

LES PRINCIPAUX FACTEURS D'ALTERATION DES PIERRES A BATIR

Voici trente-cinq ans, j'ai eu l'occasion de résumer les problèmes principaux de la désagrégation des pierres de construction à la réunion de l'Office international des Musées à Athènes. Les résultats de mes recherches ont été publiés en 1932 dans un manuel relativement détaillé et depuis, en une douzaine d'articles parus dans les périodiques spécialisés. Ce m'est à la fois un honneur et un plaisir de pouvoir aujourd'hui faire un nouveau tour d'horizon des questions posées par l'altération des pierres à bâtir ⁽¹⁾.

Les études sur l'altération des pierres à bâtir se divisent d'elles-mêmes en deux groupes : un premier concerne la qualité des roches et, suivant leurs caractères miné-

ralogiques et pétrographiques, leur résistance aux intempéries ⁽²⁾.

Un second groupe s'intéresse à toutes les influences à tous les facteurs d'altération de la pierre. En allemand, on s'est accoutumé à les résumer sous le terme de « Verwitterung » et en anglais sous celui de « weathering », quoiqu'ils ne se bornent pas aux influences des intempéries. A ma connaissance, il n'y a pas en français de synonyme exprimant la relation avec les intempéries; on y parle seulement d'altération, d'une détérioration ou d'une désagrégation. Comme on a souvent comparé l'altération des matériaux avec les maladies humaines suivant un processus fertile en idées

⁽¹⁾ Au cours d'une conférence sommaire à Bruxelles le 25 février 1966, je fus obligé de me limiter à la discussion des problèmes majeurs; j'ai suivi à cette occasion le plan de mon livre: *Zerstörungen an Steinbauten, ihre Ursachen und ihre Abwehr* (1932). Car il n'y a pas eu de publication d'ensemble sur le sujet depuis une trentaine d'années, mais seulement des études spéciales. Ci-après seront ajoutés les travaux bibliographiques que je connais et qui me semblent les plus valables; à cet égard, il convient de souligner aussitôt la parution, en même temps que mon livre et indépendamment de lui, du travail de R.J. SCHAFFER du « Building Research Station » de Garston near Watford: *The Weathering of Natural Buildings Stones*, Londres, 1932 (vol. 18 des « Building Research Special Reports »); l'interprétation des phénomènes essentiels y est semblable à la mienne.

Des publications récentes sont à signaler: BOURCART J., NOETZLIN J., POCHON J., BERTHELIER S., *Etude des détériorations des pierres des monuments historiques*, « Ann. I.T.B.T.P. », n° 7, Paris, 1949; CAMERMAN C., *Les pierres naturelles de construction*, « Ann. d. travaux publics de Belgique », n° 4, Gand, 1961; GALLE H., *Verwendung und Bewahrung von Natursteinen an Bauwerken Leipzigs*, « Wiss. Zeitschr. der Hochschule für Bauwesen », vol. 2, Cottbus, 1958/59, p. 133-146; HONEYBORNE D.B., HARRIS P.B., *The structure of porous building stone and its relation to weathering behaviour*, « Proc. 10th Symposium of Colston Research Society », Londres, 1958, p. 343-365; KAUFMANN J., *Corrosion et protection des pierres calcaires des monuments*, « Corrosion et Anticorrosion », n° 8, Paris (?), 1960, p. 87-95; RATHGEN Fr., KOCH J., *Verwitterung und Erhaltung von Werksteinen. Beiträge zur Frage der Steinschutzmittel*, Berlin, 1934; SCHAFFER R.J., *Stone as a building material. The weathering, preservation and restoration of stone buildings*, « Roy. Soc. Arts J. », n° 103, Londres, 1955, p. 837 sv.; SEIPP H., *Die abgekürzte Wetterbeständigkeitsprobe der Bausteine, nebst Anleitung zur praktischen Wetterbeständigkeits-Wertbestimmung von Bausteinen*, Munich, 1937; STOIS A., *Verwitterung und Steinschutz*, « Deutscher Marmorverband », Munich, 1956; STROMBERG A.G.B., *Vitringskader pa bygnadsmaterial*, « Byggmästern », vol. 43-3, Oslo, 1964.

⁽²⁾ BIBLIOGRAPHIE. Depuis quarante ans, de fort nombreuses publications ont traité des caractéristiques de certains types de pierre et de leur altération. Je complète ici la liste donnée dans mon ouvrage de 1932 par des exemples non exhaustifs; ces études sont citées pour autant qu'elles abordent les problèmes d'altération de la pierre; elles ne comprennent donc pas celles qui sont consacrées aux roches pour la construction des routes:

Allemagne

BEEGER H.D., PRESCHER H. et QUELLMALZ W., *Geologisch-mineralogische Untersuchungen der Sandsteine und Zemente an der Goldenen Pforte am Dom zu Freiberg*, « Staatl. Mus. Mineral. Geol. » Dresde, 1962, p. 69-114; FRATZ M., *Die natürlichen Bausteine und Gesteins-Baustoffe Württembergs*, Stuttgart, 1944; KNETSCH G., *Geologie am Kölner Dom*, « Geologische Rundschau », n° 40, Stuttgart, 1952, p. 173; HOPPE W., *Die technische Untersuchung und Beurteilung der Bausteine*, « Zs. f. prakt. Geol. », t. 48, Halle/Saale, 19 p. 25-34, 43-47 et 49-59; HOPPE W., *Die Natursteinvorkommen der Deutschen Demokratischen Republik*, « Zeitschrift für angewandte Geologie », vol. 8, Berlin, 1963; KELLER G., *Verwitterungserscheinungen an Sandsteinen des Oberkarbons und die Verwendung der oberkarbonischen Ruhrsandsteine als Bausteine*, « Geologie und Bauwesen », vol. 3, Vienne, 1919; LEMKE E., *Dunkle, polierbare Gesteine des Odenwaldes*, « Zeitschrift für praktische Geologie », t. 48, Halle/Saale, 19 p. 19; LEMKE E., *Dunkle, polierbare Gesteine des Bayerischen Waldes*, « Zeitschrift für praktische Geologie », t. 49, Halle/Saale, 1941; SICKENBERG O., *Steine und Erden*, « Geologie und Bergbau in der Provinz Hannover », vol. 5, Brême-Horn, 1951; STOIS A., *Schalenverwitterung am Marmor*, « Geologie und Bauwesen », t. 5, Vienne, 1935, p. 256-269.

Amérique du Nord

KIERSCH G.A., *Mineral Resources Navajo-Hopi Indian Reservations Arizona-Utah*, « Nonmetallic Mineral University of Arizona », vol. 2, Tucson, 1955.



Fig. 1 Détail de la crypte de Gurk en Carinthie (vers 1160).

Angleterre

The Weathering, Preservation and Maintenance of Natural Stone Masonry, « Buildings Research Station Digest », n°s 20 et 21, Londres, 1950; *Building Research Congress 1951. Record on discussion*, Londres, 1951; BURGESS S.G. et SCHAFFER R.J., *Cleopatra's Needle*, « Chemistry and Industry », n°s 1026-1029, Londres, 1952.

Australie

BROWN G. et BOLTE H.E., *Victorian Building Stones*, Melbourne, 1949.

Autriche

HAUSER A. et URREGG H., *Die Bautechnisch nutzbaren Gesteine Steiermarks*, « Technische Hochschule Graz », vol. 10, Graz, 1948-1951; KIESLINGER A., *Verwitterungsercheinungen an Bausteinen*, « Mitteil. Geogr. Ges. Wien », t. 75, Vienne, 1933, p. 364-372; ID., *Verwitterungsstudien in der neu erschlossenen Gruft der Augustinerkirche in Wien*, « Die Denkmalpflege », Vienne, 1933, p. 58-60; ID., *Ein Beitrag zur Marmorverwitterung. Erneuerungen am Wiener Postsparkassengebäude*, « Österr. Bauzeitung », t. 9, Vienne 1933, p. 269 sv.; ID., *Nouvelles études sur la désagrégation des pierres à bâtir*, « Mousseion », t. 20, Paris, 1933, p. 26-32; ID., *Gesteinskundliche Untersuchungen an alten Grabsteinen*, « Geologie und Bauwesen », t. 6, Vienne, 1934, p. 1-21; ID., *Die Grünschiefer von Mittelkärnten als Baustein*, « Carinthia II », t. 126, Klagenfurt, 1936, p. 1-10; ID., *Verwitterungsstudien in Innsbruck*, « Geologie und Bauwesen », t. 9, Vienne, 1937, p. 18-26; ID., *Der Serpentin von der Judenbrücke (Mölltal, Kärnten) und seine Verwitterung*, « Zentralbl. f. Mineralogie », Stuttgart, 1937; ID.,

La pierre elle-même est quelquefois merveilleusement conservée malgré son haut âge et la sévérité du climat (fig. 1). Parfois, les dommages se limitent évidemment à quelques blocs seulement, les autres se trouvant encore dans un état assez satisfaisant dans les mêmes conditions (fig. 2). Or, ces pierres viennent sans nul doute de la même carrière : de qualité différente malgré la même provenance, elles mettent en garde contre des généralisations prématurées.

Les différences dans les roches peuvent être pétrographiques à l'origine. Entre les meilleurs bancs de calcaire par exemple s'intercalent fort souvent des bancs marneux qui n'ont pas une résistance suffisante aux intempéries. Aussi bien, pour la construction de la grande « Votivkirche » néogothique de 1856-1879 à Vienne, avait-on choisi comme le meilleur possible le calcaire miocène de Wöllensdorf (Basse-Autriche); mais en cours d'exploitation on n'avait pas évité les bancs marneux et les avait employés comme les calcaires purs. Ce sont les calcaires marneux seulement qui ont subi de gros dégâts.

Les inégalités des roches peuvent aussi être secondaires, résultant de pressions tectoniques tout à fait locales, ou d'une désagrégation déjà commencée jusqu'à un certain point, etc. Il y a toujours dans les plus belles

Die Steine von St. Stephan, Vienne, 1949; ID., *Die nutzbaren Gesteine Kärntens*, Klagenfurt, 1956; ID., *Die nutzbaren Gesteine Salzburgs*, Salzburg, 1964.

Belgique

X., *Le petit granit. Fiche Technique (Centre scientifique et technique de la construction)*, « Notes d'information technique », n° 55, Bruxelles, 1947; CAMERMAN C., *Un aspect de la collaboration du chimiste à l'activité de l'ingénieur civil des constructions. La défense contre les méfaits de l'ion SO₂*, « Bulletin du Centre d'Etudes, de Recherches et d'Essais scientifiques », n° 4, Bruxelles, 1949; ID., *Les pierres naturelles de construction*, « Annales des Travaux Publics de Belgique », n° 4, Gand, 1960/61; DETHYE F., *Le marbre noir de Mazy-Golzennes*, « Rev. Matér. Construc. », n° 274, 1932, p. 49-51; DUMON P., *Note sur les marbres rouges en Belgique*, « Publications de l'Association des Ingénieurs de la Faculté Polytechnique de Mons », fasc. 3, 1957; ID., *La géologie des carrières*, « Revue mensuelle Le Mausolée », Givors/Rhone (v. 1962); PICKEL W., *Marmor in Belgien*, « Marmor », Berlin, 1941.

Danemark

KIESLINGER A., *Die nutzbaren Gesteine Dänemarks*, « Steinbruch und Sandgrube », t. 55, Berlin, 1962, p. 210-218; NORREGAARD E.M., *Naturlige Bygningssten anvendt in Kobenhavens Nyere Bygninger*, « Meddelelser fra Dansk Geologisk Forening », t. 8/3, Copenhagen, 1933.

France

CHARIN V., *Les marbres français*, « Mines, Carrières », t. 12, n° 133, Paris (?), 1933.

carrières des parties moins bonnes qu'il faut éliminer pour les travaux difficiles. L'examen microscopique donne les informations essentielles. Il est complété par diverses épreuves chimiques, par la détermination de la porosité, etc. Ou encore par des essais mécaniques, par exemple l'essai comparé de résistance au gel : changement éventuel de la résistance à la compression en état sec et en état congelé vingt-cinq fois; on a également tenté d'imiter l'action du gel en faisant cristalliser des solutions de certains sels. Le plus souvent, ces examens de laboratoire font découvrir les causes internes des propriétés d'une roche et de sa résistance aux intempéries. Ils autorisent une prognose assez exacte. Mais ils ne suffisent pas toujours naturellement. On a décidé, spécialement en Allemagne (Rathgenkoch) et en Angleterre (Building Research Board), l'exposition de petits échantillons isolés en plein air pendant quelques années; au total, les observations qu'on en tira furent assez pauvres. Car la réaction des échantillons n'est pas, à mon avis, comparable à la situation sur le bâtiment même. L'emplacement spécial des pierres dans les murs, avec les différences de température et d'humidité à l'extérieur et à l'intérieur, sous l'influence du mouvement de l'humidité dans les parois, pour ainsi dire dans leur fonction vivante, est tout à fait différente (fig. 3).



Fig. 2. —Détail de la tour de l'église de Maria Stiegen à Vienne.

Grèce

MARINOS G.F., *Notes on the structure of Greek Marble*, « American Journal of Science », t. 246, 1948, p. 386-389.

Hongrie

FOLDVARY A., *A pizskei vörösmárvány időállósága (La durée des marbres de Pizske)*, « Technika », t. 33, Budapest, 1933.

Israël

SHADMON A., *Marbles in Israel*, Ministry of Development, Jérusalem, 1965.

Italie

ATZENI F., *Le Cave di Marmo di Lasa nella Val Venosta (Bolzano)*, « Relazione sul Servizio Minerario nell'anno 1933 », Ministero delle Corporazioni, Rome, 1935; BUONAPANE A., *Risultati di alcune prove su materiali da costruzione della provincia di Avellino*, « Ricerca Scientifica », t. 24, n° 10, Rome, 1954; KÖLL L., *Laaser Marmor, Gewinnung und Verwertung*, « Tiroler Wirtschaftsstudien », n° 19, Innsbruck, 1964; MANFREDINI M., *Materiali naturali litoidi da costruzione della provincia di Rieti*, « L'industria Mineraria », Faenza, 1954; MONTALDO P., *I graniti della Sardegna. Studio morfotettonico e caratteristiche tecniche*, Cagliari, 1962; PENTA F., *I materiali da costruzioni dell'Italie meridionale*, 2 vol., Naples, 1935; ID., *I materiali da costruzione del Lazio*, Consiglio Nazionale delle Ricerca Scientifica, Roma, 1956; RODOLICO Fr., *Le pietre delle città d'Italia*, Florence, 1952; SEIPP H., *Der Marmor von Laas (Lasa) im Vintschgau (Südtirol) und die Marmorwerke der « Società Anonima Lasa per l'Industria del Marmo »*, « Geologie und Bauwesen », t. 8, Vienne, 1936, p. 75-95.

Pologne

KRUGER K., JUNGST H. et STÖCKE K., *Die technische Bewertung der Natursteine des ehemaligen Polen*, 2^e éd., Berlin, 1943.

Suède

HAGERMAN Tor H., *Om Svenska Bergarter och deras Proving för Konstruktionsändamal*, « Staten Provningsanstalt Meddelande », n° 85, Stockholm, 1943.

Suisse

EBERLE G., *Tessiner Gneis*, « Natur u. Volk. Ber. d. Senckenbergischen Naturforsch. Ges. », t. 88, Francfort/M., 1958, p. 69-74; QUERVAIN F. de et GSCHWIND M., *Die nutzbaren Gesteine der Schweiz*, 2^e éd., Berne, 1949; QUERVAIN F. de et JENNY V., *Verhalten der Bausteine gegen Witterungseinflüsse in der Schweiz*, « Beiträge zur Geologie der Schweiz. Geotechnische Serie », n° 30, Berne, 1951.

Tchécoslovaquie

ZARUBA G., *Hospodárne využití mramorových lomů u Vrchlabí a Slivence (Economic utilization of Czech marble quarries)*, Publications from the Faculty of Civil Engineering, Prague, 1949.

Turquie

SAYAR M. et ERGUVANLI K., *Türkiye Mermelei ve Insaat Taslari (Marbres et roches sédimentaires de la Turquie)*, Istanbul, 1955.

L'étude du conditionnement des pierres à l'intérieur des murs d'un ancien bâtiment fournit une expérience que la nature a commencée depuis longtemps déjà et dont il faut analyser les effets éventuels pour l'altération du matériau.

La seconde partie s'occupe des divers facteurs qui provoquent l'altération. Il est évident que divers facteurs se lient le plus souvent à un syndrome, qu'ils interfèrent et qu'ils se conjuguent les uns aux autres.

1 L'HUMIDITE DANS LES BATIMENTS

L'humidité, dans les aspects variés de son apparition, est l'ennemi numéro un de tous les matériaux et de toutes les constructions. Elle produit des altérations chimiques autant que physiques. Il existe plusieurs sources et plusieurs sortes d'humidité, aux conséquences très différentes. Il faut apprendre à les distinguer pour établir un diagnostic correct qui permettra de prendre les mesures indispensables ou de proposer des remèdes justes et efficaces ⁽³⁾.

a) Humidité de carrière

Dans la roche, en carrière, les intergranulaires d'une pierre ou « pores » sont remplis d'une humidité originale qui s'appelle ordinairement « humidité de carrière » (*Bruchfeuchte*). Dans cet état d'humidité, quelques blocs de pierres sont en danger de gel et ne doivent pas être mis en plein air avant d'avoir atteint un certain degré de sécheresse. Indépendamment de cette humidité originale se rencontrent aussi des cas d'humidité secondaire, à savoir d'une humidité acquise plus tard. Faute d'isolation, une pierre déjà sèche peut être à nouveau pénétrée par l'eau ascendante et être ensuite victime du gel (fig. 4).

b) Humidité de la pluie et de la brume

L'effet le plus simple en est une corrosion chimique sur les pierres assez solubles, pratiquement sur les calcaires polis ou « marbres » des tailleurs de pierre. La perte du poli s'ajoute à une perte de couleur; le marbre devient aveugle (effet de verre dépoli ou « *Mattscheibenwirkung* ») (fig. 5).

Mais un effet beaucoup plus important est celui de la périodicité des pluies. Il existe un changement continu d'humidité et de sécheresse, que j'ai nommé le « rythme de l'humidité » : ce rythme est une des causes principales de la formation de croûtes comme on le verra plus loin.

⁽³⁾ Voir en outre : EGNER K., *Feuchtigkeitsdurchgang und Wasserdampfkondensation in Bauten*, « Forsch. u. Fortsch. im Bauwesen », série C, n° 1, Stuttgart, 1950; FLUGGE R., *Feuchtigkeit im Hochbau*, Halle/Saale, 1931; KIESLINGER A., *Feuchtigkeitschäden an Bauwerken*, « Zement und Beton », n° 9, Vienne, 1957.

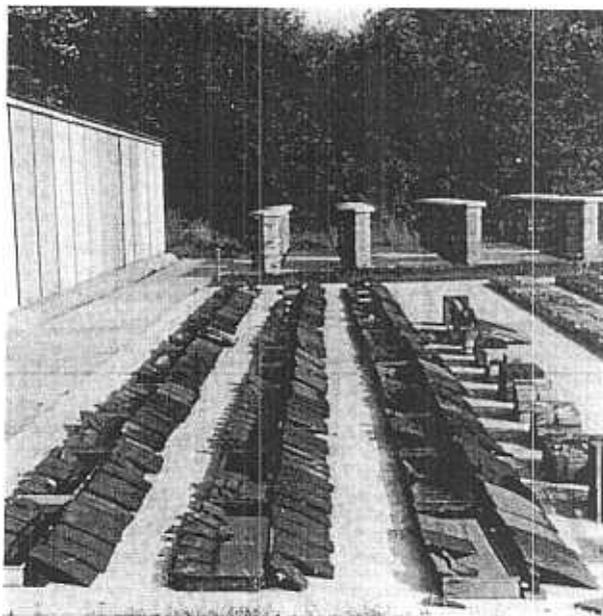


Fig. 3. — Exposition d'échantillons ou « exposure tests » dans un institut spécialisé.

c) L'humidité montante du sol

Dans les murs toujours poreux et sans isolation horizontale, l'humidité du sol, enrichie par des sels solubles, monte par capillarité, quelquefois aussi par diffusion, jusqu'à une certaine hauteur dont on parlera plus tard (fig. 6). L'humidité quitte ensuite le mur par évaporation, mais les sels solubles s'accumulent et vont cristalliser dans les parties les plus hautes de la zone d'imprégnation.

Il y a plusieurs sels dans le sol; la plupart d'entre eux sont des sulfates. A cause de son hygroscopicité particulière, le sulfate de magnésium supplante les autres et se rencontre dans les efflorescences des murs humides; en fait, il est presque toujours confondu avec le salpêtre. Ces sels cristallisants provoquent une accélération très notable du développement des croûtes en toutes sortes de pierres, même dans les silicates, par exemple dans le granit (fig. 7).

La question la plus intéressante et non la moins importante pour les mesures de protection, est celle de la hauteur de l'ascension. Nous avons trouvé la loi suivante : l'humidité monte jusqu'à une hauteur telle que la surface trempée soit assez grande pour que l'humidité venant du bas puisse s'évaporer. La surface humide a conséquemment toujours dans un cas particulier la même hauteur relative. Si cette surface est couverte par un enduit imperméable, quel qu'il soit, l'humidité est obligée de monter plus haut pour atteindre une



Fig. 4. — Bassin de fontaine en calcaire où le gel a fait éclater des morceaux de la pierre retrempée durant quelques années.

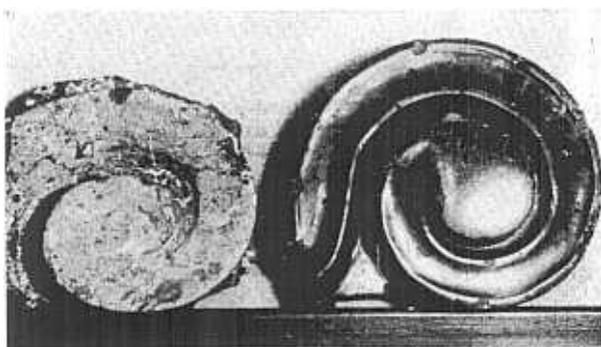


Fig. 5. — Volutes de marbres polies et dépolies.

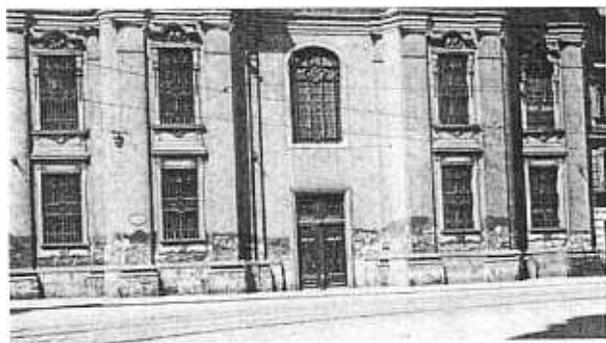


Fig. 6. — Façade d'une église baroque de Vienne.

surface qui autorise son évaporation. Dans nos villes, mains exemples révèlent qu'on a voulu supprimer l'humidité par l'application d'un enduit imperméable, et qu'on a donc prétendu le contraire (fig. 8 et 9).

L'assainissement et l'assèchement sont aussi difficiles que dispendieux. La seule solution sûre est le sciage horizontal des murs et l'intervention d'une isolation efficace. Dans les bâtiments historiques dont les murs

épais sont bâtis en pierre taillée, on ne peut souvent pas installer d'isolation. Mais on peut y faire descendre la hauteur de la surface d'évaporation par une fosse creusée au pied des murailles (fig. 10).

Par ailleurs, les méthodes d'assèchement intérieur des murs humides sont extrêmement nombreuses. L'une d'elles, celle de l'ingénieur belge A. Knapen, eut une grande popularité au commencement de notre siècle, fut ensuite oubliée, puis a retrouvé un emploi nouveau depuis deux ans. Son principe consiste en l'application de « siphons », c'est-à-dire de tubes de terre cuite très poreuse, dans des perforations obliques montant de l'extérieur des murs. Ces siphons travaillent comme un drain; ils attirent l'humidité de leur environnement. Dans le vide des tubes se fait une évaporation qui fait baisser la température : l'air devenu un peu plus pesant s'échappe alors du siphon. On a erronément imputé à Knapen la fausse opinion qu'il tenait l'air humide pour plus pesant que l'air sec. En vérité, dans ses publications originales, Knapen a expressément interprété l'augmentation du poids de l'air humide par la réfrigération produite par l'évaporation. Malheureusement, les siphons ont une fonction limitée dans le temps, parce que les pores des tubes se remplissent au bout de quelques années de sels cristallisants.

Il est impossible de traiter ici des autres systèmes d'assèchement. Je me borne à souligner que les systèmes par osmose électrique semblent avoir des chances de réussite. Je ne puis davantage aborder ici les autres formes d'humidité dans les bâtiments, entre autres celles de l'humidité par condensation. Il est indispensable en tout cas de définir un juste diagnostic avant d'essayer une thérapeutique.

2. FORMATION DE CROUTES (MALADIES EN PLAQUES)

La formation de croûtes ou maladie en plaques, comme Krumbein et Pochon notamment l'ont appelée, ou « calcin » comme on dit en France et en Belgique, est sans doute le problème central de l'altération des pierres. Les uns la tiennent pour une maladie très dangereuse, pour ne pas dire vitale; les autres sont d'avis que le « calcin » est un phénomène d'autoprotection, au moins chez les calcaires (voir C. Camerman, 1961, p. 13). De cette dualité d'interprétation dépend le sort de la conservation des monuments, spécialement de la question d'admettre ou non l'emploi des enduits préventifs, des « Steinschutzmittel », des imprégnations, des peinturages, etc. (4).

(4) Supplément partiel de bibliographie depuis 1931-1932 : CAMERMAN C., *Les pierres naturelles de construction*, « Annales des travaux publics de Belgique », n° 4, Gand, 1961; KIESLINGER A., *Krustenbildung an Bausteinen*, « Bautenschutz », t. 2, Berlin, 1931, p. 25-29; ID., *Die Bautechnische Bedeutung der Krustenbildung*, Ibid., p. 97-100; ID., *Behebung und Verhütung der Krustenbildung an Bausteinen*, « Bauten-

Examinons le développement de cette maladie à travers un calcaire ou un grès à ciment calcaire. Les eaux de pluie pénètrent dans la pierre; elles y dissolvent le carbonate de chaux. En retournant à l'air libre par évaporation, l'eau laisse derrière elle les matériaux dissouts, c'est-à-dire le carbonate ou le sulfate de chaux. Il en résulte un amas de ces substances dans les parties extérieures de la pierre. Ainsi, les quelques millimètres extérieurs de la pierre se consolident-ils de plus en plus et changent-ils de structure et de couleur. J'appelle cette zone la croûte *intérieure* (fig. 11).

Les matériaux dissouts à l'intérieur de la pierre peuvent s'en échapper et recristalliser au-dehors, mais uniquement dans les parties qui ne sont pas lavées par la pluie. En ce cas, les substances déterminent une incrustation en forme de petits stalactites ou staphylins. Ces concrétions staphyloformes, ou « Zäpfchensinter » en allemand, composent la croûte *extérieure* (fig. 12 à 16). Cette croûte consiste en carbonate de chaux et en une quantité variable de gypse. Dans les grandes villes, cette croûte est toujours noircie par la suite. On a souvent confondu ces incrustations avec des lichens.

Les innombrables répétitions du rythme de l'humidité augmentent la dissolution intérieure et une zone sous-jacente à la croûte se désagrège finalement en matière sablonneuse et farineuse. Après quelque temps, la plaque qui consiste soit en une croûte intérieure seulement, soit en une croûte intérieure et extérieure à la fois, se fend et laisse apparaître une pierre déjà amollie. Le cours principal de la maladie n'est pas simple. Il est influencé, ralenti ou accéléré par des facteurs accessoires (fig. 17).

Un ralentissement, voire un arrêt, est apporté par la pluie. Généralement, les vents pluvieux sont distribués avec une grande inégalité; une « rose des vents pluvieux » accuse le côté d'où vient la pluie maximale, la « Wetterseite ». Les parties exposées à la pluie sont tout à fait intactes, les autres en revanche sont détruites (fig. 18 - 19).

Les dangereux sels cristallisants sont enlevés par la pluie des pores de la pierre; les pores restent ouverts et respirent; la formation de plaques est empêchée. Cette constatation conduit au principe d'une thérapeutique, l'unique qui réussisse : les lavages répétés et réguliers (fig. 20).

schutz » t. 3, Berlin, 1932, p. 58-61; ID., *Ist die Krustenbildung an Bausteinen schädlich?*, « Geologie und Bauwesen », t. 5, Vienne, 1935, p. 64-67; ID., *Steinschutzmittel*, « Handbuch der Werkstoffprüfung », vol. 3, Springer-Verlag, Berlin, 1940-1941, p. 204-212, et 2^e éd., Springer Verlag, Berlin - Göttingen - Heidelberg, 1957, p. 194-201; ID., *Rahmenverwitterung*, « Geologie und Bauwesen », t. 24, Vienne, 1959, p. 171-186; KOCH J., *Steinschutz durch Tränkung*, « Baugilde », t. 20, 1938, p. 660-663; MAMILLAN M., *Recherches récentes sur le nettoyage des façades en pierre calcaire*, Supplément aux « Annales de l'Institut Technique du Bâtiment et des Travaux publics », t. 17, Paris, 1964, p. 859-889; RATHGEN Fr. et KOCH J., *Verwitterung und Erhaltung von Werksteinen. Beiträge zur Frage der Steinschutzmittel*, Verlag Zement und Beton, Berlin, 1934.

Fig. 7. — Vienne, St-Antoine. Formation de plaques sur un escalier de granit.

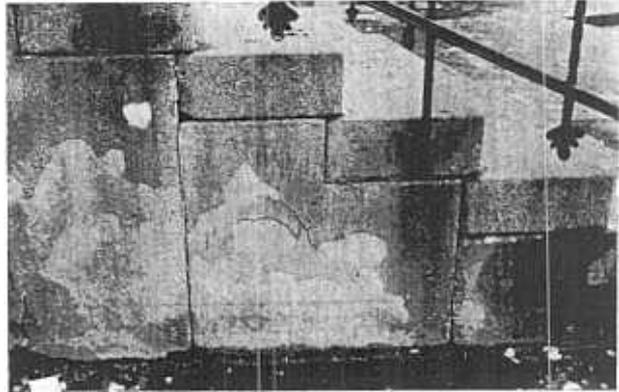


Fig. 8. — Humidité soulevée par la présence d'un escalier jointif.

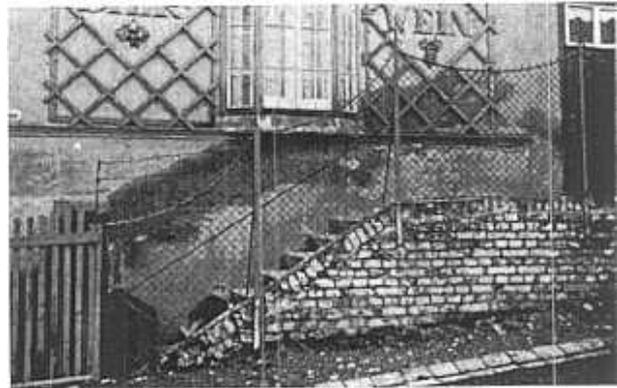


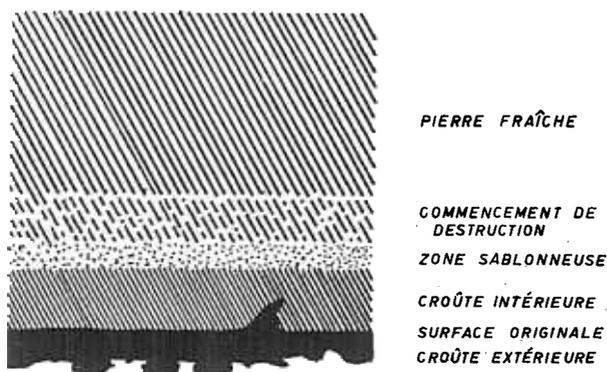
Fig. 9. — Humidité remontée à l'étage par l'application d'un enduit imperméable au rez-de-chaussée.



Fig. 10. — Gurk. Fosse autour d'une église ancienne pour abaisser le niveau de l'humidité.



Fig. 11. Schéma de la formation des croûtes.



Elle permet de tirer une autre conclusion capitale : à savoir qu'il est absolument nuisible et mortel pour la pierre de la couvrir d'un enduit quelconque. Pareil enduit « étouffe » la pierre dont la désagrégation est accélérée de plusieurs dizaines d'années (fig. 21). Je ne conteste pas que certains auteurs ont sur ce sujet une opinion moins sévère; J.A. Koch par exemple, plaide en faveur de l'emploi de l'huile de lin (1938), car il s'agit à son sens d'une bonne imprégnation pour la protection des surfaces, sans nuisance aucune.

C. Camerman (1961, p. 13, 17 et 38) considère la formation du calcin des roches calcaires et aussi du tuffeau de Maastricht avec optimisme. Il décrit ainsi la formation d'une croûte dure, dénommée « calcin » : « C'est là un phénomène d'autoprotection des calcaires, qui explique que certains calcaires très tendres offrent néanmoins une résistance remarquable aux intempéries ». Il se rapporte expressément au dictionnaire de Viollet-le-Duc qui aurait développé pour la première fois l'idée du calcin protecteur. Toutefois, en traitant des altérations des pierres par les fumées, il concède l'exfoliation des croûtes qu'il prend erronément pour du gypse, et la formation des « chancres de la pierre ». Je n'ai point réussi à trouver le terme de « calcin » dans les onze volumes du célèbre « Dictionnaire raisonné » de Viollet-le-Duc. Mais deux parties s'occupent en fait de la question. Au tome VII, p. 126 et sv., l'auteur décrit très justement la formation des croûtes, spécialement sur les zones murales abritées de la pluie par un chéneau ou par une corniche : « En telle situation, la pierre ... par les sels... ». C'est la description la plus exacte de la formation pernicieuse des croûtes; la malignité de celles-ci s'y trouve expressément relevée. Un autre passage (p. 128) pourrait s'intituler « sur le calcin protecteur », bien que le mot même de calcin ne se trouvât point dans l'ouvrage. L'auteur y énonce l'idée que les pierres de taille ont encore de l'eau de carrière et qu'en raison de l'évaporation, une petite quantité de carbonate de chaux est migrante à la surface et y forme une croûte solide protégeant la pierre des agents externes tout en lui conférant une belle patine.

Pour récapituler, mon opinion est que la formation des croûtes est le symptôme initial d'une maladie dangereuse et quelquefois mortelle. Cette constatation ne signifie pas cependant que la croûte, « intérieure » dans ma nomenclature, doive être enlevée dans tous les cas de restauration. Certaines situations font penser que c'est un moindre mal que de l'y laisser pour un nombre restreint d'années. Mais la croûte extérieure, les petits stalactites ou « sinter », devraient être enlevés aussi vite et aussi bien que faire se peut.

3. LE GAZ DE FUMÉE

Une source de sulfatation différente des sels du sol est le gaz de fumée. Quand on brûle des charbons, les sulfides (pyrite et markasite) deviennent oxydés à



Fig. 12. — Vienne, cimetière évangélique. Croix funéraire de grès calcaireux avec des hautes bosses.

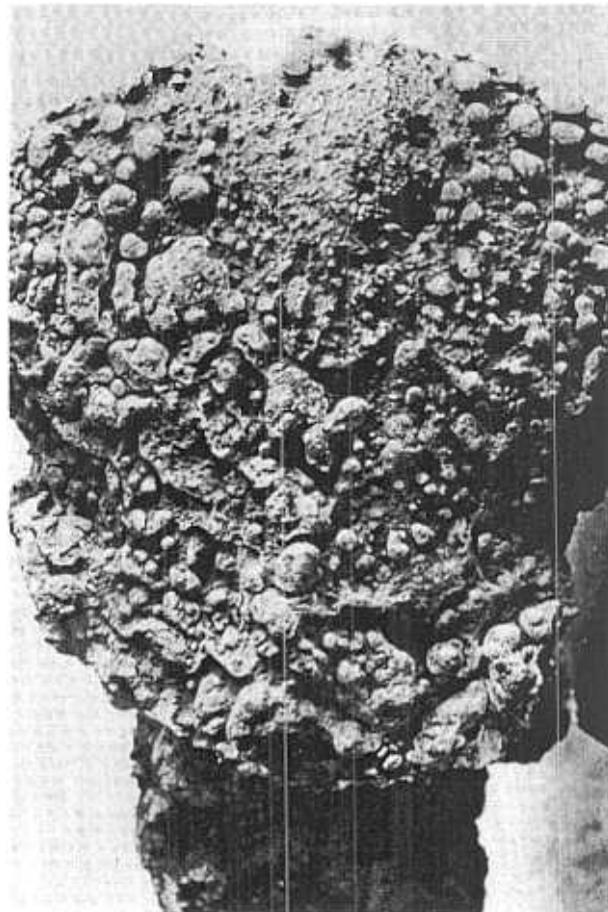


Fig. 13. — Vienne, St-Etienne. Incrustation staphyloforme sous un ornement gothique.

Fig. 14. — Formation des croûtes en lame mince.



Fig. 15. — Londres, Tempel Gardens. Incrustations limitées aux motifs protégés de la pluie.



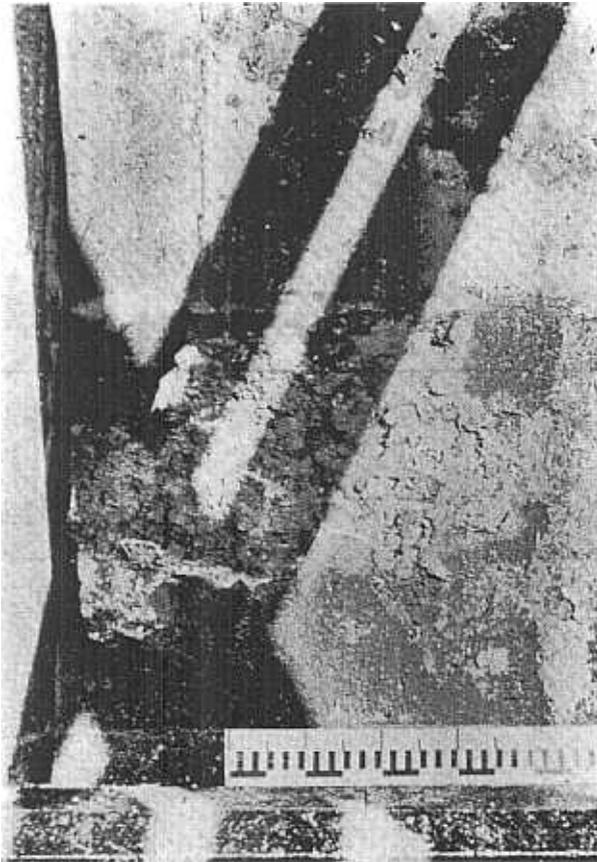
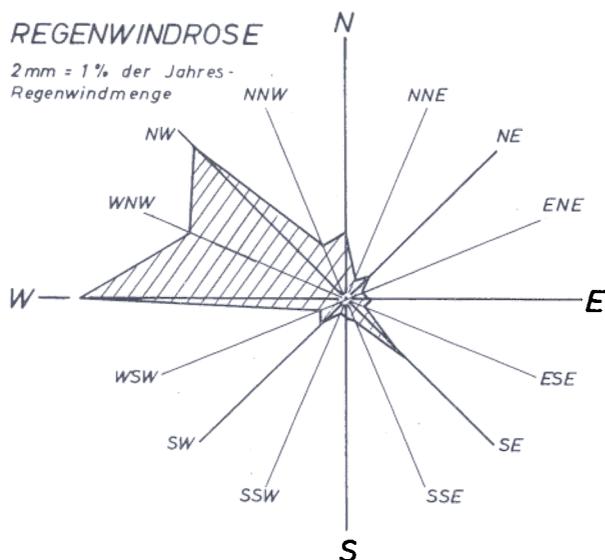


Fig. 16. — Vienne, Votivkirche. Développement de croûtes sur une église néogothique en calcaire du bassin viennois.

Fig. 17. Rose des vents pluvieux pour la ville de Vienne.



l'acide sulfureux et sulfurique. Les quantités de ces ions sulfureux dans l'air des grandes villes sont énormes, surtout dans la brume : les difficultés de Londres sont connues à cet égard. On y a établi l'institut spécial du « Air Pollution Committee » pour étudier cette calamité. Le gaz de fumée n'a pas d'effet spécifique; mais en raison de l'énorme capacité de dissolution de son acide, la vélocité de l'altération, en particulier de la formation de croûtes, est multipliée par rapport à l'effet de l'acide carbonique (5).

4. CHANGEMENT DE TEMPERATURE

Un changement de température correspond toujours à un changement de volume. Répété avec fréquence, il peut diminuer la qualité des matériaux.

Quelques altérations de pierres dans les régions arides ont été expliquées comme la suite d'une « insolation ». Une part de ces phénomènes attribués à une influence du soleil, serait plutôt l'effet d'une relaxation. Ce sont par exemple les plaques parallèles à la surface sur les granites et les grès en Nubie : elles avaient été interprétées par Walther comme une insolation; mais d'après mon opinion, vérifiée par Knetsch et d'autres, il s'agit d'une relaxation. Le même phénomène se présente aux célèbres sculptures monumentales du temple de Abu Simbel en grès éocène, qui sont coupées par des fentes de relaxation parallèles aux pentes de la colline (6). Quelques minéraux ont une grande anisotropie de la dilatation thermique; le plus frappant est le calcite qui

(5) Depuis mes citations de 1932, plusieurs monographies ont paru concernant la pollution de l'air dans les villes : CAMERMAN C., *Etude des pierres des monuments bruxellois*, « Bull. de la Soc. Belge de Géol., de Paléontol. et d'Hydrol. », t. 54, Bruxelles, 1945, p. 133-139; ID., *Deterioration of building stones by fumes*, « Ann. Inst. Tech. Bâtiment et Travaux publics », t. 14, 1948, p. 1-18; BANGERL A. et STEINHAUSER F., *Die Verteilung des SO₂-Gehaltes der Luft im Stadtgebiet von Wien*, « Archiv f. Meteorologie, Geophysik und Bioklimatologie », Série B, t. 10, Vienne, 1959, p. 132-153; KIESLINGER A., *Die Wirkung von Rauch und Russ auf Gebäude und Denkmäler*, « Österr. Bauzeitung », t. 9, Vienne, 1933, p. 237 sv.; SCHAFER R.J., *The effects of air pollution on buildings and metalwork*, « Air Pollution », Londres, 1957, p. 58-71; STEINHAUSER F., *Ergebnisse der Messungen des CO₂-Gehaltes der Luft in Österreich*, « Wetter und Leben », t. 12, fasc. 9/10, Vienne, 1960; STEINHAUSER F. et CHALUPA K., *Die SO₂-Ablagerung aus der Luft im Stadtgebiet von Graz*, « Wetter und Leben », t. 17, Vienne, 1965, p. 45-66; WEISS E. et FRENZEL J.W., *Untersuchungen von Luftverunreinigungen durch Rauch- und Industriegase im Raum von Linz*, « Wetter und Leben », t. 8, Vienne, 1956, p. 131-147.

(6) WALHTER J., *Das Gesetz der Wüstenbildung*, Leipzig, 1912.

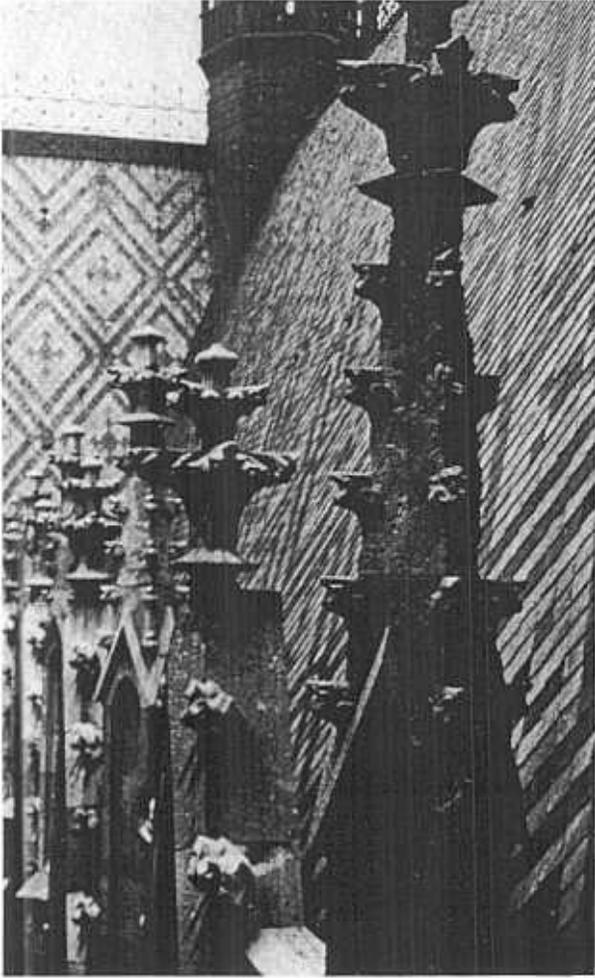


Fig. 18. — Vienne, Votivkirche. Côté mouillé intact et côté sec fortement détruit.

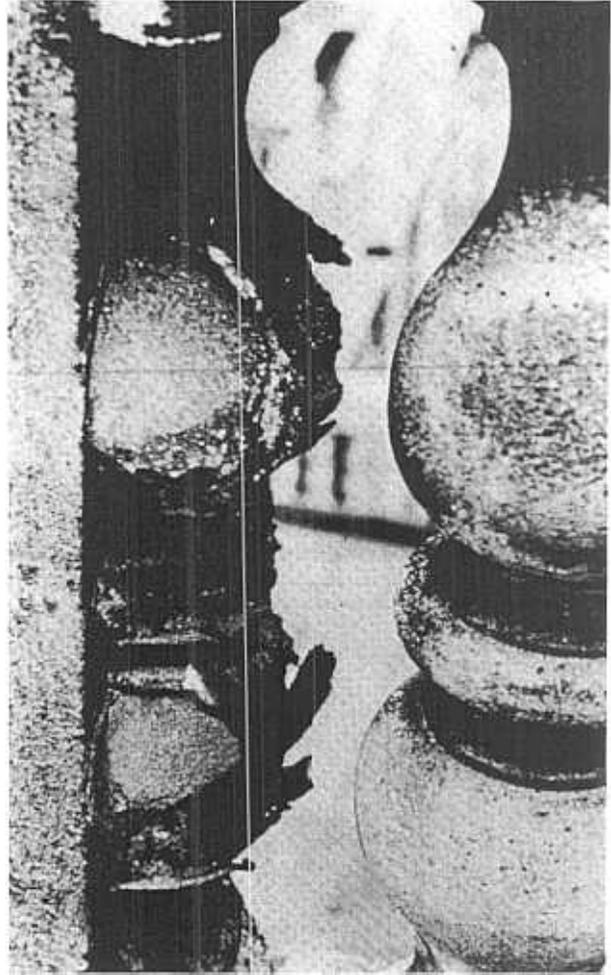


Fig. 19. — Vienne, Université. Détail d'une balustrade : les petits éléments atteints par la pluie sont intacts, les autres totalement abîmés (nouveau balustre à droite).

a une forte dilatation dans son axe principal mais une contraction dans le sens inverse. Un échauffement souvent répété fait éclater les intergranulaires des grains du calcite. Le marbre pourrit et peut tomber en grains ⁽⁷⁾.

5. L'EFFET DU GEL

Les conséquences du gel sont connues. Le changement de l'eau en glace entraîne une augmentation de volume de 9 %. Dans les constructions, on a quelquefois uti-

lisé des pierres fraîches qui avaient encore leur humidité de carrière. Le premier hiver les a fait éclater, quelquefois déjà sur le chantier (fig. 23 et 24).

(7) C'était par exemple le cas de plaques en marbre de Ratschings près Sterzing (Tyrol méridional) au bâtiment de la « Postsparkasse » à Vienne : voir KIESLINGER A., *Ein Beitrag zur Marmorverwitterung. Erneuerungen am Wiener Postsparkassengebäude*, « Österr. Bauzeitung », t. 9, Vienne, 1933, p. 269 sv.



Fig. 20. — Londres, Edmonton Arch, Navigation. Croûtes extérieures exclusivement localisées sur les zones abritées de la pluie.

Fig. 21. — Vienne, Galerie de l'Opéra. La protection d'un grès doux par un mortier de ciment a étouffé la pierre.

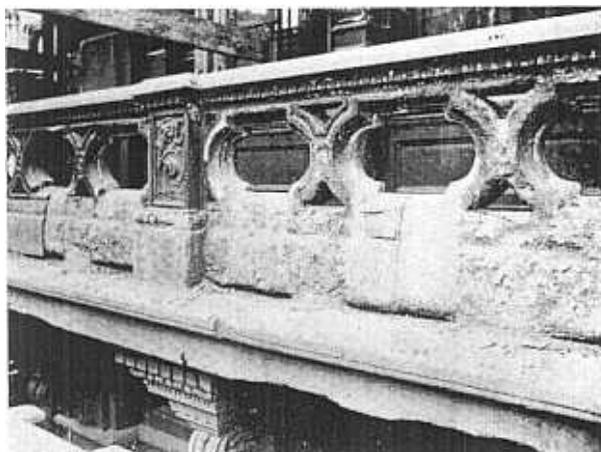


Fig. 22. — Bloc de calcaire fendu par le gel sur le chantier même.

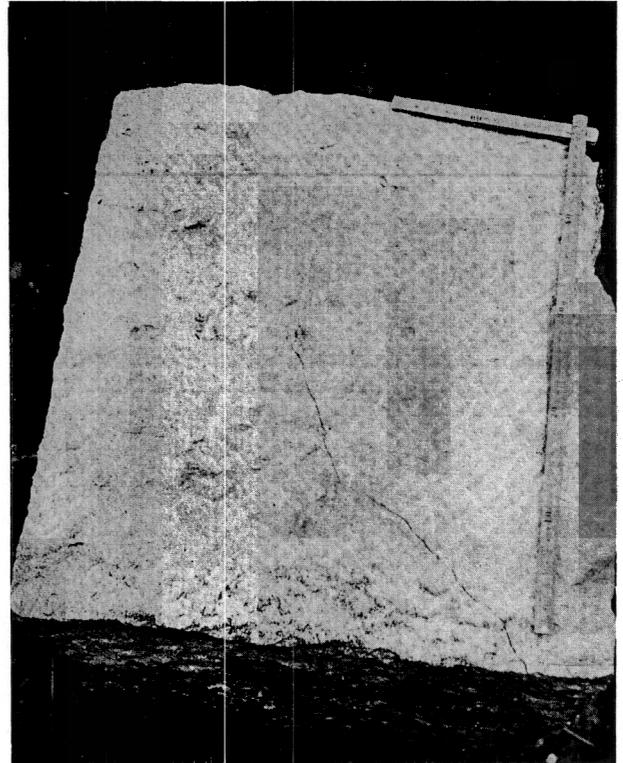
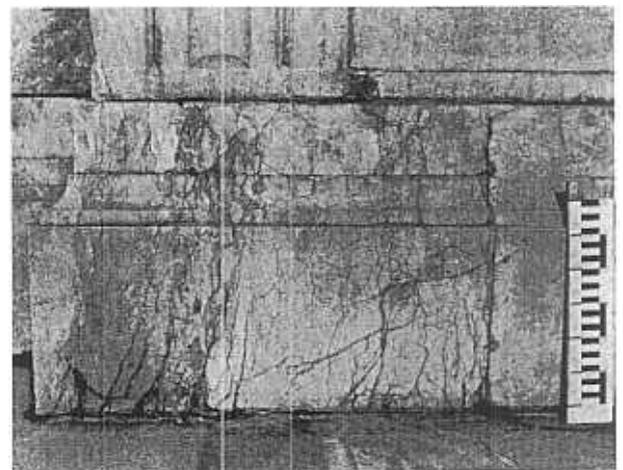


Fig. 23. — Vienne, Burggarten. Calcaire de Karst rompu par le gel.



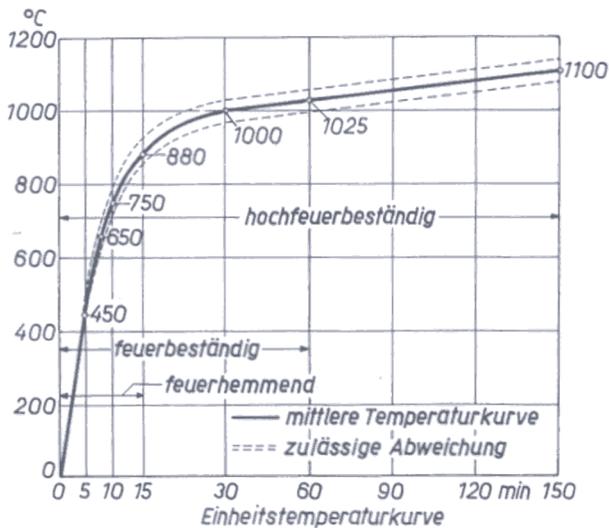


Fig. 24. — Courbe de résistance au feu. Norme allemande dite Din DVM 4102.



Fig. 25. — Vienne, Gare du sud. Eclatement des blocs de calcaire de Karst.

6. L'EFFET DU FEU (8)

Le maximum de chaleur est atteint lors des incendies. Les deux guerres mondiales, la deuxième en particulier, en ont donné des exemples innombrables. Des villes entières sont tombées en ruines. D'après mes expériences en différents pays — Norvège, Allemagne, Angleterre, Grèce, etc. — l'effet du feu est premièrement causé par la rapidité de l'échauffement (fig. 25). Les parties extérieures des pierres léchées par le feu sont soumises à une rapide dilatation de volume. Mais la transmission de la chaleur à l'intérieur de la pierre ne va pas à la même vitesse. L'intérieur des pierres reste froid et provoque des tensions à ce point fortes qu'elles outrepassent la résistance du matériau. Par voie de conséquence, des plaques et des morceaux éclatent les uns après les autres (fig. 26 à 29). Dans les parties pleines, les plaques sont parallèles à la surface. Les arêtes et les coins s'arrondissent (fig. 30).

Ce phénomène est identique pour toutes les pierres, y compris pour les calcaires. Mais un cas spécial est celui des pierres contenant un fort pourcentage de quartz. Cette matière subit un changement de structure à une température de 575 degrés. Ce changement est accompagné par une brusque dilatation de 4,5 % qui fait exploser toute pierre quartzreuse, par exemple le granit (fig. 31).

On émet souvent l'opinion que les calcaires ne sont pas résistants au feu parce qu'ils recuisent à chaud. Cette opinion est en contradiction avec mon expérience. En réalité, ni le degré atteint ni la durée du feu ne suffisent dans les incendies normaux à cuire les calcaires. L'échauffement des pierres s'accompagne de changements de coloration. Ceux-ci donnent des résultats intéressants sur la température atteinte par le feu, mais ils n'ont pas d'incidence dans la pratique. Une connaissance exacte des symptômes de l'échauffement revêt une grande importance pour certaines questions d'archéologie : par exemple, les incendies de l'Acropole d'Athènes dont nous sommes informés par l'histoire.

(8) KIESLINGER A., *Brandschäden an Natursteinen*, « Österr. Zeitschr. f. Denkmalpflege », t. 2, Vienne, 1948, p. 49-58; ID., *Effects of Fire on Building stones*, « The Quarry Managers Journal. The Master Builder », Londres, 1952; ID., *Feuerfeste Natursteine*, « Montan-Zeitung », n° 69, Vienne, 1953, p. 1-4; ID., *Ausbesserung von Brandschäden*, « Steinmetz und Steinbildhauer », t. 69, Munich, 1953, p. 162-169; ID., *Brandwirkung auf Natursteine*, « Schweizer Archiv », t. 20, Solothurn, 1954, p. 305-308; ID., *Erhitzung von Natursteinen im Zuge technischer Verwendung*, « Montan-Rundschau », n° 2, Vienne, 1954, p. 19-23; ID., *Wirkung der Atombomben auf Baustoffe*, « Montan-Rundschau », n° 5, Vienne, 1957, p. 98-100; ID., *Verhalten von Ziegelmauerwerk im Schadenfeuer*, « Die Ziegelindustrie », t. 13, Wiesbaden, 1960, p. 527-530, et « Die Wienerberger », fasc. 5, Vienne, 1963, p. 5-8.

7. ACTIVITE DES ORGANISMES

On a soupçonné depuis longtemps (Paine, 1933) les bactéries des plantes d'attaquer les pierres. Dans la dernière décennie on a continué, spécialement à l'Institut Pasteur de Paris, des études sur ce thème (Kaufmann, Krumbein, Pochon, etc.)⁽⁹⁾.

L'existence de bactéries à la surface des pierres d'un bâtiment est hors de doute. Pourquoi donc les murs

⁽⁹⁾ BLOEHLIGER G., *Mikrobiologische Untersuchungen an verwitternden Scrattenkalkfelsen*, Diss. E.T.H., Zurich, 1931; DÜGGELI, *Die Mitwirkung von Bakterien bei der Gesteinsverwitterung*, «Verhandl. Schweiz. Naturforsch. Ges.», t. 111, 1930, p. 307; HARDY T., *Microorganic rock-weathering*, «Nature», t. 142, 1938, p. 37; KAUFMANN J., *Salpetersäure als Zerstörungsfaktor an Denkmälern*, «C.R. Acad. sci.», t. 234, Paris, 1952, p. 2395; KRUMBEIN W.E. et POCHON J., *Ecologie bactérienne des pierres altérées des monuments*, «Annales de l'Institut Pasteur», t. 107, n° 4124, Paris, 1964; McLACHLAN Th., *The decay of building materials with*

seraient-ils stériles ? Ces microorganismes donnent divers produits, des acides, etc. Blöchliger a démontré en 1931 que ces produits de fermentation (par exemple, l'acide lactique) pouvaient corroder la pierre. Mais la question générale est de savoir si ces phénomènes jouent un rôle important par rapport aux autres facteurs d'altération. Il manque encore d'essais comparés où des épreuves traitées et non traitées autoriseraient des conclusions. La seule existence des bactéries qui est de toute façon

special reference to microbiological Agencies, (Joint meeting of the London section, Road and Building Materials Group and the Microbiological Panel of the society of Chemical Industry), Londres, 1938 (bibliographie de 116 numéros); ID., *Some aspects of mould growth*, «Oil and Colour Chemist's Association», t. 22, Londres, 1939, p. 180-193; PAINE S.G. et coll., *Bakterielle Korrosionen an Werksteinen durch mikrobielle Kohlensäure*, «Trans. Royal Soc.», vol. 222, Londres, 1933, p. 97; POCHON J., *Attaque bactérienne des monuments*, «Société d'Encouragement pour l'industrie nationale», Paris, s.d.

Fig. 26. — Vienne, St-Etienne. Eclatement successif de plaques dilatées par la chaleur.

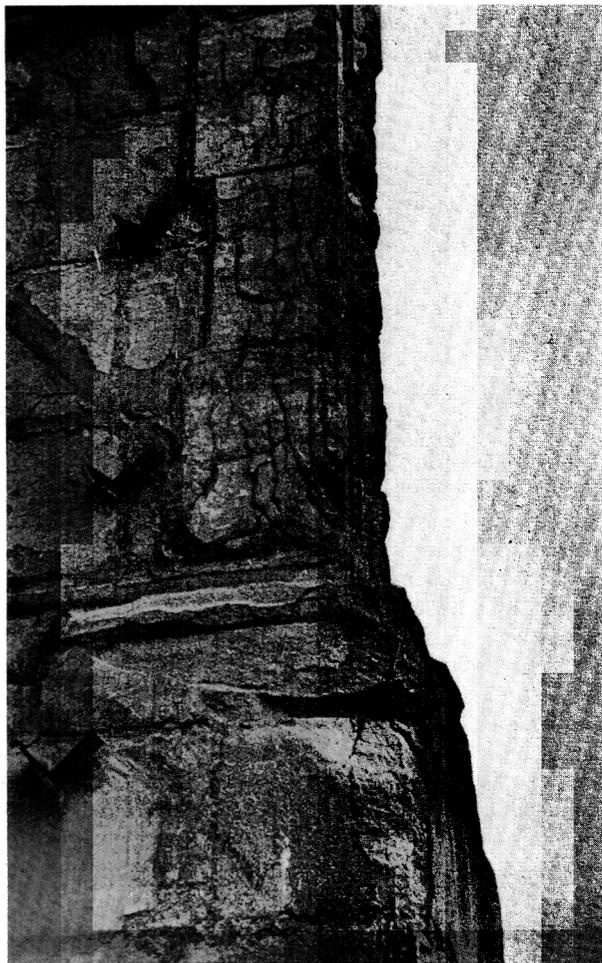


Fig. 27. — Londres, Monument de Trafalgar. Granit rompu lors d'un feu de joie.

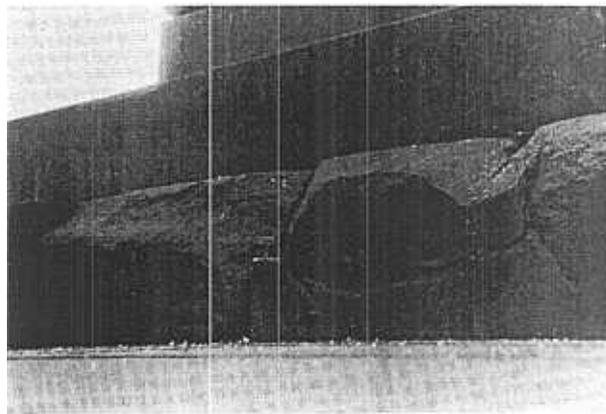


Fig. 28. — Londres, St-Mary le Bow. Eclatement des blocs de pierre.

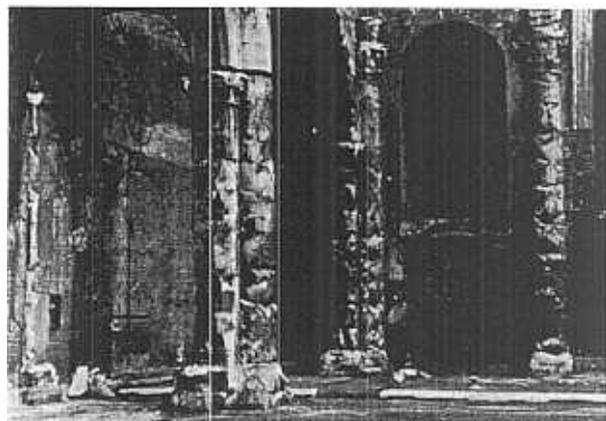




Fig. 29. — Athènes, Odéon de Hérode Atticus. Arêtes des gradins arrondies par l'éclatement sous dilatation.

Fig. 30. — Exemple de caillou de quartz éclaté par le feu.

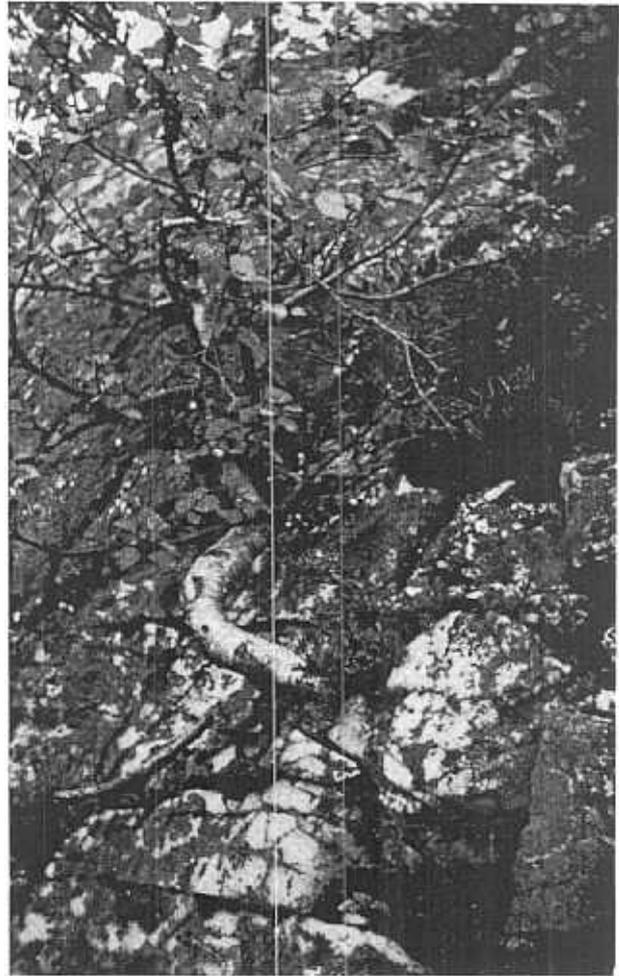


Fig. 31. — Racines de bouleau faisant éclater des grands blocs.

assurée, ne suffit pas encore à faire comprendre les formes caractéristiques de l'altération, des plaques, etc. Parmi les plantes grimpantes, on a soupçonné le lierre d'être nuisible et l'a arraché dans quelques châteaux anglais. Personnellement, je le trouve inoffensif. Les lichens sont les premiers organismes croissants sur les roches dans nos montagnes. Mais ils n'ont pas d'importance dans nos grandes villes, car ces plantes sont très sensibles au gaz de fumée. Les buissons et les arbres, spécialement les bouleaux, sont assez fâcheux par la croissance de leurs racines (fig. 31 à 33).

Pour les animaux, il faut mentionner seulement les pigeons qui vivent en foule considérable dans nos villes. Leur guano couvre les détails de l'architecture d'une manière déplorable (fig. 34 à 36). Ce guano contient 2 % d'acide phosphorique. Il corrode et perfore les couvertures de corniches qui sont faites en métal battu, fer-blanc de zinc ou de cuivre. La pluie peut y entrer,



Fig. 32. — Vienne, St-Etienne. Bouleau dislocant les joints.

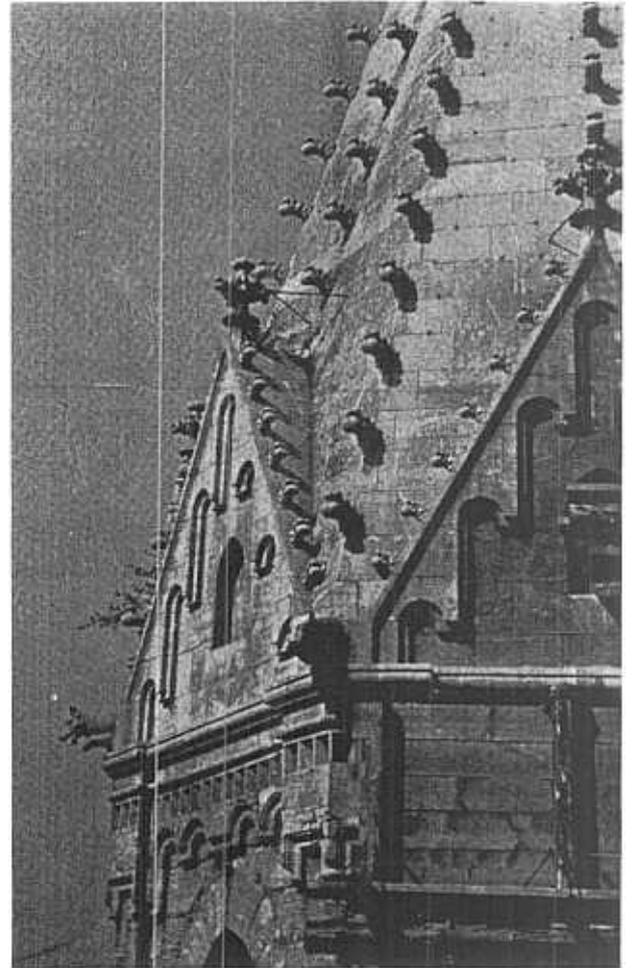


Fig. 33. — Vienne, St-Etienne. Jeunes bouleaux croissant les tours.

trempe la pierre et la fait périr lors des gelées. Cet effet est donc indirect, et beaucoup de gens ne peuvent comprendre la nécessité de limiter ces oiseaux à un nombre raisonnable (fig. 36).

Naturellement, on pourrait encore mentionner beaucoup d'autres facteurs, par exemple l'activité du vent qui travaille comme une machine soufflant le sable (fig. 37).

8. TENSIONS RESIDUELLES ET RELAXATION

Un autre facteur qui fait se briser les pierre à bâtir a été découvert par moi ⁽¹⁰⁾. Il s'agit de relaxations des tensions internes qui sont accumulées dans les roches. C'est une compression élastique qui est lentement relaxée et provoque une dilatation (fig. 38). Parfois des marbres cristallins, certains de la région de Carrare notamment, sont entièrement soumis à de sem-

blables tensions résiduelles. Celles-ci sont orientées suivant des directions prononcées. Leur relaxation produit des déformations étonnantes, qui se voient non seulement dans les plaques de revêtement mais aussi dans des pièces massives comme les couvercles des caveaux (fig. 39 à 41).

(10) KIESLINGER A., *Zur Spaltbarkeit von Granit*, « Montanrundscha », t. 5, Vienne, 1957, p. 237-243; ID., *Restspannung und Entspannung im Geisten*, « Geologie und Bauwesen », t. 24, Vienne, 1958, p. 95-112; ID., *Residual stress and relaxation in rocks*, « Report of the 21th Session Norden, XXI. Internat. Geologenkongress Kopenhagen », XVIII^e partie, Copenhagen, 1960, p. 270-276; ID., *Verspannung und Entspannung im Stein*, « Der Naturstein », t. 17, Ulm, 1962, p. 8-11; ID., *Spanning (in de toestand van samengeperst zijn), ontspanning (in de toestand van uitzetting)*, « Natuursteen », n^o 181, Amsterdam, 1962, p. 80-84.

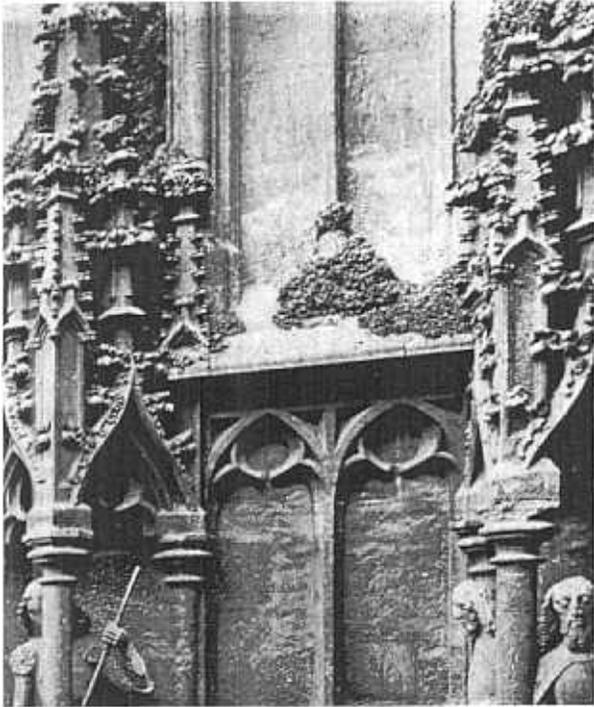


Fig. 34. — Vienne, St-Etienne. Décor masqué par le guano des pigeons.



Fig. 35. — Vienne, Votivkirche. Guano sur un tympan sculpté.

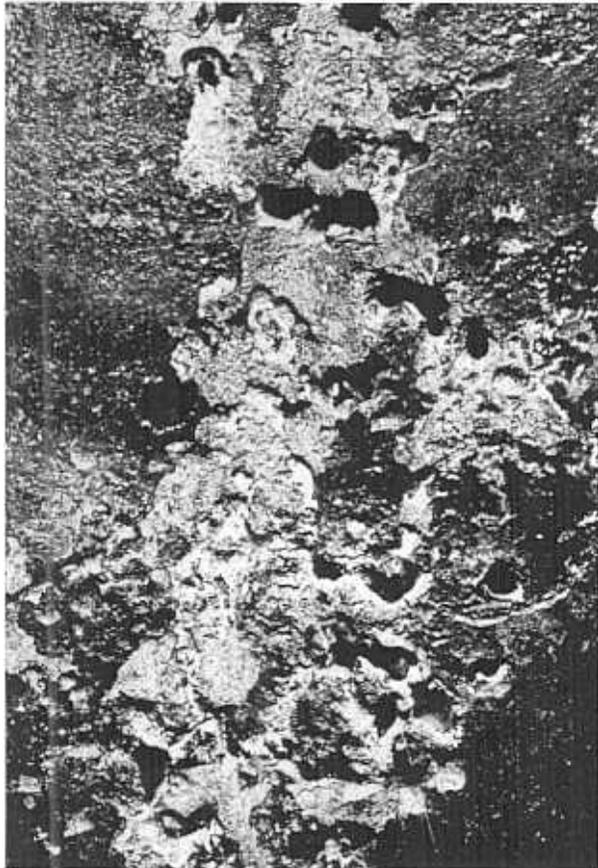


Fig. 36. — Vienne, St-Pierre. Lame de cuivre d'une coupole baroque perforée par le guano.

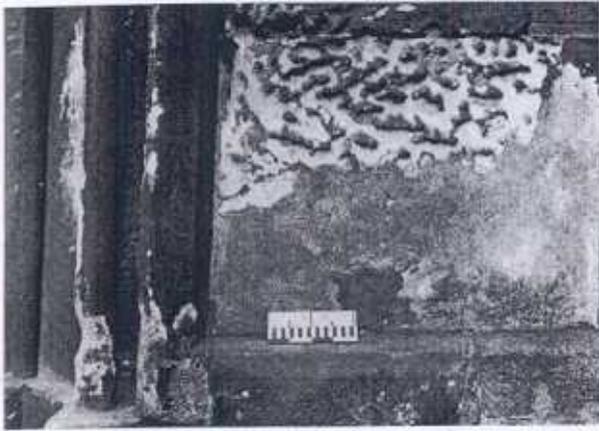


Fig. 37. — Vienne, Arsenal. Corrosion par le vent.

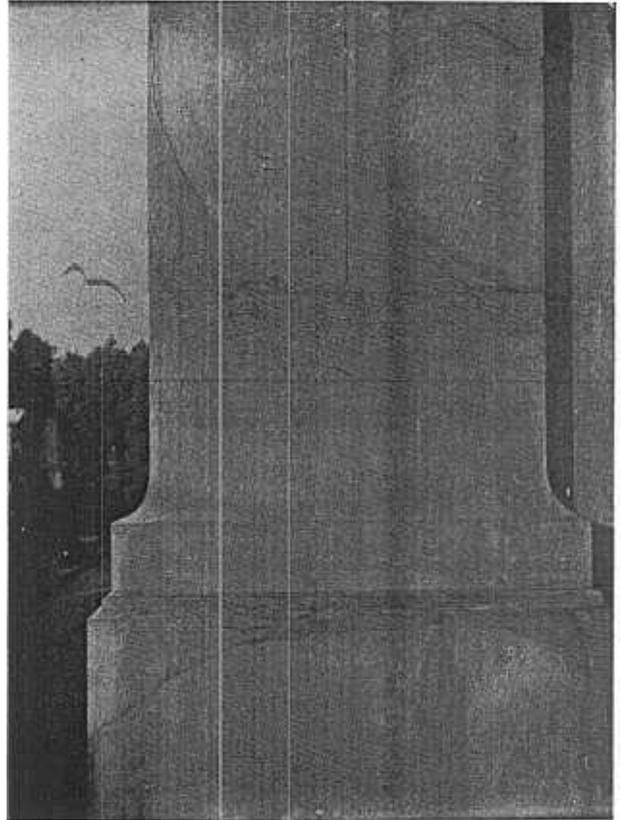


Fig. 38. — Chapelle funéraire. Dilatation progressive d'un calcaire karstique.

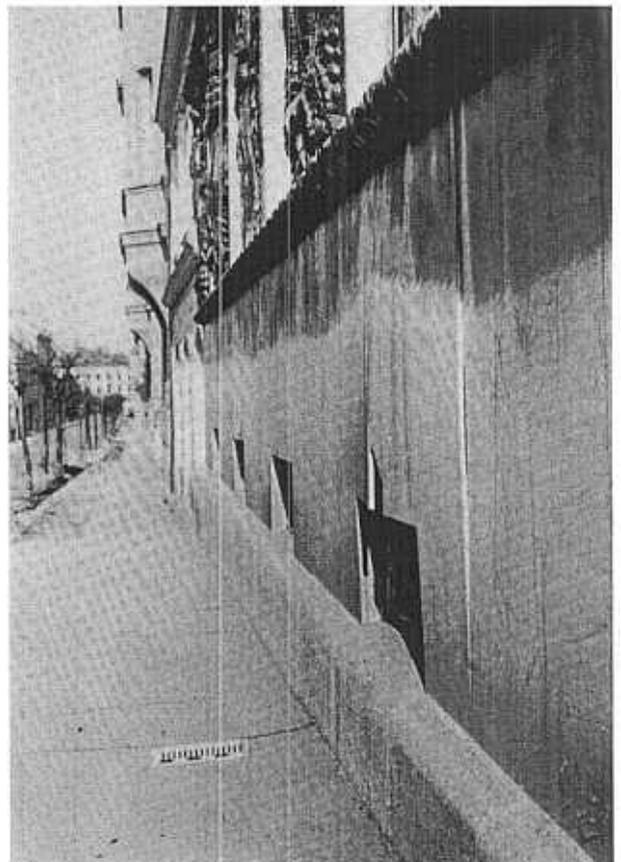


Fig. 39. — Vienne, Wattmangasse. Fluxions d'un revêtement de marbre d'une façade.

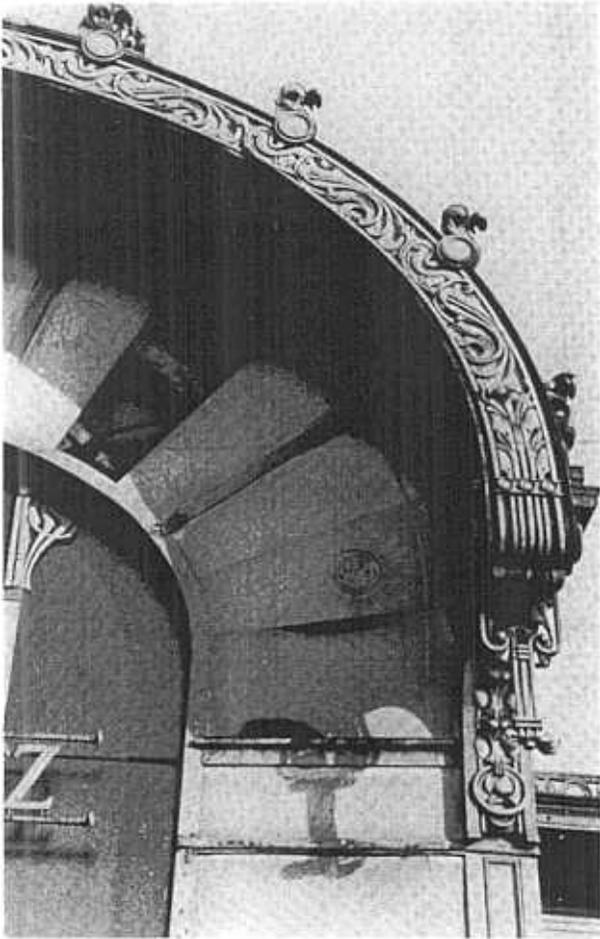


Fig. 40. — Vienne, Karlplatz. Revêtement d'un pavillon du chemin de fer.

Fig. 41. — Vienne, Hietsinger Friedhof. Couverture d'un caveau courbé de quelques centimètres par relaxation des tensions internes.

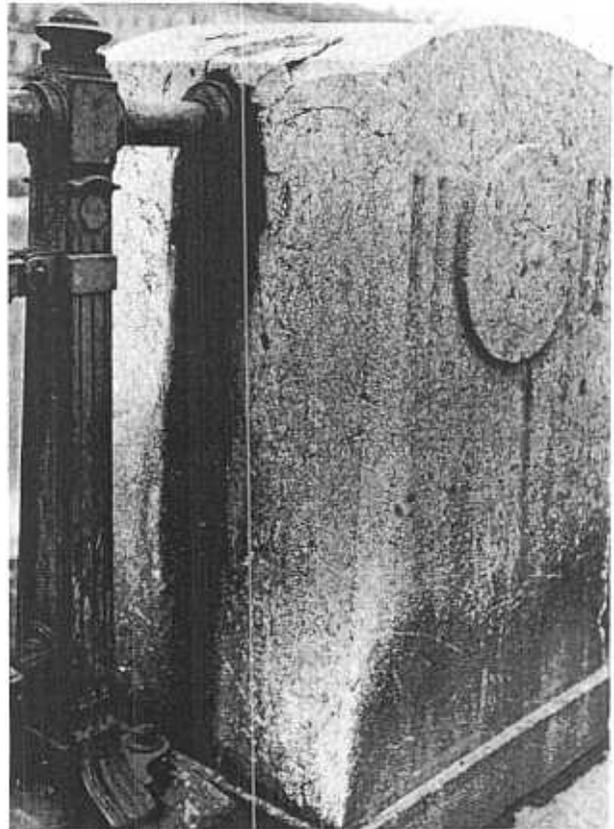


Fig. 42. — Vienne, quai Franz-Joseph. Borne de calcaire fendillée par la rouille.

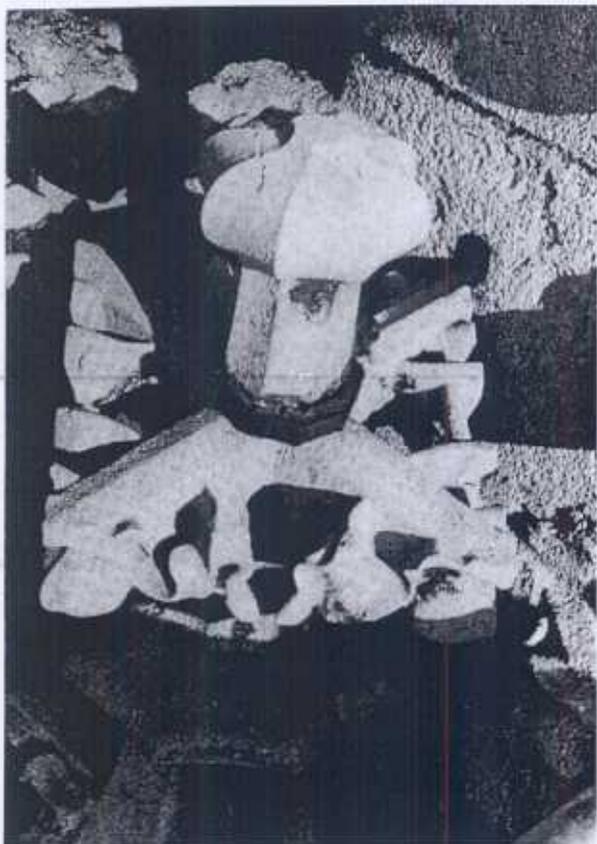
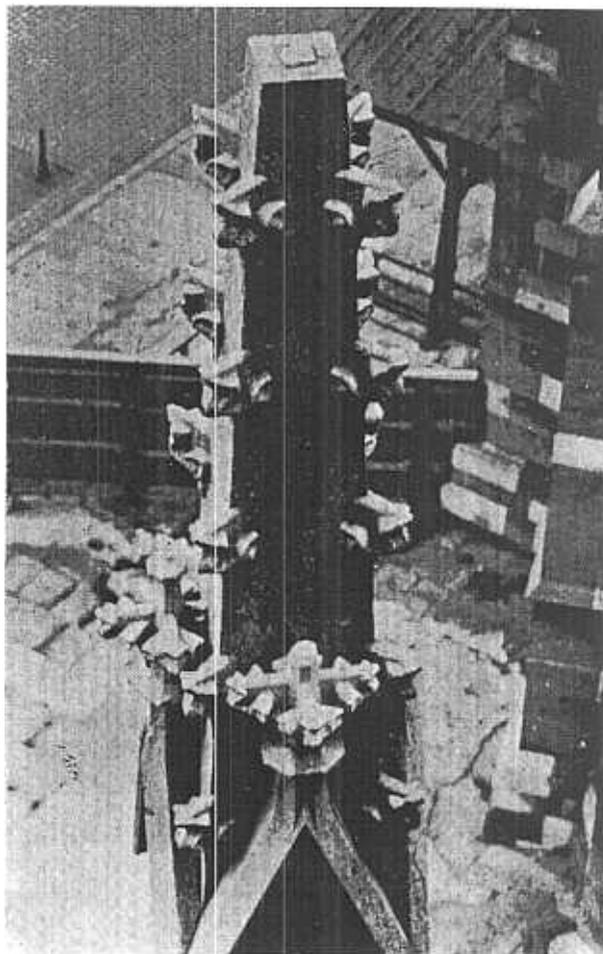


Fig. 43. — Vienne, St-Etienne. Fleuron pincé par la rouille de son ancrage.

Fig. 44. — Vienne, Votivkirche. Tenon de pierre arraché par manque de résistance à la traction.



9. DEGATS INDIRECTS OU TECHNIQUES

Finalement, il faut citer les dégâts dont la pierre a été faussement rendue responsable. En vérité, nombre d'influences ne sont pas naturelles mais d'ordre technique : mauvaise construction, etc. Le cas le plus fréquent est celui de l'oxydation de la rouille du fer (fig. 42 à 44) : il devrait être rigoureusement défendu d'employer le fer, soit entre les pierres, soit à l'intérieur de la pierre. Il existe aujourd'hui assez de métaux non oxydants pour les ancrages, les agrafes, etc.

Quelquefois on a erronément utilisé l'un ou l'autre matériau. Ainsi, on a pris des tenons de pierre au lieu de tenons métalliques; comme la pierre n'a pas une grande résistance à la traction, les tenons ont été déchirés en peu de temps, les fleurons et croix se sont écroulés. On pourrait évidemment citer d'autres fautes de construction, dont l'énumération mènerait trop loin.

Ce tour d'horizon sur les facteurs principaux de l'altération des pierres à bâtir est trop court au vu de l'abondance des possibilités. Mais peut-être a-t-il réussi à donner un résumé d'ensemble. Il convient de fixer une

symptomatologie des maladies de la pierre aussi sommaire que possible. Il faut se garder des généralisations, renouveler sans cesse les observations, multiplier les expériences chimiques, microscopiques, photographiques, etc., même dans un cas qui semble banal au premier coup d'œil. C'est ainsi seulement que l'on arrivera à détecter la cause des phénomènes, à préciser un diagnostic fondé et autorisé. Car le diagnostic révèle, sinon les moyens, tout au moins le principe de la thérapeutique à mettre en œuvre. Sans doute ne peut-on exiger tout cela du praticien ou de l'architecte auquel il est impossible de connaître toutes les méthodes microscopiques, d'effectuer les analyses chimiques, etc. Mais il faudrait s'adresser à des spécialistes, aux pétrographes. Les problèmes sont trop hétérogènes pour qu'une seule personne puisse s'en acquitter.

Aussi bien une coopération s'impose-t-elle non seulement entre les nations mais encore entre les sciences. Coopération qui d'ailleurs a déjà donné d'excellents résultats et qui peut faire augurer favorablement de l'avenir.

A. KIESLINGER
(Vienne).

SUMMARY

THE MOST IMPORTANT FACTORS IN WEATHERING OF NATURAL BUILDING STONES

A short review of the very different causes for the decay of building stone according to the manual « Zerstörungen an Steinbauten ihre Ursachen und ihre Abwehr » published in 1932, with additional notes about the augmentation of our knowledge in this matter just to the present. We can divide the problems in two parts. The first of them concerns the petrographic qualities of the stone, causing its resistance against all influences of various kind. The petrographic examination help us to understand the different qualities of stone. Still the exposure tests of small samples in fresh air have not realized all the expectations we had of them. The reactions of single samples are not the same as the behaviour of stones in the building itself.

Among the various agencies dangerous for the stone, humidity of different origin is the most important. Stones of some solubility, especially limestones and marbles, suffer from chemical corrosion damaging the polish of marble. But more important is the rhythmic change in humidity producing skin formation which is the most general and most important disease of stones. Another type of humidity is the moisture rising from the soil, to be found on all ancient buildings without sufficient isolation. The effect of this rising moisture is increased by the salts coming from the soil and

crystallizing in the walls. The efficiency of moisture is immensely strengthened by the sulfuric acid contained in the smoke.

The influence of organisms, especially the bacteria, has been pretended many times, but their real influence is not at all proved. Remedies against rising humidity, the effect of freezing of wet stones are better known than the damages by fire. The common opinion about calcinating of limestones during the fire is not confirmed by the experience made during the war. The common effect is cracking and splitting of the outward parts dilatated by the heat. Another strange phenomenon is the effect of residual stress. The damage made by plants is especially the pressure of growing roots, whilst the influence of microorganisms (bacteria) is yet doubtful.

Finally there is a number of damages which has been ascribed to the stone, but which really are caused by external influences thrust upon the stone, say the oxydation of iron cramps and dowels, the use of dowels of stone or other technical mistakes.

All these influences are collaborating together and only a careful and capacious examination with modern petrographical, chemical and other helps can give a correct diagnosis as first elements of efficacious therapeutics.

Fig. 1. — Detail of the crypt of Gurk in Carinthia (ca 1160).

Fig. 2. — Detail of the tower of the church of Maria Stiegen in Vienna.

Fig. 3. — Exhibition of samples or exposure tests in a specialized institute.

Fig. 4. — Tank of a limestone fountain where frost burst pieces of the stone that had been soaked for several years.

Fig. 5. — Polished and unpolished marble volutes.

Fig. 6. — Facade of a Baroque church in Vienna.

Fig. 7. — Vienna, St. Anthony. Formation of plates on a granite staircase.

Fig. 8. — Moisture raised by the presence of a joined staircase.

Fig. 9. — Moisture that has climbed to the floor by the application of a waterproof coating at the ground floor.

Fig. 10. — Gurk. Trench around an old church for lowering the moisture level.

Fig. 11. — Schema of the formation of crusts.

Fig. 12. — Vienna, Evangelical cemetery. Funeral cross of calcereous sandstone with high lumps.

Fig. 13. — Vienna, St. Stephen's. Staphyloform incrustation under a gothic ornament.

Fig. 14. — Formation of crusts in thin lamina.

Fig. 15. — London, Temple Gardens. Incrustations limited to ornaments protected from the rain.

Fig. 16. — Vienna, Votivkirche. Development of crusts on a neo-gothic church in limestone from the Viennese basin.

Fig. 17. — Compass-card of rainy winds for the city of Vienna.

Fig. 18. — Vienna, Votivkirche. Intact dampened side and dry side largely destroyed.

Fig. 19. — Vienna, University. Detail of a balustrade; the small elements attained by the rain are intact, the others completely spoiled (new balustrade at the right).

Fig. 20. — London, Edmonton Arch, Navigation. Outside crusts located exclusively in areas sheltered from the rain.

Fig. 21. — Vienna, Galery of the Opera. Protection of the soft sandstone with a cement mortar has smothered the stone.

Fig. 22. — A block of limestone split by the frost on the stone-yard itself.

Fig. 23. — Vienna, Burggarten. Karst limestone broken by the frost.

Fig. 24. — Curve of resistance to fire. German standard Din DVM 4102.

Fig. 25. — Vienna, South Station. Bursting of blocks of Karst limestone.

Fig. 26. — Vienna, St. Stephen's. Successive bursting of plates dilated by the heat.

Fig. 27. — London, Monument of Trafalgar. Granite broken during a bonfire.

Fig. 28. — London, St. Mary le Bow. Bursting of blocks of stone.

Fig. 29. — Athens, Odeon of Herod Atticus. Groins of the tiers rounded by bursting under expansion.

Fig. 30. — Example of a quartz pebble burst by fire.

Fig. 31. — Roots of a birch tree causing large blocks to burst.

Fig. 32. — Vienna, St. Stephen's. Birch tree dislocating joints.

Fig. 33. — Vienna, St. Stephen's. Young birch trees crowing on the towers.

Fig. 34. — Vienna, St. Stephen's. Decor hidden by the guano of pigeons.

Fig. 35. — Vienna, Votivkirche. Guano on a sculpted tympan.

Fig. 36. — Vienna, St. Peter's. Strip of copper from a baroque cupola perforated by guano.

Fig. 37. — Vienna, Arsenal. Corrosion by the wind.

Fig. 38. — Funeral chapel. Progressive expansion of a karstic limestone.

Fig. 39. — Vienna, Wattmangasse. Fluxions of the marble coating of a facade.

Fig. 40. — Vienna, Karlplatz. Coating of the pavilion of a railroad.

Fig. 41. — Vienna, Hietsinger Friedhof. Cover of a vault curved several centimetres by relaxation of internal tensions.

Fig. 42. — Vienna, Franz-Joseph quai. Limestone cornerstone cracked by rusting.

Fig. 43. — Vienna, St. Stephen's. Rosette affected by the rusting of its anchoring.

Fig. 44. — Vienna, Votivkirche. Stone tenon torn up by lack of resistance to traction.