des cavités planes précédentes. On a ainsi une cuvette

de deuxième ordre qui s'amorce, puis se développe dans le cadre de la première. Un troisième ordre se creuse souvent si les conditions initiales subsistent assez longtemps.

Ces creusements par stades successifs déterminent finalement une grande cuvette à fonds emboîtés. Son volume d'eau est tel qu'il prend plus de temps à s'évaporer. L'eau va déborder plus fréquemment et entaillera les bords de la cuvette.

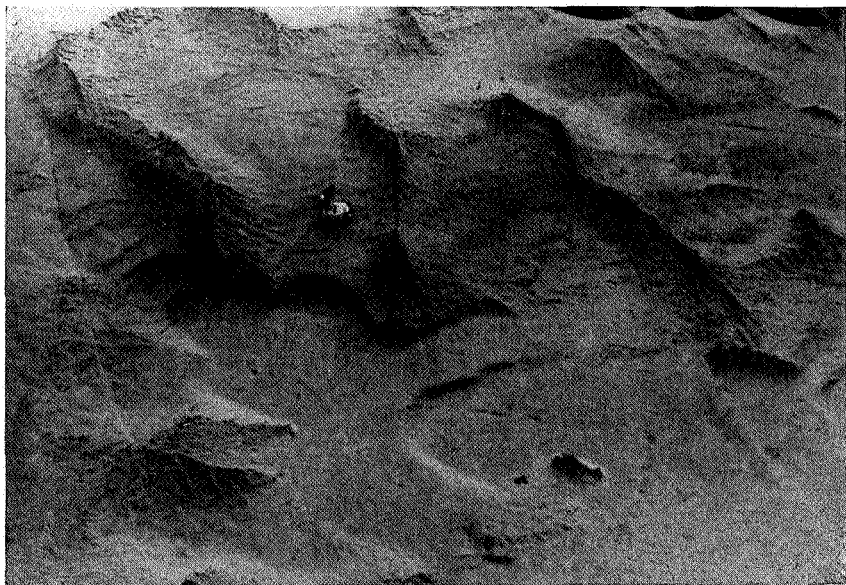


FIG. 8. — **Surface inclinée à crêtes et terrasses.**

Un canal-déversoir se creuse, qui permettra une communication soit avec une cuvette voisine, soit avec une partie basse du plateau calcaire. L'érosion atteindra le fond du bassin, dont elle modèlera la surface restée plane.

Nous avons insisté au début de cette note sur son caractère descriptif. Il est cependant intéressant de partir de ces diverses observations pour vérifier les hypothèses sur le mécanisme des érosions.

L'érosion n'est pas le fait de l'eau mais des matières qui y sont dissoutes : CO_2 et acides humiques surtout. L'eau renferme des impuretés fines qui useraient mécaniquement les parois calcaires. Nous pensons que cette explication n'est pas la bonne. En effet, les eaux n'ont guère le caractère torrentiel voulu pour

projeter les particules. A part les crues de fonte de neige, l'eau est réduite à une pellicule, une lame mince, que ralentissent les aspérités de la roche, les forces de tension superficielle et le fréquent manque de pente et de débit.

En outre, on n'a guère trouvé de traces de ces particules fines ni dans les bassins, ni dans les méandres, ni dans les nombreux points bas des lapiaz. Rappelons que comme miné-



FIG. 9. — Cuvettes emboîtées et communicantes.

raux abrasifs courants entrant en ligne de compte, seul le quartz peut avoir une action marquée, car il possède la forme et la dureté voulues. Or on ne voit pas de traces de sa présence sous forme de sables ni dans les aires d'alimentation, ni dans celles de dépôt.

Les phyllites du genre mica et les minéraux argileux interviendraient ensuite, mais leur forme lamellaire et leur faible dureté n'en font guère des abrasifs efficaces. On n'a pas signalé jusqu'ici de dépôts géologiques susceptibles d'en mettre en suspension dans l'eau, du moins en quantité suffisante.

Ainsi le mécanisme classique de la dissolution convient bien pour expliquer ces formes diverses de sculpture à petite échelle.

DISCUSSION.

C'est M. Van den Eeckhoudt qui a fait la plupart des observations. Il est malheureusement absent. Diverses opinions sont émises sur l'origine des formes d'érosion superficielle que présente le lapiaz. M. M.-F. Denayer demande si des échantillons d'eau ont été prélevés et rappelle qu'il a observé des cupules sur une statue calcaire. On pourrait, dit-il, reproduire expérimentalement les phénomènes observés avec des eaux agressives.

M. G. Mortelmans fait une part à l'érosion éolienne. Au Sahara, dit-il, son action est très prononcée sur le lapiaz de Taghit, en bordure du Grand Erg occidental, mais il ne faut pas exclure, surtout quand la sculpture est prononcée, une érosion par des eaux courantes anciennes, ou même encore actuellement par la rosée .

La gélivité des matériaux pierreux,

par C. CAMERMAN.

La gélivité proprement dite est due à l'intervention de l'eau imbibant les matériaux. L'eau, en se transformant en glace, voit son volume croître de 90 % et exerce de ce fait, au sein des matériaux, des tensions pouvant être disruptives. La gélivité proprement dite est parfois difficile à dégager des autres causes de destruction dues aux intempéries et notamment les variations rapides de température, l'action dissolvante de l'eau de pluie, l'érosion éolienne, etc.

Certaines roches très compactes et à grain très fin peuvent se rompre par simple exposition au soleil ou échauffement au sciage, surtout si elles n'ont pas perdu leur eau de carrière (marbres noirs de Mazy et de Calonne, certaines roches calcédonieuses, etc.).

Il faut se départir du préjugé très fréquent que les roches les plus poreuses seraient les plus gélives; il n'en est rien et l'on rencontre sans doute plus de roches gélives parmi les roches compactes que parmi les roches poreuses.

DIVERS ASPECTS DE LA GÉLIVITÉ.

Les ruptures peuvent se produire suivant des plans quelconques, sans direction privilégiée. On pourrait donner à cet aspect de la gélivité le nom de *gélivité transsecante* (exemple : pierre de Tercé au Palais de Justice de Bruxelles) (fig. 1). La gélivité peut avoir pour effet de dissocier les grains de la roche; on pourrait l'appeler *gélivité granulaire*; c'est le cas de beaucoup de grès tendres; ici l'action dissolvante des eaux pluviales

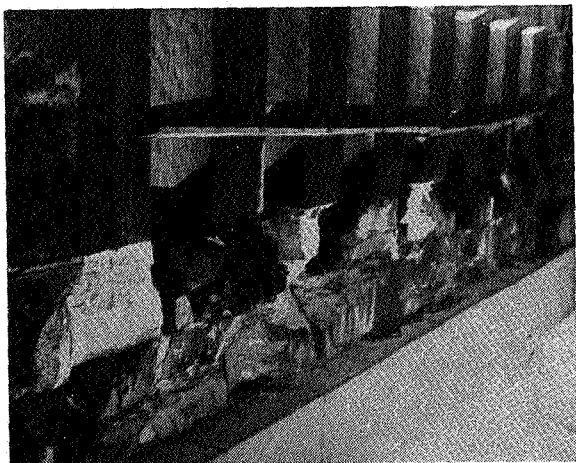


FIG. 1. — Gélivité de la pierre de Tercé, placée entre deux assises de petit granite. Attique du Palais de Justice de Bruxelles.

et l'érosion éolienne peuvent intervenir pour une large part (exemple : grès diestiens, grès miocène de la Colonne du Congrès).

Enfin il existe fréquemment des types de *gélivité structurale*. Parmi ceux-ci on peut distinguer une *gélivité stratoïde* : c'est le cas de beaucoup de schistes. Ceux-ci, passant à l'état de phylades, sont d'autant moins sensibles au gel qu'ils sont plus évolués. Les bonnes ardoises, par exemple, ne sont pas gélives. Sont souvent gélifs les psammites (exemples : grès famennien d'Écaussines, grès triasiques : cathédrale de Strasbourg) (fig. 2), et la plupart des roches à structure feuilletée (exemple : calcaires argilo-siliceux de Tournai) (fig. 3).

Sont également d'ordre structural les joints ou réseaux de joints très peu perceptibles, souvent virtuels, parallèles aux

réseaux de diaclases, dénommés « fils ». Le gel peut rompre les pierres suivant ces joints d'origine tectonique. On peut ainsi parler de « *gélivité tectonique* ». Dans les calcaires compacts du Tournaisis, certains bancs se divisent par altération en petits fragments parallélépipédiques : ils portent en langage du terroir le nom de « Keuchelles » (fig. 4). Le « petit granite » ou calcaire encrinitique de l'étage tournaisien de la Belgique, résistant parfaitement au gel, présente exceptionnellement des réseaux de

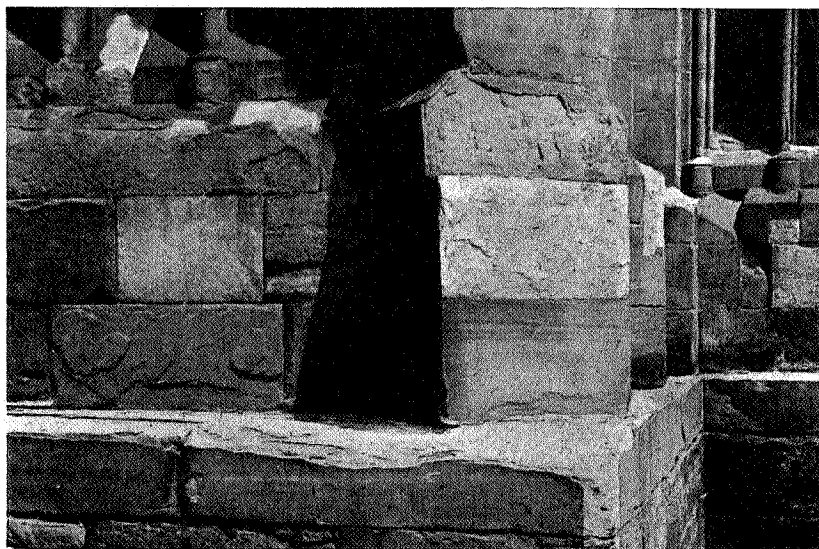


FIG. 2. — Gélivité du grès triasique. Cathédrale de Strasbourg.

Photo Mortelmans.

ils s'ouvrant par le gel et les intempéries. Quelques dalles funéraires du cimetière de Sain-Josse-lez-Bruxelles en offrent un bel exemple (fig. 5).

Gélivité structurale des briques.

Certains matériaux artificiels, les briques par exemple, présentent une gélivité structurale très marquée. C'est le cas pour les briques mécaniques ordinaires de Boom, qui, exposées à saturation complète par l'eau, se montrent gélives. L'argile broyée en pâte ferme dans des broyeurs à meules roulant sur des tôles perforées prend une première structure à boulettes ou à noisettes. Passant ensuite par la filière de la presse, l'argile

prend une structure laminaire : Ces deux structures se superposant, les briques se rompent par le gel en plaquettes parallèles au sens de l'étirement (structure laminaire) et en boulettes (structure à noisettes) (fig. 6 et 7).

La même argile malaxée et moulée à la main en pâte fluide est dépourvue de structure et donne des briques dites « à la main », non gélives (Papenstein, Klampsteen, Klinkaert).

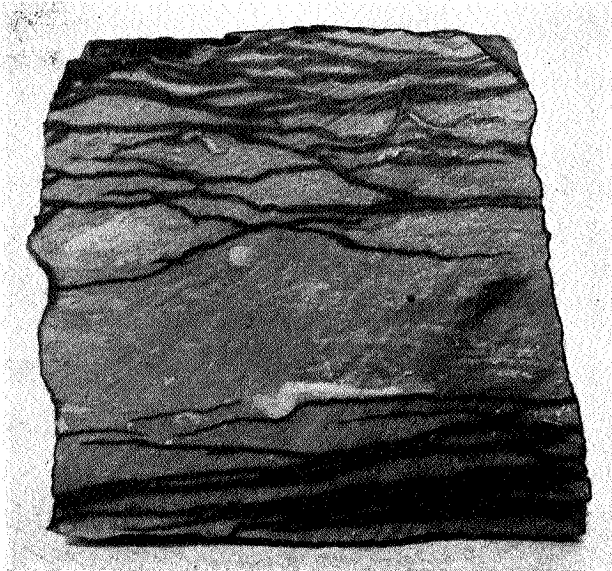


FIG. 3. — Gélivité d'un calcaire argilo-siliceux de Tournai, mise en évidence en humectant une surface polie.

De même des argiles trop plastiques, laminées et travaillées à l'étireuse pour en faire des briques pleines, montrent souvent une structure laminaire et se divisent en plaquettes par le gel.

EXPÉRIMENTATION DE LA GÉLIVITÉ.

Le gel étant une des principales causes de la destruction des matériaux, on a depuis longtemps cherché des méthodes d'expérimentation au gel.

Méthode de Brard.

Dès 1828, à une époque où la production artificielle du froid se heurtait encore à des difficultés pratiques, l'ingénieur fran-

çais BRARD imagina d'imbiber les matériaux d'une solution saturée de sulfate de sodium et de les laisser ensuite sécher de manière que le sulfate de sodium cristallise dans les pores. On observait les désagréments produites à la suite de plusieurs essais successifs.

La méthode de BRARD présente de grandes discordances avec les effets du gel constatés dans la pratique; la cristallisation du

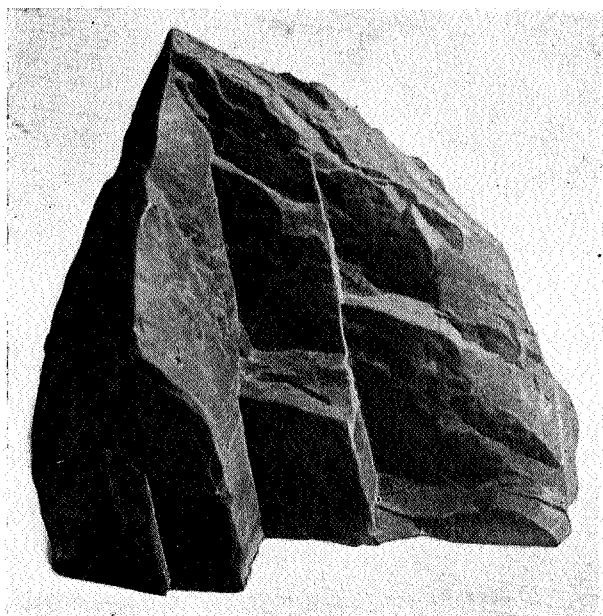


FIG. 4. — Calcaire argilo-siliceux compact de Tournai.
Bancs dits « Keuchelles », gélivité tectonique.

sulfate de sodium exerce des tensions notables supérieures à celles produites par la congélation de l'eau; aussi la méthode de BRARD n'est-elle plus retenue comme essai de gélivité; certains expérimentateurs l'utilisent néanmoins comme indice du degré de cohérence des matériaux.

Essais en glacière.

Dès que la production du froid entra dans le domaine de la pratique, l'idée vint tout naturellement de soumettre les matériaux à des essais consécutifs de congélation et de décongélation et l'on crut reproduire ainsi assez fidèlement ce qui se passe dans la nature. Comme il était bien connu que des maté-

riaux fortement imbibés d'eau étaient beaucoup plus sujets à se détériorer par le gel que des matériaux modérément imbibés, deux techniques furent utilisées :

- a) Essais sur matériaux complètement saturés d'eau;
- b) Essais sur matériaux incomplètement saturés d'eau.

Dans la première technique, les matériaux, avant d'être congelés, sont immergés sous cloche où l'on fait le vide, ou bien

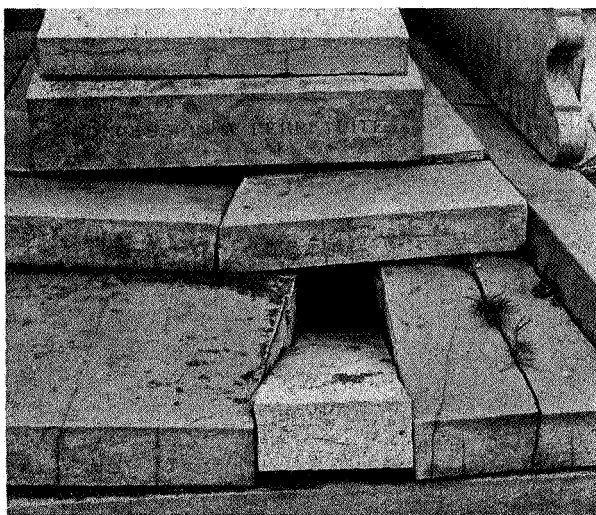


FIG. 5. — **Petit granite au cimetière de Saint-Josse.**
Ruptures suivant des fils.

soumis pendant un temps suffisant (généralement 5 heures) à l'ébullition. Par l'un ou l'autre de ces moyens on réalise une saturation complète.

Dans la seconde technique, beaucoup moins sévère, les matériaux sont simplement plongés dans l'eau pendant 24 ou 48 heures avant d'être soumis au gel. Seuls les macropores sont remplis d'eau.

Selon WILSON et COOLIDGE, la limite entre les micropores et les macropores est arbitrairement évaluée à 0,005 mm.

Dans chacune de ces techniques il y a diverses variantes : dans les unes le froid est poussé à -15°C , dans d'autres à -25°C . On peut aussi faire varier le nombre de congélations; ordinairement de 15 à 25 épreuves, parfois 50 épreuves consécutives.

Examinons dans quelle mesure ces méthodes donnent des résultats correspondant au comportement réel des matériaux.

La première méthode (saturation complète) doit être considérée, surtout pour notre climat, comme beaucoup trop sévère. Elle entraînerait le rebut de nombreux matériaux qui, même placés dans les positions les plus défavorables, se montrent non gélifs.

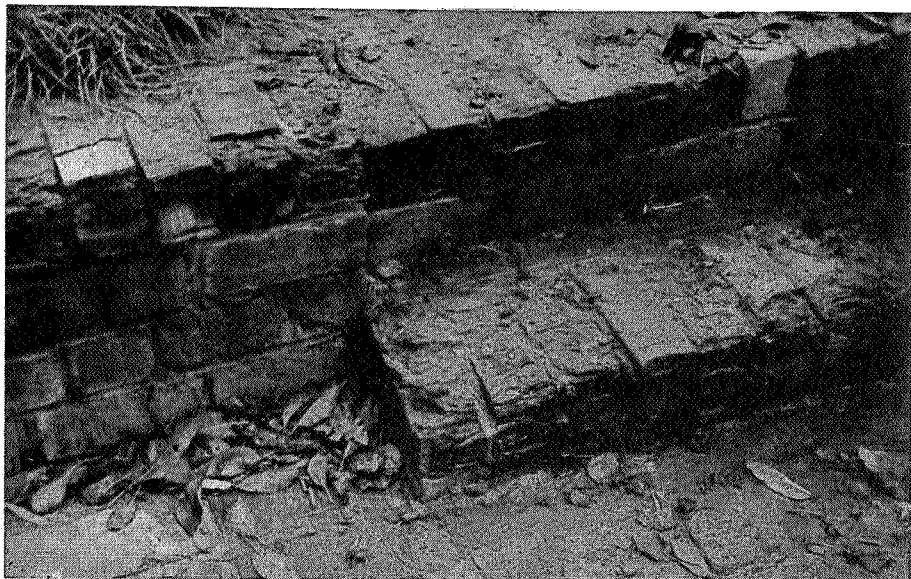


FIG. 6. — Gélivité des briques mécaniques ordinaires de Boom (escalier).

W. N. THOMAS, professeur à l'Université de Cardiff, a fourni l'explication de cette discordance ⁽¹⁾. Par des expériences très détaillées de calorimétrie et de dilatométrie, il a montré qu'en glacière, l'eau contenue dans les matériaux saturés reste en surfusion jusqu'à une température de -5°C ; elle se congèle alors brusquement, ramenant la température de l'éprouvette à 0°C , après quoi la température de l'éprouvette s'abaisse régulièrement (voir courbe de la fig. 8). Dans la nature, l'abaissement de la température est beaucoup plus lent qu'en glacière; de plus

(1) W. N. THOMAS, Experiments on the freezing of certain building materials (*Department of Scientific and Industrial Research, London, Building Research, Technical Paper, n° 17*).

quand le temps se met à la gelée il flotte dans l'atmosphère des microcristaux de glace qui amorcent le gel. L'éprouvette saturée d'eau se maintient à la température de 0°C jusqu'à ce que toute l'eau se soit congelée et descend ensuite progressivement (voir courbe de la fig. 9): En glacière, le gel de l'eau à -5°C engendre une pression brusque de 590 atm., soit 560 kg/cm^2 , pouvant entraîner de fortes lésions au sein du matériau.

Dans le gel naturel, où la glace se forme progressivement au



FIG. 7. — Gélivité des briques mécaniques ordinaires de Boom (pavement).

voisinage de son point de fusion, elle ne peut pas exercer une pression supérieure à celle qui serait nécessaire pour la faire fondre à la même température. Par exemple, si la glace se forme à $-0,1^{\circ}\text{C}$, elle peut revenir à l'état liquide sous une pression de 13 kg/cm^2 , tension insuffisante pour rompre la plupart des matériaux. Par conséquent, avant qu'aucun dégât puisse se produire, un peu de glace fond et est chassée soit dans les micropores vides, soit à la surface (extrusion).

La seconde méthode (saturation incomplète) est celle qui est inscrite dans la plupart des cahiers des charges et notamment dans les normes belges (immersion dans l'eau pendant 48 heures suivie de 15 congélations à -15°C). Cette méthode, de même que la précédente, donne des résultats sans concordance avec les faits; d'une manière générale, elle doit être considérée comme trop clémente. On en a la preuve en examinant

le comportement des briques machinées de Boom (nous choisissons cet exemple parce que ces briques sont parmi les mieux étudiées et qu'elles sont constamment soumises à des essais de laboratoire).

Dans neuf cas sur dix, ces briques sont déclarées non gélives à la suite des essais; or on constate très généralement que ces briques se désagrègent par le gel, là où elles sont soumises à une forte imprégnation d'eau (pavements, escaliers, murets. etc.) (fig. 6 et 7).

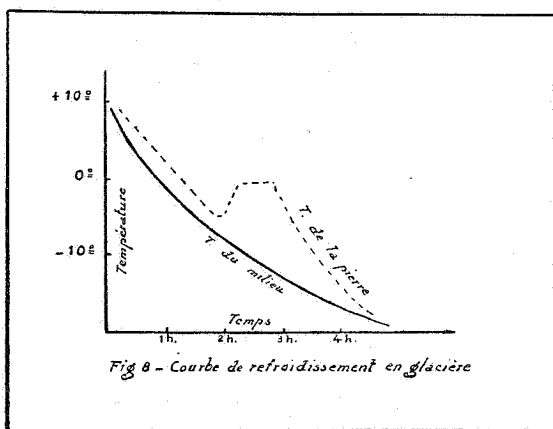


Fig 8 - Courbe de refroidissement en glacière

FIG. 8.

CONCLUSION. — On n'a pas mis au point, jusqu'à présent, d'essais en glacière dont les résultats soient conformes aux constatations de la pratique. Cela est si vrai que les administrations anglaises ont complètement supprimé les essais de gel de leurs cahiers des charges, les considérant comme inopérants.

Expansion permanente.

W. N. THOMAS (*op. cit.*), au cours de ses expériences, a déterminé l'expansion de divers matériaux au cours des essais de gel. Tantôt les matériaux, après retour à la température normale, reprennent leurs dimensions primitives (déformations élastiques), tantôt ils subissent une expansion permanente, indice de désintégration due au gel. La mesure des déformations permanentes semble être un des meilleurs indices de la gélivité, mais il s'agit là d'un mode d'expérimentation très délicat, difficile à adopter comme essai de routine dans la réception des matériaux.

Coefficient de saturation.

Ce coefficient est aussi dénommé coefficient d'HIRSCHWALD, du nom de ce savant, qui en fit ressortir l'importance (1912). On peut considérer théoriquement les matériaux comme étant parcourus par un réseau de pores constitués par des macropores reliés plus ou moins entre eux par des micropores. Les macropores sont ceux qui se remplissent d'eau par une simple immersion d'une durée conventionnellement fixée à 24 ou à 48 heures. Les micropores ne se remplissent d'eau que par

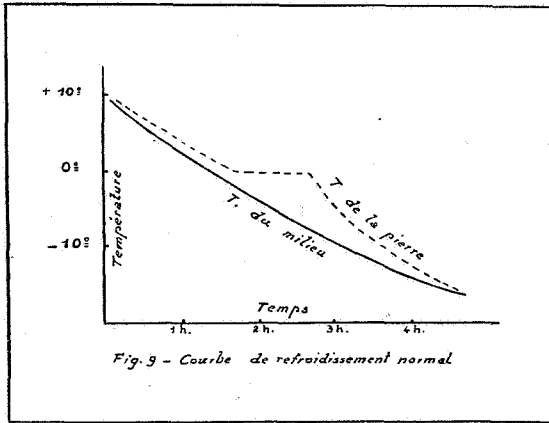


FIG. 9.

saturation forcée (vide, ébullition). Nous avons vu que la limite entre macropores et micropores pouvait se situer aux environs de 0,005 mm.

Si un matériau dont les macropores sont remplis d'eau est soumis au gel, la glace se formant dans les macropores est susceptible de faire extrusion dans les micropores adjacents sans exercer de tensions disruptives, à condition que les micropores occupent un volume d'au moins 10 % des macropores. Les micropores jouent le rôle de valves de sécurité.

Si l'on détermine l'absorption d'eau P^1 par immersion de 24 heures, on a une mesure conventionnelle des macropores. L'absorption d'eau totale (par le vide ou l'ébullition) P^2 donne la mesure de la totalité des pores. On nomme coefficient de saturation, ou d'Hirschwald, le rapport $\frac{P^1}{P^2}$.

Si ce rapport est inférieur à 0,90, le matériau, *théoriquement*, ne devrait pas être gélif. S'il est supérieur à 0,90, le matériau a tendance à être gélif.

La pratique a montré que le coefficient-limite se rapproche plutôt de 0,80 que de 0,90. Pratiquement, on peut conclure qu'un matériau dont le coefficient de saturation est inférieur à 0,80 %

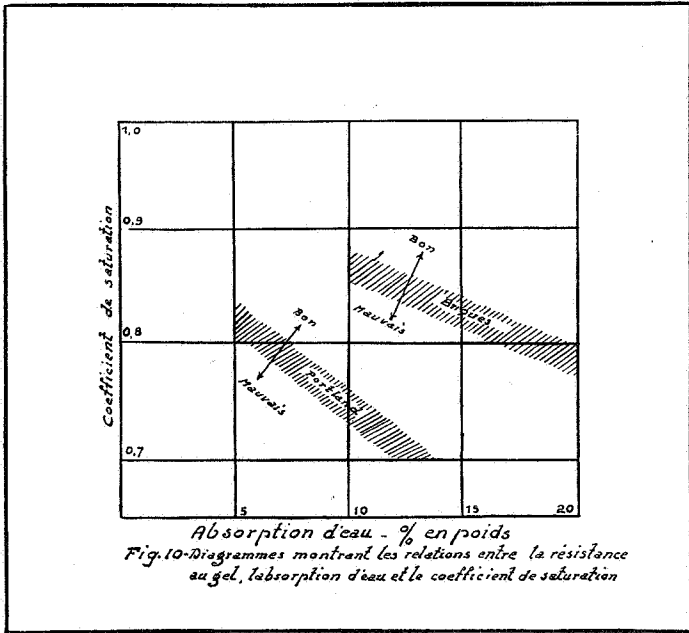


FIG. 10.

n'est généralement pas gélif, tandis qu'au-dessus de 0,90 % il est généralement gélif. Entre 0,80 et 0,90 il règne de l'indécision, les matériaux placés dans une situation défavorable pouvant se montrer gélifs. C'est notamment le cas pour les matériaux de couverture, en période hivernale, lorsque la gelée et la pluie alternent à de brefs intervalles : le matériau imprégné d'eau est soumis au gel; la glace se répand dans les pores vides; au dégel, ces pores qui ont servi de valves de sécurité ne se vident plus et, dans ce cas, il arrive fréquemment que le matériau gèle.

Quoi qu'il en soit, le coefficient de saturation donne des indications utiles qui se vérifient en pratique pour la majorité des pierres ayant une absorption d'eau suffisamment élevée.

J'ai démontré que les pierres de Tercé gélives du Palais de Justice de Bruxelles (fig. 1) appartiennent à un banc dont le coefficient de saturation est voisin de 0,90, tandis que les autres bancs de la formation, non gélifs, ont un coefficient voisin de 0,80.

La détermination correcte du coefficient de saturation se heurte à des difficultés pour les matériaux compacts à faible



FIG. 11. — Altérations cavernueuses (tafoni), dans les roches granitiques de la Corse.

absorption d'eau, inférieure à 2 ou 3 %. Pour ces matériaux on ne peut en tirer des conclusions.

L'application de la méthode du coefficient de saturation a fait de grands progrès à la suite de la vaste expérimentation faite en Amérique par MAC BURNEY pour les briques, confirmée par les expériences faites en Angleterre à la Building Research Station.

Ces expériences ont montré que le coefficient de saturation délimitant les briques gélives et non gélives est fonction de la résistance mécanique et surtout du degré d'absorption d'eau. Cela peut être figuré schématiquement par le diagramme « briques » de la figure 10. Les briques situées au-dessus de la bande hachurée ont les plus grandes chances d'être gélives, tandis que sous la bande hachurée elles ont les plus grandes

chances de résister au gel. La bande hachurée représente une zone indécise ⁽²⁾.

Ces recherches ont paru suffisamment concluantes pour que la détermination du coefficient de saturation soit inscrite dans les cahiers des charges des États-Unis et du Canada comme critère de durabilité des briques.



FIG. 12. — Fléchissement dans le sens horizontal d'une plaque de marbre dans la crypte du cimetière de Saint-Josse.

Cliché Soc. Nat. Habit. Bon-Marché.

Des mises au point analogues pourraient être réalisées pour certaines catégories de pierres naturelles. C'est ce qui a été fait notamment pour la pierre de Portland (voir diagramme « Portland » de la fig. 10).

CONCLUSIONS ET CONSÉQUENCES DE L'EXPÉRIMENTATION DE LA GÉLIVITÉ.

Aucune méthode d'expérimentation n'est actuellement mise au point de manière à fournir des indications précises concernant la résistance au gel des matériaux. Il semble que ce soit,

(2) B. BUTTERWORTH, La Brique (ouvrage édité par *Les Etudes des Composés siliceux*, 64, rue du Prince-Royal à Bruxelles, 1950).

dans la situation présente, la méthode du coefficient de saturation ou d'Hirschwald qui fournisse les indications les plus utiles. Elle présente l'avantage de la simplicité et de la célérité.

Il est de la plus grande utilité de recourir à l'empirisme, soit par l'observation des anciennes constructions, soit, pour les pierres, par l'observation en carrière, soit encore par des expériences pratiques de longue durée. Dans ces expériences (cemetery tests), les matériaux sont exposés aux intempéries soit dans des récipients contenant de l'eau, soit partiellement enfouis dans le sol.

En ce qui concerne l'observation des constructions, il faut avoir soin de ne pas confondre avec les effets du gel des écailllements ou des désagréments dus à la cristallisation de sels de diverses provenances (3), soit à l'action des fumées (4).

Rappelons qu'on a dû également recourir à l'empirisme pour l'essai de durabilité des peintures, pour lesquelles aucun essai de laboratoire ne s'est montré tout à fait satisfaisant. Dans les principaux pays on a recours à l'exposition de panneaux peints, à différents types d'atmosphères.

Des expériences de W. N. THOMAS et de divers autres expérimentateurs on peut tirer certaines conclusions, notamment :

Inutilité des essais à très basse température. — Les tensions disruptives ne se développent que pendant la formation de la glace dans le matériau, soit à des températures comprises entre 0 et -6° ou -7° C. A des températures inférieures, la glace ayant un coefficient de retrait supérieur à celui de la plupart des matériaux pierreux n'exerce pas de tensions croissantes.

Importance capitale de l'extrusion de la glace, soit sur les faces extérieures, soit dans les pores ou vides non remplis d'eau, jouant le rôle de valves de sécurité. Les matériaux à larges pores, rejetant rapidement l'eau absorbée, les matériaux alvéolaires (pierres coquillières, travertins, etc.) présentent une structure particulièrement favorable à cet égard.

(3) C. CAMERMAN, Phénomènes de sulfatation dans les maçonneries en briques de Boom (*Ann. Trav. Publics de Belgique*, août-octobre 1948). — IDEM, Les efflorescences dans les maçonneries. Influence des liants hydrauliques (*Ibid.*, avril-juin 1949).

(4) IDEM, Les pierres de taille calcaires. Leur comportement sous l'action des fumées (*Ibid.*, février, avril, juin, août, octobre, décembre 1951 et février 1952).

Les enduisages ayant pour but de boucher les pores superficiels et notamment les silicatages, s'opposant à l'extrusion de la glace, ont généralement des effets néfastes, l'eau finissant toujours par s'infiltrer par l'une ou l'autre face et ne pouvant s'évaporer.

Influence des dimensions. — Dans les petits formats, la surface d'extrusion est plus grande que dans les grands formats, d'où meilleure résistance au gel.

Dans les gros blocs, si la différence de température entre la pierre et le milieu ambiant est considérable, il s'établit dans la masse un gradient de température engendrant des tensions pouvant entraîner la rupture. C'est pourquoi dans les chantiers de pierres de taille, on débite souvent les gros blocs de pierres sensibles au gel en morceaux de plus petit format, destinés à être stockés.

*
**

Profitant de sa présence à notre tribune, M. CAMERMAN fait projeter quelques photos relatives à des phénomènes curieux qu'il a eu l'occasion d'observer et qui ne concernent pas le gel. Il n'a aucune théorie à proposer pour en donner l'explication.

1° Altérations cavernieuses de toutes dimensions constatées en Corse dans des roches granitiques, dans toutes les parties de l'île et à tous les niveaux. Cette forme d'altération ne paraît explicable ni par l'érosion aquatique, ni par l'érosion éolienne (fig. 11).

2° Grandes plaques de marbre fortement fléchies, les unes placées verticalement, les autres horizontalement, dans la crypte du cimetière de Saint-Josse-lez-Bruxelles, où elles se trouvent à l'abri de la pluie et du soleil (fig. 12).

DISCUSSION.

GÉLIVITÉ TECTONIQUE. — *M. P. Dumon pense que les ruptures suivant les « fils » d'origine tectonique sont dues plutôt aux variations de température qu'au gel proprement dit et se produisent même là où la pierre n'est pas exposée au gel. M. C. Camerman accepte ce point de vue, tout en estimant que le gel proprement dit accentue notablement les ruptures.*

EAU DE CARRIÈRE. — *M. P. Dumon insiste sur l'importance de l'eau de carrière, qui rend les pierres gélives (notamment le marbre noir) lorsqu'elles sont fraîchement extraites. Ces pierres ne sont plus gélives lorsqu'elles ont été « ressuyées », c'est-à-dire lorsqu'elles ont perdu leur eau de carrière. Pour cette raison, beaucoup de pierres ne sont pas extraites en hiver.*

M. C. Camerman considère que l'eau de carrière remplissant les micropores des pierres est particulièrement dangereuse, car souvent la glace résultant de sa congélation ne peut faire extrusion. L'eau de carrière une fois évaporée, l'eau ne pénètre plus dans ces micropores et la pierre n'est plus gélive.

BÉTON. — *M. P. Dumon demande si le béton n'est jamais gélif. M. C. Camerman répond qu'il arrive assez fréquemment qu'un béton soit gélif. Les théories exposées par M. Camerman s'appliquent difficilement au béton. Celui-ci est composé de matières inertes et d'un liant hydraulique. Les théories générales du gel peuvent s'appliquer aux fissures et aux pores des cailloux incorporés dans le béton et aux fissures dues à un manque d'homogénéité et au retrait. Par contre, elles s'appliquent mal au liant formé d'hydrates microcristallins en présence d'eau plus ou moins libre avec un grand excès de chaux.*

L'hétérogénéité du béton est le fait essentiel qui conditionne sa stabilité au gel. La résistance au gel des ciments varie dans de grandes proportions d'un ciment à l'autre en fonction de leur composition physique et chimique, de leur coefficient de mouillage et de la durée de durcissement au moment de l'application du gel. Les bétons sous charge, c'est-à-dire exposés à une forte pression permanente résistent beaucoup mieux au gel que les bétons non chargés (voir R.-M. BERTHIER, Centre d'études et de Recherches de l'Industrie des liants hydrauliques, Publ. Techn., n° 40, Paris, 1951).

ALTÉRATIONS CAVERNEUSES CONSTATÉES EN CORSE. — *M. M.-E. Denaeyer a fait parvenir ultérieurement à M. Camerman un ouvrage très détaillé : « Die Tafoni-Verwitterungserscheinung », par Irma KVELBERG et Boris POPOFF, Latvijas Universitātes Raksti, Actor Universitātes Latviensu, Kimijas Facultātes Serija, IV.6, Riga, 1938.*

Les formations cavernieuses, dont les dimensions vont de toutes petites excavations à de vastes grottes, sont dénommées Tafoni. Alors que la surface de la roche en place ou des blocs

de granite est inaltérée, la roche est décomposée par l'intérieur avec formation de poches et de cavernes d'allure très tourmentée, avec ceci de particulier que leur ouverture est toujours tournée vers le bas ou vers le côté et jamais vers le haut. Les auteurs mentionnent une abondante bibliographie se rapportant à ce sujet et qu'il ne peut être question de reproduire ici. D'après les auteurs du mémoire, aucun processus d'altération chimique ni éolienne n'est susceptible de fournir une explication des tafoni. Pour eux, l'altération serait d'ordre mécanique. Elle prendrait naissance dans des parties concaves de la surface où les grandes variations de température dues à une forte insolation provoqueraient la rupture d'éclats lamellaires parallèles à la concavité. Celle-ci s'accroîtrait progressivement et le processus de destruction par l'intérieur irait en s'accroissant jusqu'à la formation de véritables cavernes.

De son côté, M. P. Dumon a fait parvenir à M. C. Camerman une brochure de J.-R. BATALLER, intitulée : « Géologia cara al vent », rédigée en catalan (Barcelone, 1950). L'auteur décrit des phénomènes de corrosion des roches, observées sur la côte catalane, présentant certaines analogies avec les tafoni de la Corse. Il les attribue à l'action du vent. M. Denaeyer a également observé ces corrosions en Catalogne.

PLAQUES DE MARBRE. — *M. P. Dumon signale que divers auteurs ont traité de la question bien connue de la flexion des plaques de marbre. Il a fait parvenir ultérieurement à M. Camerman un opuscule récent dû à Paul GIDON, de Chambéry, intitulé : « Observations sur la plasticité des roches calcaires ». Dans la seconde partie de cet opuscule, M. Gidon commente la déformation d'une plaque de marbre blanc de Carrare commémorative de la proclamation de la III^e République (4 septembre 1870), apposée sur la façade de l'hôtel de ville de Chambéry.*

M. Gidon expose qu'il est bien connu des marbriers qu'une plaque de marbre plane, simplement mouillée sur une de ses faces, prend en quelques heures une forme bombée, la face mouillée devenant convexe. Après dessiccation, la plaque bombée reprend sa planéité primitive. C'est une déformation temporaire attribuable aux tensions capillaires dues aux films d'eau s'insinuant entre les cristaux de calcite.

On peut concevoir qu'une plaque soumise à des humectations répétées, dues à la pluie, toujours sur la même face, prenne

une déformation permanente. A chaque humectation, l'eau pénétrant dans le marbre dissout un peu de calcaire qu'elle laisse déposer dans les joints intercrystallins à chaque dessiccation, phénomène comparable à la formation du calcin à la surface des calcaires poreux. Il en résultera à la longue une déformation permanente.

Enfin, M. Gidon indique que des déformations permanentes peuvent se produire à sec. Les marbriers redressent des plaques gondolées en les plaçant sur une surface plane et en y appliquant une charge. Le redressement permanent demande quelques mois ou quelques semaines. De même, une plaque de marbre posée directement sur un pied central, pour faire un guéridon, et non soutenue par une armature résistante, prend en quelques mois la forme d'une coupole.

Aux remarques de M. P. Dumon et à la note de M. Gidon, M. Camerman ajoute qu'il a observé d'innombrables déformations et déchirures de plaques de marbre, principalement dans les cimetières de Paris, où elles sont spectaculaires. Il s'agissait toujours de plaques exposées aux intempéries. C'est pourquoi il lui a paru intéressant de signaler les plaques de la crypte du cimetière de Saint-Josse, abritées des intempéries. Au surplus, M. Camerman ne s'est pas attaché à expliquer ces déformations. La crypte du cimetière de Saint-Josse étant abritée, mais non close, est accessible aux brouillards et embruns. Peut-être ceux-ci suffiraient-ils à provoquer une déformation permanente par humectation?

M. M.-E. Denaeyer a l'impression que les fléchissements de plaques de marbre seraient attribuables en ordre principal à la formation de la macle mécanique de la calcite sous l'effet de la pesanteur.
