

JEAN-PIERRE PAQUET
CONTRIBUTION A L'ÉTUDE DE LA MALADIE DE LA PIERRE
NOUVELLE HYPOTHÈSE SUR LES CAUSES DES EFFETS
DITS EXFOLIANTS

Il importe tout d'abord de rappeler que sous le nom de « maladie » on désigne indifféremment plusieurs processus de détérioration de la pierre.

On semble ne pas avoir jusqu'à maintenant défini clairement chacun d'eux, ce qui peut prêter déjà à des confusions et des erreurs. Nous ignorons en fait le nombre de ces maladies, d'autant plus que certaines sont propres au calcaire, d'autres au grès et d'autres au granit.

Pour ma part, j'en distingue au premier abord deux pour les calcaires, égales par leurs conséquences, mais différentes par leur développement.

La première appelée couramment « exfoliante » se caractérise comme suit:

— le calcin se détache en feuilles, soit par les bords de la pierre, soit en boursoufflures,

— le désordre résulte d'un gonflement des parties intérieures

— le calcin ne tombe pas immédiatement pour autant

— lorsqu'on le perce ou lorsqu'il se détache, les parties sous-jacentes sont gonflées ou pulvérulentes.

La seconde maladie que je proposerais d'appeler « pseudo-éolienne » donne lieu aux désordres suivants:

— le calcin disparaît en premier; apparaît alors une surface érodée sur une très faible épaisseur

— le produit de cette érosion tombe en fine poudre, comme sous l'effet d'un jet de sable — d'où le nom proposé — mais en réalité par la simple pesanteur des éléments désagrégés ou bien sous l'action du vent

— il demeure toujours une couche de poudre très mince sur la partie affectée.

Le seul trait commun apparent de ces deux maladies est un arrêt possible de l'évolution avec reformation d'un calcin.

Des études importantes ont été faites sur la « maladie exfoliante » par MM. Bourcart, Noetzelin, le Docteur Pochon et Melle S. Berthelie, au cours des années 1946 à 1949. Leurs conclusions ont été publiées dans un rapport édité par l'Institut Technique du Bâtiment et des Travaux Publics en Décembre 1959.

Il y était exposé que la désagrégation est causée par un apport important de sulfate de chaux ou gypse dans les parties voisines des parements, c'est-à-dire de leur surface vue¹. Une part importante était donnée à l'action microbienne. En 1951, une tentative de reconstitution du processus était faite en laboratoire, mais les essais durent être abandonnés faute de finances. En 1953 ou 1954, une

commission fut instituée au C.N.R.S. pour reprendre ces études. Les analyses auxquelles elle fit procéder confirmaient que le gypse¹ était bien en cause.

En 1962, le Centre de Recherches des Monuments Historiques suscitait un compte-rendu des essais, inachevés en 1951, de reconstitution de la maladie. Ce document établi par M. Romanovsky est d'un grand intérêt, bien que ses conclusions auxquelles je me référerai par ailleurs n'aient pu être que partielles en raison de l'arrêt des expériences.

A la même date, la loi-programme devant mettre en oeuvre aux Invalides d'importantes restaurations de pierre, je demandais que des analyses puissent être faites pour déterminer l'importance et la conséquence du degré de sulfatation que l'on pouvait mesurer sur des pierres malades ou bien apparemment saines: les travaux de laboratoire confiés au Centre de Recherches et d'Études Océanographiques, dirigé par M. Romanovsky, devaient nous amener l'un et l'autre à de nouvelles recherches, puis à l'hypothèse que je proposerai plus loin.

Aux échantillons prélevés dans l'édifice furent joints quelques autres provenant du Val de Grâce également en cours de restauration.

Les analyses devaient confirmer les observations contenues dans les rapports de M. Moetzelin de 1959 et de M. Romanovsky de 1962. Elles donnaient une vue assez juste de la situation.

Voici les conclusions auxquelles elles nous ont amenés.

Le sulfate de chaux contenu dans le calcin varie de 1% à 50%. Cette différence semble correspondre aux conditions d'exposition du parement aux eaux de pluie, les faibles teneurs étant constatées dans les parties lavées et notamment le dessus des corniches, les fortes teneurs dans les parties très abritées. Le phénomène semble s'expliquer par la solubilité du sulfate de chaux.

Il n'y a pas de corrélation entre l'état plus ou moins sain de la pierre et la proportion de sulfate dans le calcin.

Une mention particulière doit être faite au sujet d'une croûte atteignant 15 mm d'épaisseur prélevée sous toutes les corniches du Dôme des Invalides, à l'extérieur du parement plafonnant la pierre: son analyse a montré qu'elle était formée de gypse presque pur.

Il s'agissait en fait de stalactites dues à l'évaporation de gouttes d'eau chargées de sulfate: celui-ci se forme-t-il au cours du passage des anhydrides à travers l'entablement ou plus vraisemblablement pendant le lent ruissellement de l'eau sur la pierre? Il y aurait intérêt à éclaircir le processus en raison de son exceptionnel rendement en formation de gypse.

Dans la couche située sous le calcin entre 2 et 7 mm de la surface, la présence du sulfate de chaux s'est révélée dans des proportions variant aussi de 0 à 50%² mais une corrélation entre la teneur en sulfate et l'état de la pierre montrait que:

a) jusqu'aux environs de 5%, aucun désordre n'apparaît encore; entre 5% et 8%; des désordres sont plus ou moins décelables et, de toute façon, la pierre doit être considérée comme atteinte;

b) au-delà de 8% apparaissent les désordres d'exfoliation et de décomposition que l'on connaît;

¹ C'est aussi l'avis exposé par M. MAMILLAN au cours de la conférence qu'il a faite en 1963 à l'Institut Technique du Bâtiment et des Travaux Publics sur le sujet.

¹ Les termes de gypse, sulfate de chaux, SO_4Ca , désignent ici le sel résultant de la combinaison des anhydrides avec l'eau et le carbonate de chaux.

² Pourcentage du « sulfate » par rapport à la somme « sulfate + carbonate ».

c) les taux de 50% correspondent à des matériaux complètement poudreux;

d) la teneur en sulfate décroît presque toujours de l'extérieur vers l'intérieur dans cette épaisseur de 7 mm sous calcin. Après 7 mm, elle devient rapidement très minime;

e) à 25 mm, il n'y a presque toujours plus de sulfate, ou de simples traces.

Sur 4 échantillons, les dosages de ClNa NO^3 et Fe ont été pratiqués: ils ne révèlent qu'un appauvrissement en sels dans le calcin, vraisemblablement par dissolution, et des variations de teneur insignifiantes selon la profondeur des prélèvements effectués de 0 à 20 mm du parement.

Il n'a pas été fait de dosage de silice dont les déplacements sont connus, mais encore inexplicables¹.

Ces observations n'ont rien apporté de nouveau quant aux principes déjà connus — sauf peut-être pour ce qui est la formation signalée de stalactites de sulfate de chaux — mais elles ont permis un diagnostic précis sur l'état de la pierre. Celui-ci était plutôt rassurant aux Invalides et quelque peu inquiétant au Val de Grâce.

Cependant quelle que soit l'idée précise que l'on puisse se faire de la profondeur du mal, son traitement est encore exclusivement « chirurgical »: c'est d'après les comparaisons que l'on peut établir avec les échantillons véritablement atteints que l'on décide du changement ou de la conservation des pierres douteuses.

Si nous constatons le phénomène et si nous en délimitons les effets, il reste à l'expliquer, et, ne connaissant pas son mécanisme, nous sommes encore incapables de le soigner, de l'arrêter et de le prévenir.

Jusqu'à présent, la question fort simple de savoir pourquoi le gypse se concentre sous le calcin nous semble bien être demeurée sans réponse.

Des hypothèses chimiques et bactériologiques ont été avancées dans le rapport de 1949, mais l'observation de la réalité ne suffit pas à les confirmer et les expériences tentées en 1951 pour cela n'ont pu être poursuivies.

Aussi de nouvelles investigations sur le milieu dans lequel se produisaient ces traumatismes paraissent-elles nécessaires. Elles furent confiées par le Centre de Recherches des Monuments Historiques à M. Romanovsky.

Le tambour du Dôme des Invalides, fort dégagé et présentant des faces identiques dans les quatre orientations, se prêtait particulièrement bien à des études de ce genre qui, malheureusement, se sont trouvées encore interrompues, cette fois par le lavage de l'édifice.

D'Octobre 1962 à Juillet 1963, il a été procédé à une série d'enregistrements et de prélèvements dont nous conservons les résultats. Leur exploitation n'a pu être encore complètement menée à bien, mais il est possible d'en dégager des données fort intéressantes:

a) Des écarts journaliers de température de 20° à 25° en demi-saison et devant dépasser en été 30° et 40° affectent la pierre à des profondeurs de 20 mm sur la face Ouest. Malheureusement, les observations de la face Sud n'ont pu être exploitables.

Sur les deux autres faces, les écarts restent inférieurs à 10° en demi-saison, mais sont du même ordre pour chacune.

b) Ces écarts peuvent varier dans la proportion de 30 à 40% selon que la surface est claire ou noire.

c) Des cavités d'environ 20 mm de diamètre et de 150 mm de profondeur ont été pratiquées au Nord, au Sud et à l'Ouest, puis bouchées hermétiquement. Il a été constaté que l'air qu'elles contenaient avait constamment des teneurs en humidité de l'ordre de 90 à 95%, bien qu'elles se trouvent situées à plus de 30 mètres de hauteur, sur des parements verticaux, à 1 m 20 au-dessus des couvertures en pierre, elles-mêmes fort en pente. Il semble bien que la masse des maçonneries, même relativement abritées, contienne en permanence des quantités d'eau importantes.

d) Des comparaisons ont pu être faites entre les quantités d'eau de pluie fouettant directement une surface carrée de quelques décimètres carrés et l'eau provenant du ruissellement sur les parties supérieures du Dôme, y compris la couverture, l'édifice ne possédant pas de chéneau.

Le ruissellement augmente de 2 à 10 fois la quantité d'eau qui fouetterait directement la surface dans le même temps.

e) Si les quantités d'eau de pluie tombant verticalement au proche périmètre du Dôme sont plus importantes au vent que sous le vent — les vents d'Ouest étant les plus fréquents — les quantités d'eau ruisselante sont inversement proportionnées soit parce que l'eau est chassée sur le Dôme, soit en raison de la dépression sur la face la moins exposée.

orientation	W	S	E	N
pluie verticale	2,35	1,75	1,5	1
pluie fouettante	2,0	1,01	1,48	1
pluie ruisselante	1,75	1	2,1	1,15

Note: Sur chaque ligne les chiffres indiquent des proportions, mais ne sont pas comparables d'une ligne à l'autre.

f) Les parties du Dôme au Sud et à l'Ouest ne totalisent que $1,75 + 1 = 2,75$ de coefficient contre: $2,1 + 1,15 = 3,25$ pour les parties Est et Nord: or les parements Sud et Ouest sont les plus affectés par les désordres.

Observations analogues dans la Cour d'Honneur dont les façades sont exposées très exactement aux quatre points cardinaux: les sculptures sont du côté Sud très profondément atteintes alors que sur les autres côtés, elles le sont beaucoup moins.

g) De même sur la façade Nord, les pavillons extrêmes à l'Est et à l'Ouest sont gravement atteints alors que sur 140 mètres, le reste de l'édifice est dans un état relativement bon. Ces façades sont évidemment pratiquement privées de soleil, mais aux extrémités elles sont constamment exposées à d'importantes turbulences. Or, dans le rapport de 1962 de M. Romanovsky concernant les essais de 1951, nous relevons que par variation des turbulences, tout en restant dans les limites de la réalité, l'effet évaporatoire peut passer expérimentalement de 70 litres à 4.380 litres par mètre carré et par an.

b) Les effets desséchants du soleil comme des vents sont de toute évidence irréguliers et intermittents.

De ces observations, le fait qu'un rapport semble s'établir entre la présence

Réfer.: Note de N. M. GUILLOT et de MELLE D. HALOT transmise à l'Académie des Sciences par M. RENÉ FABRE.

des désordres et l'effet desséchant du milieu extérieur m'a semblé devoir retenir tout particulièrement l'attention et m'a suggéré l'hypothèse suivante sur le processus de la décomposition.

Rappelons que l'eau atmosphérique chargée d'anhydrides, ou bien atteint directement nos édifices, ruisselle à leur surface, ou bien, après avoir séjourné dans le sol, remonte par capillarité dans leurs maçonneries. Ces anhydrides forment du sulfate de chaux en solution, soit au contact du carbonate, soit à leur passage dans le sol; puis, l'eau chargée circulant dans les maçonneries par capillarité, vient au contact des parements.

Supposons que la pierre soit dans un état de saturation constante; l'eau s'évaporera par son parement laissant les sels en surface, vraisemblablement sous la forme de cristallisation, phénomène qui ne serait pas étranger à la formation du calcin, la différence de solubilité entre le sulfate et le carbonate pouvant expliquer la proportion que l'on constate entre ces deux sels aux analyses. Ce peut être aussi la cause des stalactites dont il a été fait mention. Mais si l'évaporation se limite à la surface, il ne se produira rien dans la pierre qui joue seulement le rôle de canal alimentant le film liquide extérieur. Mais si un phénomène physique de chaleur ou de ventilation vient à dessécher en profondeur les couches sous-jacentes, nous aurons des dépôts de sels et en particulier, de sulfate à l'intérieur des pores de la pierre, par évaporation complète de l'eau.

Si l'effet de sécheresse demeure, les choses n'iront pas plus loin, mais le phénomène desséchant venant à cesser, l'eau intérieure humidifiera à nouveau les pores, apportant une nouvelle quantité de sulfate, sans pour autant déplacer celui qui s'était précédemment cristallisé.

Ainsi à chaque cycle « humidification-dessiccation », nous aurons une augmentation interne de sels et en particulier de sulfate dans l'épaisseur désydratée.

Or on sait que ce même phénomène produit un changement de volume du sulfate qui se rétrécit à chaque dessiccation et se gonfle à l'humidification, travail mécanique qui, lorsque la cristallisation a pris une certaine importance, peut-être la cause des désagréments internes constatés dans la maladie exfoliante.

Le processus peut d'ailleurs être extrêmement varié entre l'humidification abondante conjuguée avec des chocs desséchants violents ou une humidification faible et une évaporation lente: l'effet sera plus ou moins rapide, mais semblable.

Un troisième facteur interviendra: celui de la contexture du matériau, de l'importance de ses pores, de la fragilité ou de la résistance de l'assemblage de ses cellules.

Ces données fort diverses expliqueraient le hasard apparent selon lequel semble se développer cette « maladie »: telle pierre pouvant être atteinte au voisinage d'une autre parfaitement saine. Ne s'agit-il pas d'un appareil évaporatoire, simple dans son fonctionnement, mais délicat dans son équilibre, qui s'établit ici ou là selon la source d'humidité, le soleil et le vent ou bien la porosité de la pierre? Notons à ce propos la vulnérabilité des arêtes à ces désordres: elle concorde avec l'importance relative de la surface évaporatoire à cet endroit et leur fragilité. Ajoutons enfin que les premières désorganisations de la matière augmentent sa porosité et accélèrent encore le processus dès son apparition.

Un essai de transfert expérimental du sulfate au voisinage du parement d'une pierre était tentant: aussi ai-je voulu le réaliser, malgré les très petits moyens dont je pouvais disposer.

Un cube de pierre de 10 cm. d'arête revêtu d'un enduit imperméable sur toute sa surface sauf le long d'une arête et sur un emplacement de 2 cm² vers le centre de la face considérée comme parement.

Les faces latérales supposées de joint ont été garnies d'un isolant de néoprène pour les soustraire aux effets de rayonnement dont il sera question.

Sur la face supérieure a été pratiquée une cavité cylindrique de quelques centimètres de profondeur et 25 mm de diamètre. Dans cette cavité a été versée tout d'abord une solution de 2,5 gr. d'acide sulfurique à 60% par litre jusqu'à complète humidification de la pierre. Cette humidification était vérifiée par un petit cylindre de buvard imprégné de chlorure de mercure virant du rose au bleu par l'effet de l'humidité. Ce petit cylindre était enfoncé sur 4 centimètres dans une cavité de 6 mm de diamètre dont il prenait la forme. Il était protégé au nu du parement par un bouchon.

La pierre était posée en permanence sur une balance, pour compenser sans excès les pertes par évaporation sans alimenter les pores de la pierre durant la dessiccation qu'ils allaient subir.

La surface de la pierre considérée comme le parement a été exposée à une suite d'insolations artificielles produites par une lampe à miroir de 150 W placée à environ 14 cm. Il a été que la température intérieure de la pierre se stabilisait aux environs de 50°, valeur qui doit être atteinte dans la réalité par les jours de grande insolation.

Les premières expériences ont consisté à déterminer la durée d'insolation nécessaire pour dessécher la pierre sur une profondeur l'environ 3 à 4 mm, ce que le cylindre de buvard permettait de vérifier par son virage au rose sur la dite profondeur.

Le temps nécessaire pour obtenir ce résultat était d'environ 3 heures; de même, il fallait 3 ou 4 heures pour que l'insolation cessant, la surface sous-jacente s'humidifie à nouveau complètement, comme le témoin de chlorure de mercure permettait de le vérifier.

Il a été pratiqué en moyenne deux insolations par jour en compensant entre chaque la perte par évaporation qui était de l'ordre de 30 gr. L'expérience s'est poursuivie régulièrement pendant 17 mois. Après avoir fait évaporer 2 litres d'eau acidulée, il n'a plus été employé que des solutions saturées de SO⁴Ca, au moyen de plâtre et bien entendu filtrées.

Au 14ème mois est apparue une excroissance le long de l'arête qui n'a cessé d'augmenter.

Au 16ème mois, nous avons constaté l'amorce de ruptures le long de l'arête qui ont peu à peu pris la forme de véritables crevasses provoquant le soulèvement de particules de pierre tout le long de l'arête.

Par contre, aucun désordre n'apparaissait encore à l'emplacement de la surface isolée au centre du parement laissée sans enduit: probablement la pierre étant moins fragile que le long de l'arête, le phénomène n'avait-il pas produit les mêmes effets.

L'analyse des parties désorganisées de l'excroissance et du centre de la pierre a donné les résultats suivants:

	CO ³ Ca	SO ⁴ Ca	%
excroissance	12,38	31,79	71,00
voisinage du parement exposé aux évaporations	66,52	9,73	12,50

L'excroissance contenant 71% de sulfate semble due à l'évaporation externe de la solution, phénomène analogue à la formation des stalactites.

Il est évidemment assez remarquable de constater que le pourcentage de sulfate au voisinage du parement est celui dont nous avons constaté les effets néfastes dans la réalité et l'absence de sulfate au centre prouve qu'il y a eu migration: l'inclusion de la première solution a pu former une notable quantité de sulfate au centre de la pierre et c'est la raison pour laquelle je l'ai remplacée par la solution saline au premiers tiers de l'expérience. Or, le drainage a été en définitive complet vers l'extérieur, le sulfate subsistant à l'intérieur n'étant que la faible quantité contenue dans la solution humidifiante et donc pratiquement indosable¹.

Ainsi le transfert et la fixation du sulfate sous le parement avait-il été réalisé par synthèse à travers la pierre sans y laisser de trace dosable, phénomène qui, jusqu'à maintenant, nous intriguait fort.

Nous pourrions donc résumer en quatre principes le mécanisme de la sulfatation sous le parement:

- a) en l'absence d'eau il ne se produit aucun traumatisme exfoliant,
- b) lorsque les pores de la pierre sont maintenues intégralement pleins d'eau, il n'en résulte que des cristallisations de surface,
- c) lorsque les pores ne sont pas intégralement remplis, des fixations de sels se produisent sous l'effet de l'évaporation,
- d) lorsque le phénomène « évaporation-humidification » devient cyclique, il produit ces migrations de sulfate auxquelles on attribue les désordres.

Aussi conçoit-on l'intérêt de l'étude du milieu physique: variations de température, conditions d'humidité de la pierre aussi bien que de l'air ambiant, régime des vents, analyse des eaux de pluie. Ces phénomènes doivent être fort différents d'un pays à l'autre, notamment en Angleterre où l'hypothèse avancée pourrait être controversée en raison du climat. Il serait souhaitable aussi que des expériences de synthèses reproduisant le phénomène soient tentées dans de nombreuses conditions et notamment, systématiquement, en fonction des caractéristiques de la pierre.

S'il est hasardeux de proposer une thérapeutique générale sur une hypothèse encore insuffisamment vérifiée, il est permis d'envisager des remèdes dont les uns sans conséquence dangereuse peuvent être appliqués dans tous les cas et d'autres, plus aléatoires, pourraient être réservés à titre d'expérience à des édifices exempts d'intérêt archéologique ou monumental.

Nous pouvons en effet agir sur trois données du problème:

- a) l'humidification,
- b) l'évaporation,
- c) la formation de sulfate de chaux.

Nous pouvons diminuer dans de très grandes proportions l'humidification en protégeant nos édifices contre l'entrée des eaux de pluie, auxquelles ils sont toujours très exposés par leurs dispositions.

Il faut, bien entendu, assurer le bon état des toitures, mais aussi compléter par des revêtements étanches tout le système d'écoulement des eaux sur la pierre.

S'il n'y a pas eu de danger grave à laisser pénétrer durant un siècle ou deux une eau extrêmement peu acide et si une sulfatation très lente a pu ainsi se produire, celle-ci s'accélère aujourd'hui dans des proportions quintuplées ou décuplées en raison des anhydrides produites par le charbon et le mazout.

Si, dans nos villes, les couvertures en zinc ne sont plus de longue durée, il faut penser que pour nos monuments il s'agit d'un accroissement permanent de la proportion de gypse au voisinage de leurs parements. Or cet accroissement doit être très directement en rapport avec la quantité d'eau circulant dans la pierre: que l'on diminue la source et l'effet en subira les conséquences; ce qui arriverait en un siècle peut être reculé d'un millénaire.

Ainsi la protection de toutes les surfaces où l'eau peut stagner ou ne s'écouler que lentement est-elle indispensable: chaque fois que nous en avons fait l'expérience, les désordres se sont arrêtés d'eux-mêmes¹.

Jusqu'à maintenant, le plomb pour les parties délicates, le ciment armé pour les chéneaux ou les terrasses ont permis de canaliser les ruissellements et empêchent l'évaporation de mètres cubes d'eau au travers d'édifices favorisés: mais ils sont presque l'exception.

A ces moyens viennent s'ajouter aujourd'hui les revêtements plastiques étanches étendus à l'état liquide que l'on peut exposer telles que les dessus de corniches, de balustrades, certaines parties de sculptures, etc... Cet enduit ne peut être exécuté sur des parement vus, car il modifie l'aspect de la pierre, mais fort heureusement ces surfaces difficiles à traiter sont verticales ou fortement inclinées, ce qui les soustrait aux pénétrations directes.

De toute façon, il ne peut-être que bénéfique pour l'édifice de le protéger contre la pénétration de l'eau de pluie. Mais il en est de même pour l'eau pouvant monter des fondations: on connaît l'heureux effet des assenissements que l'on peut pratiquer par des moyens appropriés.

Sur l'évaporation, notre action est plus difficile.

Les deux facteurs d'évaporation sont l'échauffement solaire et une abondante ventilation créant une évaporation rapide qui ne peut compenser la source d'humidité.

Sur le vent, toute action semble difficile.

En revanche, nous avons constaté que la pierre s'échauffe d'autant moins que le parement était plus clair. Le nettoyage des édifices est donc avantageux pour leur conservation.

On pourrait tenter d'arrêter l'évaporation par imperméabilisation: nous pourrions nous demander si ce n'est pas par cet effet que beaucoup de procédés employés entre 1920 et 1940 ont donné des résultats passagers. Ils reconstituèrent une sorte de croûte continue qui pouvait fort bien ralentir l'évaporation de l'eau, mais pendant un temps seulement, car à la première faille dans la surface le phénomène s'est très souvent reproduit. Il vaudrait cependant la peine de faire une enquête sur les résultats obtenus, en même temps que de tenter quelques expériences nouvelles sur des constructions déjà atteints et à nos yeux sans valeur².

¹ L'eau contenue dans les pores devait être au maximum de 200 gr., pour 1.000 cm³ de pierre, soit 0,2 gr. de solution au cm³ pouvant laisser 5,30 × 10⁻⁴ gr. de sulfate par cm³ de pierre.

¹ Partie de corniche du Dôme des Invalides; Façade Ouest de l'église Notre-Dame du Havre.
² La peinture semblerait conserver la pierre. En effet, nous avons jusqu'à maintenant toujours trouvé des pierres parfaitement saines sous les décapages. La peinture supprimant pratiquement l'évaporation, la sulfatation ne peut se produire.

Enfin, il peut paraître vain de s'attaquer à la sulfatation elle-même.

Il semble cependant que les lavages à l'eau de source ne pouvant que dissoudre ce gypse dangereux, soient avantageux.

Mais pourquoi ne pas envisager de neutraliser les agents dangereux avant qu'ils n'aient fait leur effet en procédant à des pulvérisations périodiques de produits alcalins?

Jusqu'à l'emploi des dissolvants modernes, tels que l'acétone, ce fut la potasse à très forts dosages qui fut utilisée par le Service des Monuments Historiques pour décaper la peinture sur la pierre: il semble bien que jamais aucun inconvénient n'ait été relevé du fait de ce procédé.

Ne pourrait-on vérifier encore l'immunité de la pierre à cet égard, puis tenter de neutraliser d'avance l'action des anhydrides au moment de la pénétration de l'eau, avant qu'elles n'aient produit des sulfates?

La présence d'agents alcalins pourrait être d'une efficacité relativement durable étant donné la faible teneur acide des eaux et à condition de les employer judicieusement.

Mais il ne s'agit là que de suggestions et nous serions bien surpris que la chimie moderne n'y donne pas de réponse.

En conclusion, lorsqu'il s'agit de la « maladie » exfoliante et non de la pseudo-éolienne, nous croyons que l'on peut considérer:

a) que la sulfatation de la pierre immédiatement sous le parement est à l'origine des désordres;

b) qu'à partir d'un certain degré (5" à 7") selon la nature de la pierre, cette sulfatation va produire les traumatismes;

c) qu'au-delà de cette proportion, les traumatismes existent et continuent à se développer;

d) que l'on peut avancer avec beaucoup de vraisemblance l'hypothèse que l'accumulation de ces sulfates résulte d'évaporations intermittentes, dues à l'action du soleil et du vent liée à un certain régime d'humidité par eau sulfatée;

e) que cette hypothèse concorde avec:

— la situation des parties malades

— l'effet de la suppression de l'humidité

— l'action sur l'évaporation (peinture, imperméabilisation)

— le résultat d'une expérience de synthèse (malheureusement unique et qu'il y aurait intérêt à reproduire sur de nombreux échantillons).

f) que dans le cas où cette hypothèse serait vérifiée par de nouvelles expériences de synthèse, une orientation précise pourrait être donnée aux recherches de la thérapeutique.

Quant à la « maladie » pseudo-éolienne, elle ne nous paraît pas encore avoir été étudiée systématiquement, tout au moins en France: or elle prend depuis quelques années, une extension particulièrement inquiétante par son importance et plus encore, peut-être, par le fait qu'elle se produit aussi bien en milieu humide que notoirement sec.

JEAN-PIERRE PAQUET

CONTRIBUTION TO THE STUDY OF STONE DISEASES.

A NEW HYPOTHESIS ON THE CAUSES

OF THE EFFECTS KNOWN AS « EXFOLIANTS »

SUMMARY.

Hypothesis: Atmospheric water charged with anhydrides either directly affects our edifices, dripping down their surfaces, or, after resting in the soil, climbs up again into their masonry by capillary action. These anhydrides form a lime sulphate in solution by simple contact with the carbonate or by their passage through the soil; then the charged water comes into contact with the facing of the stone after circulating in the masonry by capillary action.

Let us suppose that the stone is in a constant state of saturation: the water will evaporate on its surface leaving salts there, probably by crystallisation a phenomenon which would not be without its effects on calcination: the difference in solubility between the sulphate and the carbonate would explain the proportion which one discovers between the two salts in analysis. If a physical phenomenon, either heat or ventilation, is present to dry out the underlying layers to some depth, we will find deposits of salts, and in particular of the sulphate, right inside the stone's pores formed by the complete evaporation of the water.

If the drying agent remains, the matter will go no further, but once such agents cease, the water from inside will once more dampen the pores, bringing a fresh load of sulphate without displacing that which had previously crystallised there.

Thus after each process of dampening and drying out, we will find an increase in salts, and especially in the sulphate, inside the dehydrated part of the stone.

Now we know that this phenomenon produces a change in the volume of the sulphate, which diminishes at each drying out and increases with dampening; a mechanical process which, since the action of crystallisation has taken on a certain importance, is perhaps the cause of the internal deterioration noted in this "maladie exfoliante".

An experiment to show the movement of the sulphate in the surface area has been successfully carried out by the intermittent drying out of the surface of a stone dampened with a solution of the sulphate; this concentrated itself near the surface and broke it up.

If it is hazardous to propose a general cure based on an hypothesis which has yet to be verified more fully, it is permitted to envisage certain remedies, of which the ones without any dangerous consequences may be applied in every case, while the more risky proposals may be reserved for experiment on buildings of no archaeological or monumental interest.

We can in short work on three sides of the problem:

a) The influx of water

b) The evaporation

c) The formation of lime sulphate.