

Restauration des bâtiments en pierre

par **Marc MAMILLAN**

*Ingénieur de l'École du Bâtiment et des Travaux Publics
Conseiller Technique au CEBTP (Centre Expérimental de Recherches
et d'Études du Bâtiment et des Travaux Publics)*

1. Matériaux constitutifs	C 2 150 - 2
1.1 Roches éruptives	— 2
1.2 Roches métamorphiques	— 2
1.3 Roches sédimentaires	— 3
2. Caractères techniques des roches de construction	— 3
2.1 Généralités	— 3
2.2 Caractéristiques physiques et mécaniques	— 3
3. Pathologie des parements en pierre	— 9
3.1 Détériorations provenant des facteurs extérieurs	— 9
3.2 Mécanismes chimiques ou physico-chimiques	— 11
4. Restauration des bâtiments	— 12
4.1 Aspect des parements en pierre	— 12
4.2 Nettoyage	— 13
4.3 Tachabilité et détachage	— 17
4.4 Protection des surfaces	— 18
4.5 Bouchage et collage	— 20
4.6 Réfection des joints	— 21
4.7 Durcisseurs et consolidants	— 22
4.8 Assèchement des remontées capillaires	— 22
5. Réfection des pierres altérées	— 24
5.1 Généralités	— 24
5.2 Exécution de la substitution à l'identique	— 24
5.3 Substitution par de la pierre artificielle	— 24
5.4 Différents mortiers de ragréage	— 24
Pour en savoir plus	Doc. C 2 150

Les maçonneries de pierre de taille ont une excellente longévité lorsqu'elles sont exécutées selon les conceptions et les techniques traditionnelles. Cependant l'évolution des méthodes et différents facteurs sont à l'origine de l'apparition de plusieurs pathologies. L'analyse d'une importante bibliographie complétée par plus de quarante années de recherches, d'études et d'expertises dans ce domaine très spécialisé, ont permis de rassembler et d'ordonner une somme de connaissances que nous présentons dans cet article.

Comme remarque préliminaire, il convient de souligner qu'en ce qui concerne l'altération des maçonneries en pierre constituant les monuments historiques et les bâtiments anciens, les conservateurs sont particulièrement exigeants. Souhaiter que des constructions, sans aucun entretien, résistent à l'épreuve du temps, des intempéries, de la pollution, pendant plusieurs décennies, voire un siècle, est une performance qui, dans l'état actuel des connaissances des composants utilisés en construction, n'est pas réaliste. Aucun matériau existant actuellement dans le bâtiment (béton, mortier, briques, bois, métal, plastique,

etc.) ne peut garantir la preuve d'une meilleure conservation ; bien au contraire, la comparaison, basée sur les références des bâtiments existants, est en faveur de la maçonnerie en pierre bien conçue et bien réalisée.

Cependant, pour l'entretien et la restauration, il ne faut pas exclure de faire appel aux connaissances actuelles sur les techniques et les produits modernes de traitement. Devant la prolifération des produits de synthèses nouveaux inondant le marché, le choix devient de plus en plus délicat. Beaucoup hésitent, ignorant le développement de moyens précis de mesure des propriétés que ces traitements sont capables de conférer aux pierres, ce qui permet de décider en connaissance de cause. Ainsi, le restaurateur dispose de critères scientifiques de choix, autre que les louanges publicitaires ou les coûts les plus bas. Des laboratoires spécialisés disposent d'appareils susceptibles d'évaluer toutes les améliorations apportées.

Il ne faut pas en conclure que ces traitements nouveaux constituent une panacée universelle. Souvent ils améliorent provisoirement certaines propriétés, mais rarement ils transforment une pierre de qualité médiocre en une roche de qualité exceptionnelle ; en particulier, les erreurs de choix ou de mise en œuvre sont difficilement rattrapables par l'application d'un produit de traitement, mais la durabilité peut être provisoirement accrue.

1. Matériaux constitutifs

Les murs massifs des bâtiments anciens sont constitués de blocs de pierre ou de briques hourdés avec du mortier composé principalement d'un liant (chaux grasse ou ciment) et de granulats naturels. Mais souvent les mortiers anciens comportent de l'argile.

Les blocs de pierre et les moellons proviennent de minéraux qui recouvrent l'écorce terrestre appelés roches. Leur composition est très variée suivant l'époque et les phénomènes qui ont conduit à leur formation. Les roches naturelles se classent en trois catégories :

- les **roches éruptives ou magmatiques** provenant du refroidissement et de la consolidation du magma (roche en fusion), comme par exemple le granit, le basalte, la diorite, le porphyre, etc. ;
- les **roches métamorphiques** résultant de la recristallisation de masses de roches solides ou fluides préexistantes sous les actions de la chaleur ou de la pression, comme par exemple les marbres, les quartzites, les schistes, les gneiss et les phyllades ;
- les **roches sédimentaires** formées par les dépôts, généralement dans l'eau, de particules d'origine organique ou inorganique (désagrégation de roches éruptives), par exemple les calcaires, les grès, les silex, les pierres sulfatées, le travertin, etc.

1.1 Roches éruptives

Les **granits** constituent la roche éruptive la plus répandue en France. Ses composants principaux sont : le quartz, le feldspath et le mica. De nombreuses variétés existent ; elles se caractérisent par l'absence ou le remplacement d'un de ces trois éléments. Les proportions moyennes sont les suivantes : quartz : 35 %, feldspath : 40 %, mica : 15 %.

Le granit est une roche éruptive grenue contenant les cristaux potassiques qui ont cristallisé les premiers. Les interstices ont ensuite été emplis par le quartz.

Les **porphyres** ont les mêmes éléments que les granits, mais fondus l'un dans l'autre. La masse comporte des cristaux de quartz mais surtout de feldspath. Les cristaux sont généralement blancs et la base d'une teinte plus ou moins foncée (porphyre noir ou gris).

Les **basaltes** sont des roches volcaniques constituées de feldspath, de pyroxène et de fer. Leur couleur est proche du noir ; ils se caractérisent par une masse volumique absolue très élevée (2,85 à 2,90 g/cm³).

1.2 Roches métamorphiques

Les **ardoises** ou phyllades sont des schistes argileux d'un grain très fin et très dur qui ont été soumis, au cours des plissements géologiques, à des conditions de température ou de pression orientant les éléments microscopiques suivant un plan appelé *plan de fissibilité*. Cette caractéristique permet de les diviser en feuillets très minces, suivant des plans parallèles, et d'obtenir des plaques d'ardoises.

Les **schistes** sont d'anciens dépôts argileux composés par des silicates d'alumine hydratés souvent mélangés de quartz et de mica, associés à de l'oxyde de fer et à des matières carbonneuses.

Les **gneiss** sont composés des mêmes constituants que les granits, mais de structure différente. Les lamelles de mica sont généralement alignées et parallèles. Comme le granit, cette roche est un excellent matériau naturel qui présente une très bonne aptitude au polissage.

Les **marbres** sont des roches calcaires formées de grains cristallins de calcite (carbonate de calcium) et de dolomie (carbonate naturel double de calcium et de magnésium). Dans les marbres, les cristaux sont intimement intégrés dans la masse par suite de transformations métamorphiques prolongées (chaleur et pression). La finesse du grain et cette texture géologique qui est apte à prendre le poli confèrent aux marbres des qualités physiques élevées (dureté) et des qualités esthétiques très appréciées. Ces propriétés se rencontrent aussi avec certaines pierres calcaires de fortes densités, compactes, souvent bien cristallisées, que l'on appelle pierres marbrées. Un classement permet de distinguer plusieurs catégories de marbres :

- les marbres compacts unicolores, limités aux blancs et aux noirs, avec d'autres teintes plus ou moins mélangées sur un fond quelconque ;
- les marbres cristallins saccharoïdes, qui ont une cassure à gros grains très caractéristiques ;

- les marbres veinés, présentant des veines variées sur un ton uniforme, mais avec un dessin irrégulier se prolongeant dans la masse sur toute sa longueur ;
- les marbres bréchés, constitués d'éléments anguleux de coloris divers réunis par un ciment naturel ;
- les brocatelles, aggloméré de fragments de coquilles ;
- les marbres concrétionnés, comportant des veines parallèles de talc verdâtre.

Les **quartzites** sont des roches composées uniquement de grains de quartz recristallisés, si intimement soudés les uns aux autres que leur structure, exempte de tout vide, est monolithique. Cette roche est très dure, extrêmement tenace, à cassure conchoïdale.

1.3 Roches sédimentaires

Parmi les roches sédimentaires, les **calcaires** sont les plus utilisées, surtout en France où les gisements en quantités importantes sont répartis dans presque tout le territoire. Une grande variété de duretés et de textures existe en grande masse, extraite principalement dans trois bassins sédimentaires : région parisienne, Aquitaine et région rhodanienne.

La formation géologique de ces grands dépôts date surtout de l'ère secondaire (trias et jurassique) et de la première partie de l'ère tertiaire.

Les marbres proviennent surtout de dépôts durant l'ère primaire. Les calcaires lacustres, les tufs et les travertins se sont formés durant l'ère quaternaire. Ces roches résultent de la fixation et de la précipitation du carbonate de calcium contenu en faible quantité dans les eaux océaniques et lacustres.

Les **grès** proviennent de grains de sable liés par un ciment naturel siliceux, calcaire, argileux, ferrugineux ou autre. La molasse est un grès grossier souvent très tendre. Le ciment de liaison est composé de 30 % de calcaire.

Les **roches sulfatées** résultent de précipitations chimiques qui se présentent sous forme d'anhydrite ou de gypse (utilisé pour la fabrication du plâtre).

Les **silex** sont composés de quartz amorphe, presque pur, dont la meulière constitue une variété caverneuse ; cette roche, d'une excellente durabilité, a été très utilisée comme pierre à bâtir apparente dans certaines régions.

2. Caractères techniques des roches de construction

2.1 Généralités

2.1.1 Aspect de la structure

Après fragmentation, l'examen de la microstructure des cristaux constitue le moyen visuel de reconnaissance minéralogique. Mais pour une identification plus rigoureuse, les initiés disposent de techniques d'observation plus précises : microscopes polarisants ou électroniques à balayage.

2.1.2 Propriétés physiques

Les propriétés physiques des roches utilisées comme matériaux de construction sont, depuis une quarantaine d'années, bien connues. La mise au point de techniques et de matériel expérimental spécialement conçu pour déterminer les principales caractéristiques garantit qu'une identification précise est réalisable. Les méthodes

d'essais établies avec la collaboration de plusieurs spécialistes internationaux ont fait l'objet de recommandations internationales [1].

Les principaux critères de mesure pour évaluer les propriétés des différents calcaires sont les suivants :

- les **caractéristiques physiques** liées à la **compacité** et à la **cohésion** du matériau : porosité, masse volumique réelle et apparente, résistance mécanique de rupture en compression et en traction ;
- les **propriétés élastiques**, qui informent sur l'aptitude d'un matériau à se déformer sous l'action d'une charge, tout en conservant sa cohésion jusqu'à une certaine limite.

Parmi les techniques récentes les plus perfectionnées dans ce domaine, il est important de signaler les mesures non destructives comme la mesure de la vitesse de propagation du son et la détermination du module d'élasticité dynamique obtenue par mesure de la fréquence fondamentale de résonance. Ces déterminations non destructives sont très précises pour l'identification exacte des matériaux ; elles peuvent être répétées plusieurs fois sans affecter la qualité des matériaux. Par ailleurs, comme il existe une très forte corrélation empirique entre les critères non destructifs et la résistance mécanique, ces essais offrent l'avantage d'informer à 10 % près de la résistance mécanique d'un matériau sans le détruire. La mesure de la vitesse du son permet de mettre en évidence le degré d'hétérogénéité des blocs et la localisation de points faibles. Ainsi, avant façonnage, des blocs constituant des pièces moulurées peuvent être sélectionnés. Par ailleurs, la connaissance de la durabilité des roches, exposées aux intempéries dans des parties d'ouvrage très sollicitées par la pollution, dont l'identification précise de la qualité est réalisée par ces méthodes non destructives, est une garantie pour le choix, basée sur l'expérience du comportement réel.

2.2 Caractéristiques physiques et mécaniques

2.2.1 Identification pour la classification physique des calcaires

À partir de mesures physiques des propriétés des pierres calcaires, une méthode d'identification a été proposée et acceptée comme norme française (NF B 10-301) et comme recommandation internationale. L'application de trois critères d'identification a pour objet d'éviter les litiges qui peuvent survenir lors des transactions entre la commande et la fourniture. La particularité de l'utilisation de trois caractéristiques pour définir scientifiquement une qualité de pierre calcaire est de prendre en considération plusieurs propriétés de natures différentes :

- la vitesse de propagation du son ;
- la masse volumique apparente ;
- la dureté superficielle.

L'expérience pratique a montré que ces trois grandeurs physiques sont étroitement liées aux performances fondamentales exigées suivant les conditions d'utilisation. L'intérêt du choix de cette méthode pour définir ce matériau naturel résulte de l'analyse suivante :

- la vitesse du son est fonction directe des propriétés élastiques et de la résistance mécanique en compression ;
- la masse volumique apparente informe sur le volume total des vides ; on en déduit la porosité, propriété fondamentale liée aux problèmes de circulation et de rétention de l'eau dans les capillaires ;
- la dureté superficielle, mise en évidence par un essai de rayure obtenu sur la surface des blocs, traduit une valeur comparative de la tenue de la roche à l'usure.

Pour une même nature minéralogique de roche (le calcaire), l'ordre de classification obtenu avec chacun de ces critères pris isolément est en général le même. Si l'on considère le classement moyen des trois critères, il a été possible d'obtenir un numéro de classement de l'ensemble des calcaires français qui prend en compte ces trois

propriétés. Il est intéressant de noter que ce classement, établi sur des caractéristiques physiques mesurables, est en corrélation avec celui établi à partir de la notion de difficulté de taille, qui conditionne les prix de règlement des travaux de façonnage des pierres calcaires, définis par la série centrale des architectes. Cela confirme que cette classification basée sur des grandeurs physiques mesurables expérimentalement tient compte implicitement des qualités intrinsèques ayant conduit au classement empirique adopté actuellement. Cette corrélation est rationnelle puisqu'une roche de même nature minéralogique ayant plus de cohésion, plus compacte, plus résistante présente, d'une façon générale, plus de difficulté de taille pour le façonnage.

2.2.2 Caractéristiques gravimétriques des pierres calcaires

2.2.2.1 Masse volumique absolue

Elle est fonction de la nature minéralogique des constituants. La masse volumique réelle (masse du matériau sec/volume absolu) du calcaire (carbonate de calcium) est de $2,72 \text{ g/cm}^3$. Celle du basalte est voisine de $2,90 \text{ g/cm}^3$, celle de la silice de $3,1 \text{ g/cm}^3$.

2.2.2.2 Masse volumique apparente

Elle est fonction de la compacité de la pierre (masse du matériau sec/volume apparent).

La porosité exprime le pourcentage des vides accessibles à l'eau par rapport au volume apparent. Pour les pierres, la porosité varie de 0,3 % pour les roches marbrières à 48 % (pierre de Chaussy, Val d'Oise).

2.2.2.3 Porosité

Elle est fonction de la morphologie de la microstructure, c'est-à-dire de la dimension, du nombre et de la forme des capillaires. La communication, la distribution des vides entre les cristaux, favorisent l'accès à l'eau et sa rétention. Cette caractéristique (la porométrie) est fondamentale pour les matériaux exposés à l'extérieur (aux intempéries et à la pollution), car elle conditionne leur durabilité. L'application de la porométrie aux matériaux de construction a été développée initialement par le CEBTP, en s'inspirant des travaux de Purcell (1905), utilisés pour définir la microstructure des roches pétrolières. Après plus de 20 ans de recherches sur la résistance au gel des matériaux de construction, il a été mis en évidence que la dimension des pores et la quantité d'eau existant dans les vides étaient essentielles pour expliquer la rupture des matériaux lorsqu'ils sont soumis à des températures inférieures à 0°C . Des exemples de parties d'édifices très exposées aux intempéries, ayant un très bon comportement après plusieurs siècles, ont permis des recherches fondamentales sur la constitution de leur microstructure. La présence d'un volume de pores gros (10 à $40 \mu\text{m}$) n'ayant pas de pouvoir de rétention d'eau explique ce bon comportement. Les recherches basées sur des mesures dilatométriques ont confirmé que, si la quantité d'eau dans les vides atteint la valeur critique, en cas de gel, des tensions capillaires très importantes sont exercées sur les parois des pores par suite de la transformation de l'eau en glace. L'existence de pores ou de bulles d'air de dimensions importantes, voisines de $50 \mu\text{m}$, permet à l'eau de cristalliser sans provoquer de tension sur les parois des capillaires.

2.2.2.4 Durabilité

Les études expérimentales ainsi que les enquêtes sur le comportement *in situ* des matériaux ont mis en évidence que plusieurs paramètres influent sur la détérioration des matériaux exposés aux intempéries. Le rôle de l'eau est fondamental, les conditions d'absorption, de rétention et de circulation interne conditionnent la durabilité des matériaux. Si la teneur en eau dans les vides est supérieure à la valeur critique (qui provoque l'expansion), des pressions

hydrauliques très élevées ($2\,000 \text{ kg/cm}^2$) sont développées par l'eau non gelée poussée dans certains capillaires. Aucun matériau de construction poreux n'a la capacité de conserver sa cohésion sous l'effet d'une telle sollicitation.

Tout revient à choisir les matériaux pour que leur exposition ne leur permette pas d'atteindre cette teneur en eau critique. Pour cela la théorie du choix des matériaux contenant des gros capillaires, à très faible pouvoir d'absorption et de rétention d'eau, a été jumelée avec l'examen du comportement réel *in situ*. À partir des références d'emploi des pierres utilisées dans les monuments historiques, dans des parties d'ouvrages bien connues et qui sont en parfait état de conservation, nous avons pu établir quatre degrés différents de sévérité d'exposition ; nous nous sommes également inspirés des règles de l'architecte Viollet-le-Duc dans son Dictionnaire raisonné de l'architecture française du XI^e au XVI^e siècle :

- les dallages extérieurs doivent être exécutés en pierre très dure ;
- les socles et couronnements en pierres dures ;
- les saillies : bandeaux, corniches et les assises de rejaillissement en pierres demi-fermes ;
- enfin, pour l'emploi en élévation sous saillie, les pierres tendres

sont utilisables en épaisseur suffisante de $0,25$ à $0,35 \text{ m}$. L'amélioration essentielle pour quantifier scientifiquement la qualité des pierres a consisté à proposer les nouvelles mesures physiques (porosité, porométrie, vitesse du son) pour remplacer les appellations de difficultés de taille qui, à l'époque, avaient été proposées par Viollet-le-Duc. Dans la pratique, ces recherches ont permis de proposer un essai de gel-dégel par cycles (gel dans l'air à -15°C pendant 6 h, suivi de 6 h de dégel dans l'eau).

Les limites (N nombre de cycles de gel) pour le choix des roches à utiliser selon leur position dans l'édifice (figure 1) sont :

- emploi en rejaillissement, corniche, bandeau : $N > 48$ cycles ;
- emploi en soubassement : $N > 96$ cycles ;
- emploi en dallage extérieur : $N > 240$ cycles.

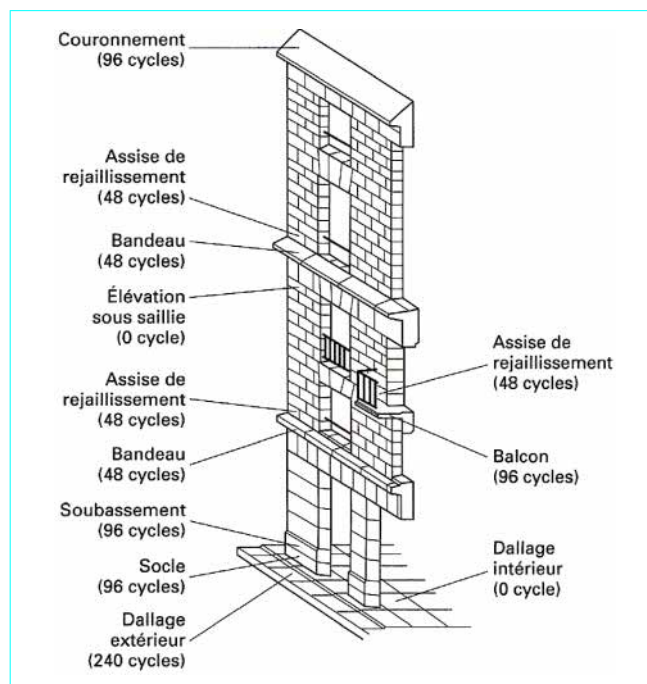


Figure 1 – Cycles de gel selon la position des roches dans l'édifice

Ces valeurs ont été choisies en considérant la relation entre le nombre N de cycles de tenue au gel-dégel sur éprouvettes en laboratoire et les aptitudes d'emploi observées sur le comportement réel *in situ* (en climat séquanien).

2.2.2.5 Capillarité

La pénétration de l'eau dans un mur de façade en pierre s'effectue par deux cheminements possibles :

- remontée d'eau verticale par capillarité ;
- migration capillaire horizontale à partir d'un parement de mur exposé à la pluie fouettante ou au ruissellement.

La connaissance théorique de la cinétique de ce mouvement de l'eau est basée sur les lois de Laplace et de Jurin : l'attraction capillaire est fonction de l'importance des vides et de leur dimension. D'une manière plus technologique, ce phénomène est quantifié par un essai simple et rapide : l'absorption capillaire qui consiste à mesurer la masse d'eau absorbée en fonction du temps par une éprouvette cubique immergée dans 2 mm d'eau.

Le **coefficient de capillarité** d'un matériau est défini par l'expression :

$$C = 100 \frac{m}{S \sqrt{t}}$$

avec m (g) masse d'eau absorbée depuis le début de contact pierre-liquide,
 S (cm²) section de la face de contact,
 t (min) temps depuis l'origine.

Empiriquement, il a été constaté que la masse d'eau absorbée est, dans les premières minutes d'essai, proportionnelle à la racine carrée du temps en minutes. Ce qui a permis de définir la capillarité comme le coefficient angulaire de la droite caractérisant le mouvement d'absorption. Pour les pierres calcaires, le coefficient de capillarité varie de 1 (par exemple Massangis roche jaune) à 98 (pierre de Vassens). Un exemple est présenté sur la figure 2.

D'une façon générale, plus un matériau est poreux, plus son coefficient de capillarité est élevé, ce qui est aisément compréhensible, car on offre plus de vide à l'eau pour y pénétrer. Mais, comme le montre la figure 3, la répartition et la dimension des pores jouent un rôle. Pour des roches de même porosité (même volume de vide accessible à l'eau), le coefficient de capillarité pour les pierres à pores fins est plus grand. Par exemple, dans la pierre de Tervoux (23 % de porosité) l'ascension capillaire est plus rapide (5 cm en 1 h) que dans la pierre de Savonnières (porosité 35 %) où l'on n'atteint que 3 cm en 1 h. Comme nous le verrons au paragraphe suivant, les pores de la pierre de Savonnières sont plus grands que ceux de la pierre de Tervoux.

2.2.2.6 Porométrie

La détermination de la dimension et de la répartition des pores des matériaux s'effectue avec un porosimètre à mercure (cf. article *Caractérisation de la texture poreuse des matériaux* [P 1 050] dans le traité *Analyse et Caractérisation*). La technique expérimentale de cet appareil consiste à faire pénétrer du mercure dans les pores des matériaux à étudier.

Plus les pores sont fins, plus la pression nécessaire pour la pénétration du mercure est élevée. Pour chaque injection de mercure, il est possible de connaître la pression exercée (directement proportionnelle à la dimension des capillaires intéressés) et le volume ayant pénétré. La porométrie d'un matériau se représente sous la forme d'un histogramme. En abscisse, on porte le diamètre des pores (supposés de section cylindrique) et en ordonnée le pourcentage du volume total des pores du diamètre considéré rapporté au volume total apparent de l'échantillon de matériau. Les résultats obtenus pour les pierres de Tervoux et de Savonnières sont présentés sur la figure 4. Ces histogrammes montrent que les pores de la pierre de Tervoux sont plus fins (1 μ m en moyenne) que ceux

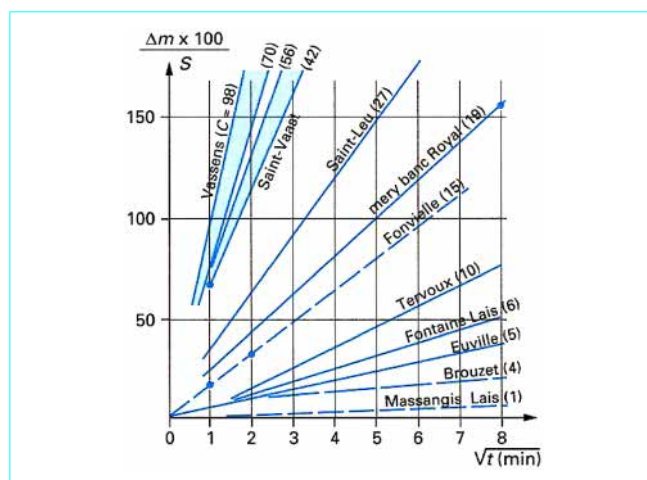


Figure 2 – Coefficient de capillarité de quelques matériaux

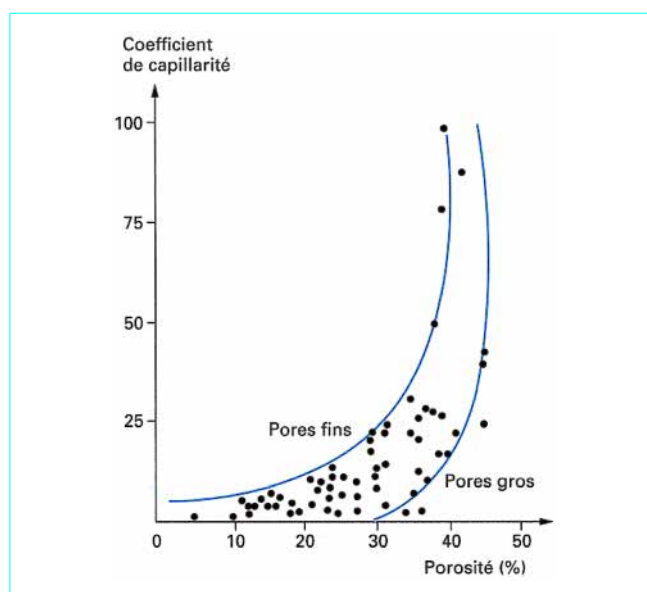


Figure 3 – Relation entre la porosité et la capillarité pour les pierres calcaires

de la pierre de Savonnières (10 μ m) et que la répartition de ces derniers est beaucoup plus étalée.

La connaissance de la morphologie de la microstructure des roches est très importante pour expliquer le rôle de l'eau : l'absorption et la rétention. Les différences observées permettent d'expliquer les différences de durabilité (au gel ou à la cristallisation des sels). Ainsi, dans les mêmes conditions d'exposition, la pierre de Tervoux absorbe rapidement de l'eau et presque tous ses pores sont saturés alors que la pierre de Savonnières se remplit lentement et que la moitié de ses capillaires sont vides. Il est connu que la pierre de Savonnières résiste très bien au gel et peut être utilisée en partie très exposée (revêtement horizontal, pierre tombale) ; par contre la pierre de Tervoux ne peut être utilisée en climat rigoureux que pour des parties protégées (élévation sous saillie).

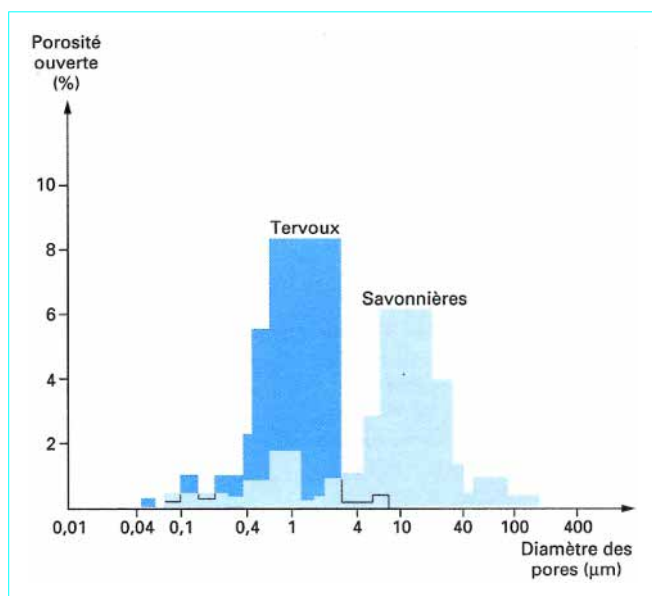


Figure 4 – Histogrammes de répartition des pores pour deux pierres calcaires

2.2.2.7 Coefficient d'absorption d'eau

C'est le rapport entre le volume d'eau absorbée après 48 h d'immersion complète et le volume d'eau absorbée sous vide (volume des vides caractérisant la porosité). Le mode opératoire est défini par la norme NF B 10-504. La principale utilité de la mesure du coefficient d'absorption est d'informer rapidement et simplement sur la répartition et la dimension des pores. Les pierres à fort coefficient d'absorption d'eau (Tervoux 91 %) ont des pores très fins presque entièrement emplis, alors que la pierre de Savonnières (coefficient d'absorption 0,56) dispose de bulles d'air qui permettent, en cas de gel de l'eau, de servir de vase d'expansion. Il est intéressant de noter que la durabilité des pierres, à porosité égale, est supérieure quand le coefficient d'absorption est faible. Cette constatation avait servi de base à Hirschwald, en Allemagne, pour proposer cette méthode d'évaluation de la durabilité au gel des matériaux (au début du siècle).

2.2.3 Caractéristiques mécaniques des roches

2.2.3.1 Résistance à la rupture en compression

La mesure de résistance mécanique des roches la plus courante est celle de la résistance à la rupture en compression ; elle a pour but de permettre le choix des pierres en fonction des sollicitations auxquelles le matériau sera soumis dans l'ouvrage. L'essai s'effectue selon les prescriptions de la norme NF B 10-509. Des cubes de pierre de 7 cm d'arête, dont les faces sont rectifiées, sont soumis à une contrainte jusqu'à la rupture. Cette contrainte, pour les roches sédimentaires, est exercée perpendiculairement au sens des lits naturels.

Pour les pierres calcaires françaises utilisées en construction, la résistance à la rupture en compression varie de 50 kg/cm² (pierre tendre de Chaussy, Val d'Oise) à 2 000 kg/cm² (pierre de Hauteville-Compnès, Ain).

Pour les marbres, la résistance varie de 800 à 2 100 kg/cm², pour le granit de 1 500 à 2 000 kg/cm², pour le grès de 300 à 2 500 kg/cm² ; pour les ardoises elle est de l'ordre de 1 000 kg/cm².

2.2.3.2 Coefficient de sécurité

La grande variabilité de la qualité des pierres due à des écarts que l'on observe d'un banc à l'autre, l'influence de la teneur en eau dans les pierres tendres, conduisent les calculateurs à prendre, par prudence, un coefficient de sécurité de 10. Cela signifie que la contrainte maximale à appliquer sur la surface d'un mur en pierre porteuse est 10 fois plus faible que la résistance à la rupture en compression obtenue sur l'éprouvette normalisée (cube de 7 cm d'arête).

■ Cas des trumeaux étroits

Sur les trumeaux étroits (longueur inférieure à 3 fois l'épaisseur du mur), une réduction supplémentaire du taux de travail est appliquée en fonction de l'élancement e (e = hauteur/plus faible dimension du trumeau) :

- réduction de 5 % si $e < 3$;
- réduction de 8 % si $3 \leq e < 5$;
- réduction de 25 % si $5 \leq e < 25$.

2.2.3.3 Contraintes limites à imposer aux maçonneries

Sur les murs constitués de blocs de pierre de taille (blocs assemblés avec des joints coupés réalisés au mortier), les contraintes ne doivent pas dépasser les limites suivantes.

■ Joints réalisés au mortier de ciment :

- pierre dure et froide : 35 kg/cm² ;
- pierre ferme : 25 kg/cm² ;
- pierre demi-ferme : 20 kg/cm² ;
- pierre tendre : 15 kg/cm² ;
- pierre très tendre : 5 kg/cm².

■ Joints réalisés au mortier de chaux grasse :

- les contraintes doivent être inférieures à 4-8 kg/cm².

■ Joints coulés au plâtre :

- les limites varient de 5 à 25 kg/cm².

2.2.3.4 Résistance en traction

L'intérêt de la connaissance de la résistance en traction est la détermination de la dimension des éléments soumis à des effets de flexion : balcon, marche, etc. La constitution des pierres calcaires et des marbres par cimentation naturelle des dépôts sédimentaires explique que cette agglomération ne confère pas, en traction, une résistance à la cohésion aussi homogène et aussi importante que celle obtenue en compression, par suite des pressions et des températures de cristallisation des grains de calcite. Aussi les valeurs de résistance en traction sont caractéristiques des corps fragiles et n'atteignent que le dixième de la résistance en compression pour le calcaire et le granit. Le rapport entre la résistance en traction et celle en compression n'atteint que le quinzième pour les grès. Cela s'explique par le mécanisme de rupture. Dans une section tendue, la séparation des cristaux est influencée principalement par la présence d'un point faible. Au point de vue pratique, cette notion conduit, par sécurité, à renforcer par une armature (par exemple collée) la fibre tendue d'une pièce mince fléchie.

2.2.3.5 Module d'élasticité et déformation lente sous charge

Les roches soumises à des charges se déforment comme toutes les matières solides. Pour une certaine importance des charges, les déformations ne sont pas visibles à l'œil. Si la contrainte de compression est inférieure à 25-50 % de la contrainte de rupture, le matériau se déforme proportionnellement à la contrainte appliquée. Si cette sollicitation n'est que de courte durée, sa suppression n'entraîne pas de déformation résiduelle. Ces déformations instantanées réversibles sont appelées déformations élastiques. Le rapport entre la contrainte et la déformation élastique caractérise une propriété du matériau appelée module d'élasticité. Pour les pierres calcaires, les valeurs du module d'élasticité varient de 5 000 MPa (calcaires tendres) à 70 000 MPa (roches marbrières). Si la durée d'application

de la contrainte est longue (cas d'un élément en service soumis à une tension permanente importante), la déformation lente sous charge ou déformation plastique appelée fluage s'ajoute à la déformation instantanée. Cette vitesse de déformation est rapide au début de l'application de la charge puis, dans le temps, décroît et semble s'amortir. Après une dizaine d'années, pour les pierres calcaires, cette déformation tend vers une limite. L'importance du fluage varie avec la grandeur de la contrainte ; cette déformation plastique peut atteindre 2 à 3 fois la déformation élastique. En général, le taux de chargement des roches est faible (les sections sont importantes). Les déformations élastiques et plastiques sont pratiquement difficiles à observer à l'œil. Pour quelques éléments fléchis seulement, il est possible de voir des courbures résultant de déformations permanentes. Pour des dalles de revêtement en marbre placées en façade et bloquées aux deux extrémités, il est possible d'observer des flèches de l'ordre de 10 mm pour des longueurs de 1 m. Sous l'effet de l'ensoleillement sur une façade, l'absence de degrés de liberté (joint entre les dalles) entraîne des contraintes sous l'effet de la dilatation thermique gênée. Jusqu'à une certaine limite, la courbure n'entraîne pas de rupture, mais si la sollicitation en traction dépasse la valeur limite d'extension, une rupture brutale peut se produire. Cette décohésion soudaine est dangereuse pour la sécurité. Pour éviter d'atteindre cet état limite, il faut laisser des joints, en particulier dans le cas d'association avec d'autres matériaux dont les coefficients de dilatation thermique et les modules d'élasticité sont différents de ceux des pierres. Cette carence de résistance en traction des éléments en pierre conduit les projeteurs à concevoir les parties de construction classiques uniquement soumises à des compressions (cas des voûtes). Seules quelques particularités régionales ou de l'Antiquité permettent de rencontrer des linteaux ou des couvertures réalisés dans des blocs ou dalles placés en encorbellement pour compléter progressivement la fermeture d'une ouverture (temples mayas ou boris réalisés en pierres sèches).

Les techniques plus modernes évitent d'exécuter des balcons ou des consoles en matériaux fragiles soumis à des flexions. Ainsi, les dalles en pierre constituant des marches sont armées dans la partie tendue, pour éviter une rupture brutale en cas de dépassement de la contrainte ultime.

2.2.3.6 Module d'élasticité dynamique

Les propriétés élastiques des matériaux peuvent être déterminées par leur mise en vibration, sans altérer leurs qualités. Si l'on applique un choc à l'extrémité d'un élément prismatique, cette impulsion se propage dans sa longueur à une vitesse qui est fonction des propriétés élastiques de la roche. Arrivée à l'extrémité du prisme, l'onde se réfléchit de nouveau. Si, au même instant, on provoque une nouvelle impulsion, l'intensité des déformations se superpose à celle due à la nouvelle impulsion. L'amplitude du mouvement est maximale. À ce moment, le prisme est mis en résonance. La mesure de la fréquence fondamentale de résonance permet de calculer le module d'élasticité dynamique (qui est supérieur, d'environ 15 %, au module d'élasticité statique).

Pour les pierres tendres le module d'élasticité dynamique varie de 4 000 MPa (pierre tendre) à 60 000 MPa (roches marbrières). Cette propriété élastique permet de définir la qualité des matériaux et permet de mettre en évidence de très petits défauts de cohésion qui ne sont pas visibles à l'œil. Cette mesure non destructive s'effectue rapidement, la valeur obtenue est très précise. Cette technique expérimentale a été retenue pour suivre scientifiquement l'évolution de la cohésion des matériaux soumis à différentes sollicitations répétées, par exemple, des cycles de gel-dégel, des cycles alternés de cristallisation de sels, de polluants, etc.

La fréquence de résonance des pierres calcaires françaises varie de 2 000 Hz (pierres tendres) à 9 000 Hz (roches marbrières). Dès qu'une amorce de microfissure se produit dans la structure d'une roche, on note une réduction de la fréquence de résonance alors que, visuellement, aucune altération n'est visible. Pour l'étude du comportement au gel des pierres calcaires en fonction du nombre de cycles de gel-dégel, il a été fixé, en se basant sur les références

réelles d'emploi, qu'une diminution de 5 à 10 % de la fréquence de résonance correspond à une altération. On détermine ainsi les limites de sévérité possible d'exposition aux intempéries des roches de construction (§ 2.2.2.4).

2.2.3.7 Vitesse de propagation du son

La vitesse de propagation du son dans les matériaux est une fonction directe des propriétés élastiques et de la compacité.

Plus la porosité des matériaux est faible, plus la propagation des ondes est rapide. Inversement, dans les matériaux présentant des points faibles de cohésion, des fissures, des strates, les impulsions contournent ces espaces remplis d'air et la durée de la propagation est plus longue. Les conditions d'exécution de cette méthode expérimentale sont mentionnées dans la norme NF B 10-505. Cette mesure s'effectue avec un appareillage électronique très facilement transportable. Elle peut être réalisée en carrière, sur chantier, en laboratoire ou dans un atelier. La détermination est rapide, précise, non destructive. Elle peut être répétée plusieurs fois au même point. Différentes techniques permettent une auscultation complète des éléments en place :

- **par transparence**, quand l'accès est possible sur deux faces opposées (figure 5) ;

- **par rayonnement**, quand il faut déterminer l'homogénéité d'un massif en maçonnerie ; l'émetteur est placé en un point fixe et, sur la face opposée ou perpendiculaire, on déplace à intervalle constant le récepteur sur une ligne (figure 6) ;

- **en surface**, lorsqu'une seule face d'un élément est accessible. La technique de mesure en surface permet de détecter un défaut à quelques centimètres sous le parement. L'émetteur reste fixe à l'extrémité d'une droite qui est tracée sur l'élément (figure 7). Le récepteur est déplacé à intervalle de distance constant. On mesure le temps de propagation pour ces différents points. La pente de la droite reliant la distance au temps de parcours représente la vitesse du son dans le matériau ausculté. Cette technique permet de détecter une hétérogénéité dans l'épaisseur. Lorsque l'auscultation est réalisée sur une surface altérée (pierre dégradée par la sulfatation, pierre gelée, pierre incendiée ou attaquée par la corrosion chimique), la profondeur de la décohésion est mise en évidence. Le dépouillement graphique montre deux vitesses de propagation, ce qui permet d'identifier deux qualités de matériau.

La vitesse du son dans les pierres calcaires varie de 1 500 m/s (pierres tendres) à 6 500 m/s (roches marbrières). Pour le granit, la vitesse du son varie de 4 000 à 5 200 m/s.

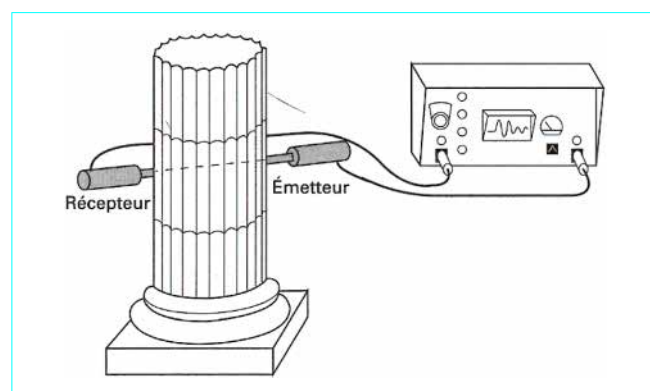


Figure 5 – Mesure de la vitesse du son en transparence

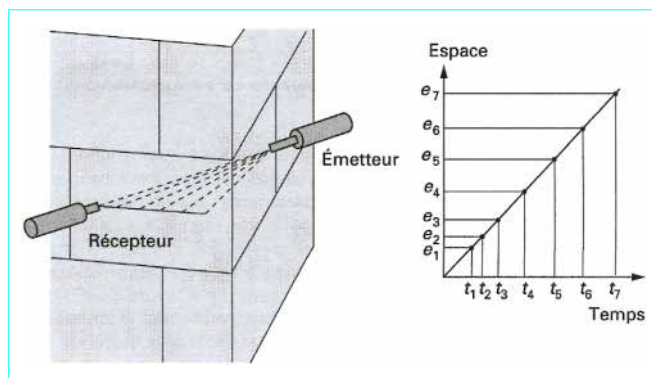


Figure 6 – Mesure de la vitesse du son par rayonnement

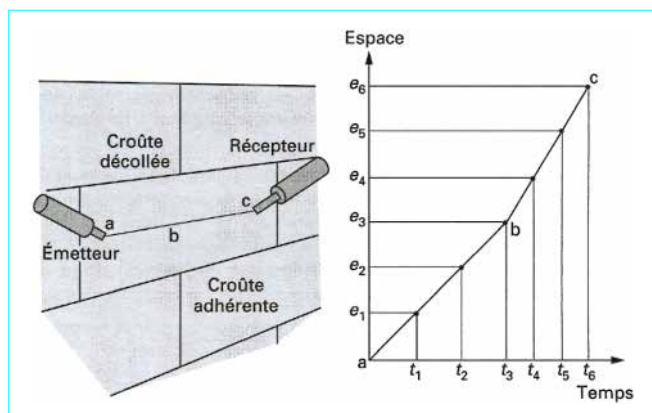


Figure 7 – Détection d'un défaut de surface par la mesure de la vitesse du son en surface

Après plus de 20 ans d'application, cette méthode a montré qu'il existe une très bonne corrélation entre la vitesse du son et la résistance en compression. Ainsi, si l'on dispose d'une courbe d'étalement sur une nature de matériaux donnés, il est possible, à partir de mesures de la vitesse du son, d'évaluer avec une bonne précision ($\pm 10\%$) la résistance en compression. Comme la mesure n'est pas destructive, elle permet de renseigner les calculateurs sur les possibilités de résistance des éléments porteurs d'une construction existante, éventuellement de détecter les points faibles pour orienter les travaux confortatifs lors d'une restauration. Pour estimer la résistance en compression à partir de la vitesse du son, des courbes d'étalement donnant la relation empirique ont été établies sur un grand nombre d'éprouvettes. L'étude expérimentale qui a été réalisée sur plusieurs natures de matériaux de construction est présentée sur la figure 8, pour le béton, les pierres calcaires, le granit, le grès, la brique pleine.

2.2.3.8 Dureté

En construction, les roches naturelles sont de plus en plus utilisées pour mettre en évidence leur aspect de surface. La résistance du parement à l'érosion, aux chocs, à l'usure, à la rayure est fondamentale pour évaluer les propriétés liées aux qualités esthétiques. L'usage n'est pas d'enduire, ni de peindre les parements décoratifs en pierre. Pour répondre à cette exigence, un essai de rayure a été normalisé (NF B 10-506) après une recherche effectuée au CEBTP. L'essai s'effectue avec un scléromètre de Martens. Une pointe en acier ou en tungstène raye la surface à étudier, on mesure la largeur de la rayure en différents emplacements avec une lunette grossis-

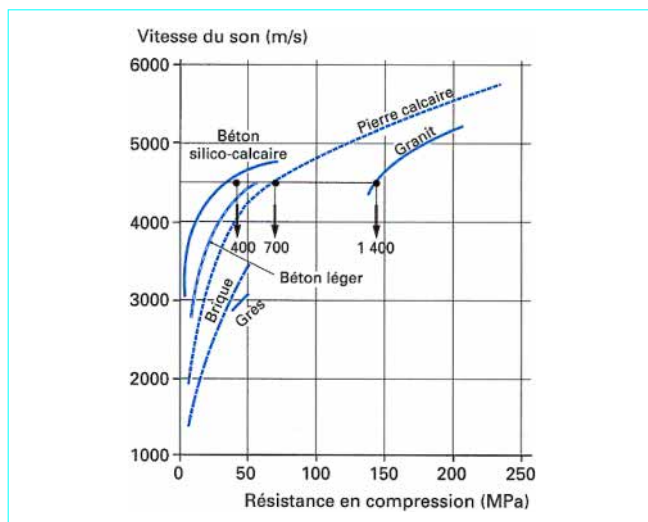


Figure 8 – Relation vitesse du son-résistance en compression pour différents matériaux

sante permettant d'apprécier le $1/10^e$ de millimètre. Pour les pierres calcaires, la largeur moyenne de la rayure varie de 3,5 mm pour les pierres tendres à 0,5 mm pour les pierres dures (roches marbrières). Pour le grès des Vosges, la rayure varie de 1,2 à 0,6 mm.

2.2.3.9 Usure

Pour le choix d'un matériau à utiliser comme revêtement de sol, en dallage, l'essai d'usure normalisé (NF B 10-508) est identique à celui des pierres artificielles reconstituées. L'appareil comporte un disque métallique qui frotte sur la dalle à étudier en entraînant du sable siliceux abrasif (figure 9). Après 75 tours on mesure la longueur L de l'empreinte réalisée sur l'éprouvette.

L'interprétation des résultats, basée sur la corrélation entre l'usure mesurée expérimentalement en laboratoire et le comportement réel des marbres français utilisés comme revêtement de sol dans des édifices connus, est effectuée par une commission de spécialistes. Il a été convenu qu'il fallait différencier les exigences en fonction de la destination des locaux (intensité du trafic) :

- **trafic intense** (hall de gare, local commercial, etc.) : la longueur de l'empreinte à l'essai d'usure doit être inférieure à **32 mm** ;
- **trafic normal** (hall d'entrée d'un immeuble à usage d'habitation) : la longueur de l'empreinte doit être inférieure à **37 mm** ;
- **trafic réduit** (locaux à usage privé, destinés à une utilisation familiale, sans réceptions fréquentes) : la longueur de l'empreinte doit être **inférieure à 47 mm**.

2.2.3.10 Revêtement de murs par dalles minces : résistance aux attaches

L'utilisation des dalles de pierre naturelle comme revêtement de mur se développe de plus en plus. Pour des raisons économiques, l'épaisseur des dalles tend à être la plus faible possible. Mais la fixation de ces dalles verticales, au-delà d'une certaine surface (900 cm^2), exige la mise en place de goujons de fixation dans les chants des dalles (DTU 55-2). Dans la partie inférieure, les agrafes assurent la portance, tandis que dans la partie supérieure des dalles, les agrafes empêchent le déversement vers l'extérieur. Les attaches pénètrent par un ergot dans l'épaisseur des dalles ; dans ce cas, suivant la qualité de la roche, l'épaisseur de la plaque doit être suffisante pour résister à l'éclatement de la pierre. Un essai de résistance aux attaches a été mis au point au CEBTP et normalisé (NF B 10-514) après plusieurs études.

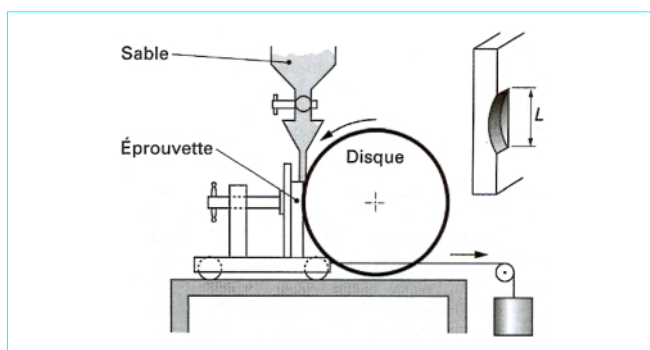


Figure 9 – Appareil d'usure au disque métallique

Il permet de déterminer l'épaisseur des dalles pour que la pierre résiste par exemple à une force d'arrachement de 50 daN. Une étude expérimentale réalisée sur plusieurs natures de pierre a permis d'établir qu'il existe une relation linéaire entre la force de rupture pour l'éclatement et l'épaisseur de pierre nécessaire (figure 10).

2.2.3.11 Coefficient de dilatation thermique

Sous l'influence des variations de température, les roches subissent des modifications de longueur proportionnelles à l'écart thermique. Selon la composition minéralogique, chaque roche subit une variation qui lui est propre, appelée coefficient de dilatation thermique α .

Les principales valeurs sont les suivantes :

- calcaire : $\alpha = 5,5 \cdot 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$;
- granit : $\alpha = 8 \cdot 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$;
- schiste : $\alpha = 9 \cdot 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$;
- quartz : $\alpha = 11 \cdot 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$;
- gypse : $\alpha = 14 \cdot 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$.

Le coefficient de dilatation du béton est fonction de la nature minéralogique des granulats, du dosage en ciment et de l'âge (degré d'hydratation). À titre d'exemple, pour un béton dosé à 350 kg/m³ et âgé de 2 ans, les coefficients de dilatation sont :

- béton de calcaire dur concassé : $\alpha = 7 \cdot 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$;
- béton de granulats silico-calcaires : $\alpha = 9 \cdot 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$;
- béton de quartz concassé : $\alpha = 11 \cdot 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$.

Les règles BAEL admettent, pour le béton armé, $\alpha = 10 \cdot 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$.

Il faut signaler que l'acier utilisé dans le béton armé courant a un coefficient de dilatation $\alpha = 12 \cdot 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$, qui est une valeur sensiblement analogue à celle des bétons. C'est cette analogie qui permet de comprendre l'excellent comportement, sous l'effet des variations thermiques, du béton armé. L'acier noyé dans le béton se déforme sensiblement de la même quantité que celle du béton qui l'englobe, l'adhérence du composite n'est donc pas altérée. Mais, en ce qui concerne l'association pierre-béton ou pierre-métal, les différences de comportements thermiques peuvent entraîner des désordres en l'absence de précautions constructives. La désolidarisation s'impose. Il est indispensable de laisser des joints entre les plaques de revêtement placées à l'extérieur. Il faut prévoir que la structure porteuse puisse se déformer indépendamment des plaques qui la recouvrent (un manchon coulissant est prévu dans les trous de fixation des ergots des attaches). Certaines techniques de plaquages (pelochon) ont présenté de nombreux désordres car chaque dalle n'est pas autoporteuse, mais collée par plots à la façade qu'elle recouvre. L'expérience a montré la nécessité de laisser des joints souples pour donner plus de liberté au revêtement (joints horizontaux tous les 6 m ou 2 niveaux, et verticaux tous les 8 m). Il convient de rappeler que, sous l'action de l'ensoleillement, les roches de teinte foncée emmagasinent beaucoup plus de calories (par absorption des rayons infrarouges) que les matériaux de teinte claire.

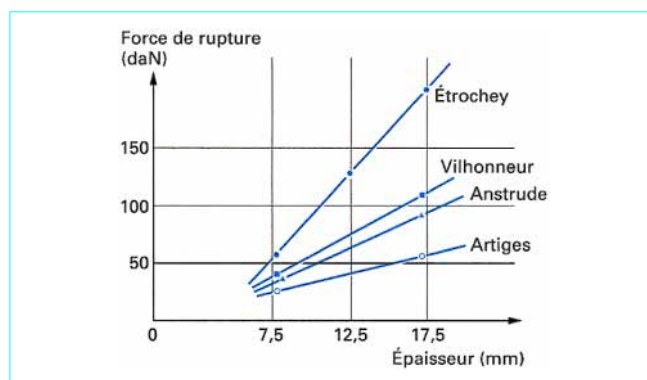


Figure 10 – Épaisseur de pierre nécessaire sous l'agrafe pour qu'une plaque de pierre résiste à une force d'arrachement de 50 daN

3. Pathologie des parements en pierre

L'altération des éléments en pierre exposés à l'extérieur provient de la conjugaison de plusieurs facteurs :

- conditions climatiques ;
- pollution ;
- défauts naturels des roches ;
- utilisation d'un matériau de qualité non appropriée à la fonction (position dans l'édifice) ;
- mise en œuvre défectueuse.

3.1 Détériorations provenant des facteurs extérieurs

La principale cause de dégradations survenant aux éléments en pierre est liée à l'action de l'eau qui, en se combinant à d'autres facteurs, provoque ou accentue les effets destructeurs. Le mouvement ou la rétention de l'eau est fonction des caractéristiques de la micro-structure des roches, c'est-à-dire les espaces internes accessibles à l'eau (importance et dimension des pores).

3.1.1 Action de l'eau

L'eau existant dans les roches n'est jamais pure. Elle véhicule des sels provenant du sol si l'eau remonte par capillarité des soubassements ou du terrain avec lequel l'élément est en contact. De même, lors de son passage dans les joints, l'eau peut dissoudre des sels. Ces sels, plus ou moins solubles, sont transportés et déposés à la surface lors de l'évaporation. La présence de ces sels existant dans les pores de la pierre près de la surface peut avoir des effets différents plus ou moins graves. Leur manifestation se présente sous forme de taches ou d'efflorescences blanchâtres donnant un aspect disgracieux. Mais la cristallisation de ces sels peut entraîner des conséquences plus graves. Certains cristaux alimentés en eau sont hygroscopiques ; ils retiennent l'eau, s'expansent dans les capillaires et finissent par faire éclater la pierre. On observe des fines fissures, un écaillage avec des effritements. L'ensemble de la surface de la roche apparaît comme rongée ; peu à peu elle perd sa cohésion et se détruit.

3.1.2 Action du gel

L'action du gel provoque la dégradation des pierres, quand la teneur en eau dans les pores atteint la valeur critique. Cette quantité est telle que, lors de la transformation de cette eau en glace par un abaissement de la température sous 0 °C, il n'existe pas suffisamment d'espace vide dans les capillaires pour permettre l'expansion sans exercer de pression destructrice (§ 2.2.2.3). La valeur de cette teneur en eau critique est différente suivant les caractéristiques des structures poreuses. Elle peut varier de 50 % d'eau par rapport au volume des vides (pierre de forte résistance au gel) à 95-100 % (pierre facilement détruite par le gel). Les matériaux constitués de pores fins (1 µm) ouverts à l'eau atteignent plus facilement la teneur en eau critique que les matériaux à gros pores (> 50 µm), dans les mêmes conditions d'expositions aux intempéries. Plusieurs années de recherches expérimentales, complétées par de nombreuses observations sur les bâtiments et ouvrages d'art, ont permis de démontrer qu'il convient, pour le choix des matériaux exposés aux intempéries, de tenir compte de deux facteurs :

- d'une part la constitution de la structure poreuse ;
- d'autre part leur milieu d'exposition (l'environnement et le microclimat).

Cette conception entièrement nouvelle modifie le raisonnement classique, un peu simpliste, d'après lequel une roche est gélive ou pas. En pratique, les références d'emploi montrent qu'il est plus rationnel, et surtout plus économique, de proposer un classement de résistance au gel des matériaux plus gradué. En effet, il est prouvé que les risques de dégradation d'un élément par le gel sont intimement liés aux possibilités d'absorption et de rétention de l'eau, c'est-à-dire suivant l'emplacement qu'il occupe vis-à-vis des sources d'humidité. Pour les bâtiments, les règles empiriques préconisées par Viollet-le-Duc pour le choix des duretés de pierre en fonction de leur position dans l'édifice ont été complétées par des notions physiques plus scientifiques liées à l'absorption d'eau, à la porosité, à la distribution et à la dimension des pores. En définitive, en ce qui concerne la durabilité des pierres exposées aux intempéries ou aux remontées d'eau provenant du sol chargé de sels, les conclusions sont les suivantes :

- toutes les roches et autres matériaux de construction soumis au gel gonflent si la quantité d'eau incluse dans les vides atteint la teneur critique ;
- la quantité d'eau provoquant l'expansion est variable et peut être comprise entre 60 et 100 % du volume des vides accessibles à l'eau.

Cela signifie que certaines pierres éclatent au gel bien que de l'air subsiste encore à l'intérieur. La pression hydraulique développée par l'eau poussée par les cristaux de glace cause cette destruction. Plus les roches sont poreuses et plus elles ont des pores fins rétenteurs d'eau, plus elles risquent d'atteindre facilement la teneur en eau critique, génératrice de la rupture au gel.

3.1.3 Action des charges

Sous l'action des sollicitations trop importantes pour la qualité de la roche mise en œuvre, les contraintes trop élevées peuvent provoquer la fissuration et même l'éclatement et la rupture d'un élément.

Plusieurs facteurs influent sur la résistance mécanique des éléments ou objets en pierre ; parmi ceux-ci il faut noter principalement les suivants.

3.1.3.1 Sens de pose des pierres calcaires

La pose des roches sédimentaires doit tenir compte de l'orientation du lit. La cohésion des pierres calcaires est plus faible sous l'action des forces exercées parallèlement au lit de stratification naturelle. Suivant les natures de pierre, cette différence de résistance entre la cohésion perpendiculaire ou parallèle au lit est plus ou moins marquée. Il est indispensable que l'action des contraintes s'exerce perpendiculairement au sens de stratification naturelle.

Il arrive fréquemment que des blocs posés présentent une désagrégation par plaques. Ce clivage peut se produire sur des éléments posés verticalement en délit. Sous l'action des charges ou sous l'effet des pénétrations d'eau et du gel, il se produit une séparation par feuilles ou par plaques.

En ce qui concerne les dalles de revêtement de sol, certaines roches trop poreuses placées à l'extérieur, ou de trop faible cohésion entre les stratifications, posées parallèlement à la surface du revêtement se détruisent progressivement par une sorte d'érosion sous l'effet de l'action de l'eau, du gel ou des sels de déverglaçage utilisés en hiver pour éviter la glissance. Le choix de la roche utilisée n'est pas adapté à cette fonction. D'une manière générale les roches calcaires ne sont pas compatibles avec l'utilisation des sels utilisés sur le sol pour éviter la formation du verglas en hiver.

3.1.3.2 Teneur en eau

Une importante teneur en eau dans les pierres tendres et poreuses diminue considérablement leur cohésion. Par exemple, une étude expérimentale (réalisée sur la pierre calcaire de la Bouloie Banc Franc) a montré que, sur les pierres saturées d'eau, la résistance en compression était réduite de moitié (50 kg/cm²) par rapport à celle d'une pierre sèche (127 kg/cm²). Le résultat s'explique par plusieurs considérations. Le frottement interne des cristaux agglomérés est fortement réduit par la présence d'un liquide. De plus, dans un matériau poreux gorgé d'eau, les capillaires exercent une pression interne hydrostatique (dans les trois directions) dans le matériau ; cette sollicitation s'ajoute aux contraintes dues aux charges extérieures. En pratique, cette réduction de cohésion des roches est connue depuis longtemps par les carriers et les sculpteurs qui savent qu'une roche fraîchement sortie de carrière est plus facile à travailler qu'après séchage.

3.1.3.3 Jointoiment des blocs

Le mauvais remplissage des joints ou la trop faible qualité du mortier réduisent la résistance du composite qui constitue un mur porteur. L'assemblage des éléments en pierre s'effectue dans les constructions actuelles par la création de joints, espacés entre chaque bloc, qui sont remplis au mortier à base d'un liant (chaux hydraulique, ciment, plâtre...). Le rôle de ce mortier est d'assurer la liaison et la répartition sur l'ensemble des blocs. Si le joint n'est pas bourré complètement, si sa qualité de collage ou de cohésion est trop faible, les tensions transmises d'un bloc à l'autre ne sont pas uniformes. La surface totale de l'épaisseur du mur n'est pas sollicitée. Des concentrations de contraintes en certains points d'un bloc se produisent. Si ces tensions locales sont trop élevées, ce poinçonnement entraîne des fissures et des ruptures de blocs.

L'ensemble de ces considérations justifie l'important coefficient de sécurité qui est pris en compte par les calculateurs lors de l'établissement d'un projet et par les bâtisseurs de construction en pierre (§ 2.2.3.2).

3.1.3.4 Action éolienne

Les roches sédimentaires sont constituées de dépôts successifs plus ou moins compacts. Sous l'action du vent, entraînant des fines particules de grains de poussières divers, les blocs exposés à l'extérieur à cette action permanente peuvent subir une érosion. Les lits les plus tendres se désagrègent. Des sillons se creusent en surface sous l'effet du vent, de la pluie et du gel. Par contre les lits les plus durs, ayant plus de cohésion, résistent et conservent leur aspect initial.

3.1.3.5 Action de la température

Les écarts thermiques provoquent une expansion et une contraction volumétriques variables selon la nature des minéraux qui composent la roche. Si la disposition des cristaux est répartie au hasard, il se crée des tensions internes par différences de dilatation entre les cristaux dont les orientations sont quelquefois opposées et leurs coefficients de dilatation thermique différents. Par

exemple, certains marbres constitués de calcite cristallisée peuvent présenter une dilatation dans une direction et une contraction dans la direction perpendiculaire. Sous l'effet de fortes variations de température entre le jour et la nuit, répétées des milliers de fois, une fatigue se produit. Il en résulte, après des dizaines d'années, une décohésion interne et un cisaillement entre les cristaux. Des éclatements, des fissurations, des écailllements sont les formes fréquentes de ce type d'altérations. Si plusieurs éléments sont associés les uns aux autres, les changements de température entraînent des variations de longueur propre de chaque partie. Si l'assemblage ne permet pas que les mouvements s'effectuent librement (absence de joints souples...), des tensions naissent dans les matériaux. Le dépassement des valeurs limites de déformation ou de résistance entraîne des courbures ou des ruptures.

3.2 Mécanismes chimiques ou physico-chimiques

Les roches ont une composition chimique très différente selon leur nature minéralogique. Leur prédisposition à subir des transformations chimiques et aussi des altérations est très variable.

De même, les milieux extérieurs environnant les roches diffèrent selon les situations géographiques. Les processus d'altérations naturelles en relation avec l'eau sont très fréquents. L'absorption d'eau dans les vides entre les cristaux de la plupart des minéraux provoque un certain nombre de réactions, soit physiques comme l'expansion, soit chimiques. Sur les cristaux de calcite il se produit un processus de dissolution suivi d'une transformation du carbonate de calcium, en présence d'eau chargée d'anhydride carbonique, en bicarbonate de calcium.

3.2.1 Action de la pollution atmosphérique

Le développement des activités industrielles et de la population ont provoqué, dans certaines zones, une émission massive dans l'atmosphère de substances qui naturellement n'existaient qu'en très faible concentration. La nature et la qualité des polluants sont aussi une fonction des conditions atmosphériques et de la topographie. Ces facteurs influent beaucoup sur la stagnation et le transport des polluants. Pour les pierres calcaires exposées à l'extérieur, les agents polluants les plus dangereux sont l'anhydride sulfureux et l'anhydride carbonique. Il n'est pas encore établi d'une façon formelle que les oxydes d'azote soient aussi nocifs.

3.2.2 Modification des propriétés des parements en pierre calcaire

Avant même que des altérations apparaissent d'une manière visible, la pollution atmosphérique (air et eau) crée une modification minéralogique de la couche superficielle des parements en pierre.

Dans une ambiance rurale, il se forme sur les pierres calcaires une couche plus dure, due à la cristallisation en surface des sels dissous dans l'eau de carrière, lorsque celle-ci s'évapore. Cette couche superficielle appelée **calcin**, constituée de carbonate de calcium, assure une protection naturelle des parements en pierre.

En atmosphère urbaine ou industrielle, la composition de la croûte superficielle est modifiée. La pluie, le brouillard, les particules humides qui se condensent en surface contiennent une concentration variable d'anhydride sulfureux (SO_2). Celui-ci se dissout dans l'eau pour donner de l'acide sulfureux (SO_3H_2). Les solutions qui contiennent cet acide pénètrent jusqu'à une certaine profondeur qui est fonction de la microstructure poreuse du matériau. La solution acide en contact avec le calcaire constituant les capillaires dissout du carbonate et il s'ensuit une transformation en sel soluble, le

sulfate de calcium (SO_4Ca). Par temps sec, il se produit un transfert de la solution vers l'extérieur. L'eau s'évapore et les sels solubles se déposent en surface dans les pores. La répétition de ce processus provoque une croûte à la surface de la pierre qui peut contenir jusqu'à 50 % de sulfate de calcium (cas des pierres calcaires poreuses). Cette croûte superficielle appelée **sulfin** peut atteindre une épaisseur variant, selon les natures de calcaire, de 0,2 à 5 mm. Les caractéristiques physiques du sulfin sont différentes de celles du carbonate de calcium qui constitue la roche : le sulfin est plus dense, plus dur que la pierre initiale. Cette croûte réduit la perméabilité à l'eau, ainsi que l'aptitude à l'évaporation car les pores ont été plus ou moins obstrués par le sulfate de calcium. Les modifications des propriétés de cette croûte, par rapport à celles de la roche primitive qui constitue le cœur des éléments, expliquent la décohésion de plaque à la surface des pierres calcaires exposées aux intempéries. La desquamation se manifeste quelquefois par un décollement de plaques d'une épaisseur variable (de quelques dixièmes de millimètre à plusieurs millimètres). En dessous, on constate la pulvérulence des cristaux. L'alvéolisation se présente par une désagrégation de surface sur une épaisseur pouvant atteindre plusieurs millimètres. La partie interne conserve sa cohésion. Sur la même qualité de roche, la vitesse et la profondeur d'érosion ne sont pas uniformes. Des crêtes séparent les sillons ou alvéoles plus ou moins profonds, souvent parallèles au lit de stratification.

Actuellement, plusieurs hypothèses sont proposées par les chercheurs pour expliquer les causes de ces altérations. Les chimistes et les physiciens ont des théories basées sur la cristallisation de sels solubles ou sur la différence des coefficients de dilatation entre le sulfate et le carbonate de calcium (le coefficient du sulfate serait 4 à 6 fois supérieur à celui du carbonate). Mais d'autres phénomènes physiques sont aussi proposés. Si, sous cette croûte relativement étanche, de l'eau est emprisonnée à l'intérieur des capillaires, des surpressions internes peuvent entraîner des micro-ruptures et des décohésions. Pour les biologistes, cette altération est attribuable ou accentuée par le développement de certains types de bactéries.

3.2.3 Action des agents biologiques

La plupart des matériaux pierreux sont contaminés. La biodegradation est plus ou moins importante suivant la constitution des roches et le milieu environnant. Les climats chauds et humides favorisent le développement de ce mécanisme d'altération. Les organismes microscopiques, la croissance des plantes, sont aussi générés par ce milieu. Les biologistes ont identifié les micro-organismes non visibles à l'œil comme les sulfobactéries et les nitrobactéries. Plusieurs spécialistes de l'altération des pierres pensent que les effets des micro-organismes se produisent après la dégradation physico-chimique. Ils estiment en effet que sous une croûte qui s'exfolie, si le milieu est humide et la température adéquate, les bactéries disposent d'un milieu favorable à leur développement.

3.2.4 Action des plantes et des arbres

Les arbres et plantes qui poussent sur les édifices indiquent généralement la présence d'humidité dans les joints ou infractuosités dans les matériaux. Après l'ensemencement, les paramètres de l'environnement favorisant la croissance de ces végétaux sont la lumière, l'oxygène et le gaz carbonique. Les sels minéraux proviennent des matériaux pierreux. En général les racines accentuent la détérioration des maçonneries. La présence de plantes sur les édifices et éléments en pierre témoigne surtout d'un manque d'entretien.

3.2.5 Action des algues et lichens

Les parements sont quelquefois recouverts localement par des algues et des organismes apparentés à celles-ci ; cette constatation est toujours liée à la présence de l'humidité. L'existence de cette végétation est principalement visible dans les soubassements des façades ou dans les zones en contact avec le sol, par suite des remontées d'eau par capillarité. La présence d'algues sur un parement est significative pour localiser rapidement l'humidité sur un élément.

Certaines dégradations sont attribuables aux humidifications et séchages des roches fréquents. Aux emplacements où se développent les algues, les pierres ont une humidité souvent supérieure à la teneur en eau d'équilibre, car la végétation, pour sa croissance, a besoin de l'eau du mur. L'enlèvement de certaines plantes qui poussent sur les murs (vignes vierges, lierre) favorise la présence d'humidité qui contribuait à leur développement. Les lichens (symbiose d'une algue et d'un champignon) ne sont pas compatibles avec la présence de suie et de sulfates, ils n'attaquent pas les constructions en zones urbaines et industrielles. Les organismes biologiques qui sont les plus répandus sur les matériaux pierreux sont les champignons et les algues. Le pollen qui vole dans l'air et qui se dépose sur les surfaces poreuses et humides les rend reconnaissables par leurs couleurs vives, jaune, blanche ou orange. L'action corrosive, en particulier celle du soufre et de l'azote, due aux bactéries de la chimiosynthèse est certaine dans les processus d'altération des pierres calcaires et des marbres. Mais la démonstration que cette cause n'est pas toujours associée au développement des thiobacilles fait encore l'objet de recherches et d'approfondissements. De toute façon il est démontré que, en ce qui concerne le traitement des algues, des mousses et des lichens, l'application de biocides désinfectants est efficace, mais temporaire, contre les bactéries. Les sels d'ammonium quaternaire sont très actifs contre les algues et sont plus stables dans le temps que le formol ou le phénol. Le cuivre et ses composés sulfatés préservent contre les algues. Tous les biocides sont en général solubles dans l'eau. Une solution à 3 % assure une désinfection totale de la pierre. Ces traitements doivent être répétés et terminés par un rinçage abondant. Dans les cas les plus rebelles (algues incrustées dans les cristaux), il est nécessaire de laisser localement la solution concentrée en contact prolongé entre le sujet. Dans les parties ornementales, le procédé a donné d'excellents résultats avec un cataplasme constitué d'une pâte inerte (sépiolite, attapulgite, méthylcellulose).

3.2.6 Corrosion par les métaux

Le fer corrode les matériaux pierreux avec lesquels il est en contact. La corrosion la plus importante s'effectue en milieu acide, mais le phénomène se produit également en milieu alcalin, surtout s'il est favorisé par le chlorure de sodium ou de magnésium. Comme la corrosion du métal provoque un accroissement de volume de 6 à 8 %, les éclatements et fissures sont visibles autour de ces inclusions. Pour éviter cette altération, le fer a quelquefois été entouré de plomb. Le fer en s'oxydant donne naissance à des oxydes hydratés colloïdaux et à des carbonates qui tachent la pierre. Un phénomène de taches analogue peut survenir par l'oxydation d'inclusions naturelles de pyrite, de magnétite, fréquentes dans certaines roches. Dans les pierres calcaires poreuses, l'humidité favorise par capillarité la diffusion de cette coloration dans la masse. Sur les roches siliceuses, les taches sont supprimées temporairement par l'application de solutions d'acide phosphorique, de phosphates, de fluorures ou de citrates. Sur les calcaires et sur les marbres, l'élimination des taches de rouille est plus délicate. Il n'y a pas de méthode sûre et efficace sur toutes les natures de calcaire, suivant la profondeur d'imprégnation. Chaque cas nécessite un essai avec une des solutions suivantes :

- sur les taches superficielles, souvent de couleur jaune-brun, une solution saturée de phosphate d'ammonium $(\text{NH}_4)_3\text{PO}_4$ avec un pH ajusté à 6 par addition d'acide phosphorique est préconisée par

le professeur Lewin (New York). Mais il ne faut laisser agir qu'une durée minimale pour éviter l'attaque du carbonate de calcium ;

- de bons résultats ont été obtenus avec une solution de 1 à 5 % dans l'eau de bifluorure d'ammonium (NH_4HF_2) . La durée d'application doit être surveillée et la protection des vitres doit être assurée.

Le nettoyage des taches vertes de sels de cuivre, provenant par exemple du délavage d'éléments en bronze par la pluie, s'effectue avec de l'acide sulfamique $(\text{NH}_2\text{SO}_3\text{H})$ à 10 % dans l'eau ou avec le carbonate d'ammonium $(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$ à 20 % dans l'eau.

3.2.7 Taches de substances organiques

L'enlèvement des taches superficielles provenant d'huiles, graisses et cires est difficile. Le problème est fréquent sur les revêtements de sol qui ont, pendant longtemps, été entretenus avec des huiles et des cires. La pénétration dans les pierres poreuses et dans les marbres tend à brunir et à tacher. Les huiles siccatives (huile de lin, de noix ou de châtaigne) et les graisses animales sont les plus dangereuses. L'utilisation de solvants basiques, comme la butylamine et le triéthanol, convient pour les huiles et les graisses. Les solvants chlorés comme le trichloréthylène sont plus efficaces pour les cires. La pénétration du solvant en profondeur est améliorée en prolongeant la durée de contact solvant-support. L'utilisation de compresses constituées de matériaux inertes absorbants (pulpe de papier, argile...) est conseillée.

4. Restauration des bâtiments

Dans l'histoire de l'architecture, on voit qu'à toutes les époques on a souhaité conserver les éléments et bâtiments en pierre qui sont des témoignages des civilisations. Au-delà du simple entretien normal, on a voulu protéger les marbres et les pierres utilisés pour les façades qui constituent les parties ornementales ou des éléments constructifs de protection comme les bandeaux, les corniches.

Il est nécessaire, dans le thème de restauration, de différencier deux catégories de problèmes : ceux liés à l'esthétique et ceux liés à la stabilité.

4.1 Aspect des parements en pierre

L'aspect de la surface des parements en pierre confère aux murs des bâtiments une qualité esthétique reconnue. Les roches employées pour réaliser des parements présentent une grande variété de couleurs allant du blanc au noir ou au gris en passant par le crème, le jaune, le brun. Les oxydes de fer inclus dans la structure cristalline des roches donnent naissance à des pigmentations rouges, roses ou brunes. Les grains de cristaux de calcite plus ou moins fins, la présence de coquilles, de particules d'oolithes, d'entrouques de cristallisation plus ou moins complète, sont des facteurs d'appréciation pour le choix d'une roche. L'architecte dispose d'une palette très variée pour personnaliser son projet. Cette diversité d'aspect contribue à rompre la monotonie des parements et à rendre les façades plus vivantes. Les possibilités de variation d'aspect, couleur et grain, de la surface des pierres d'une même carrière et l'évolution dans le temps de la teinte des parements exposés aux intempéries caractérisent ce matériau naturel comme un minéral « vivant ». Cette propriété est le facteur essentiel de choix qui le différencie des produits manufacturés modernes : carrelage, briques apparentes, parement en béton, enduits prêts à l'emploi, peinture, etc. Ces matériaux fabriqués en usine sont plus homogènes, plus uniformes, mais souvent moins durables que les façades en pierre calcaire intégrée dans une architecture conçue en conséquence.

4.1.1 Coloration

La couleur des surfaces des édifices en pierre n'est pas parfaitement uniforme. Ces variations de tonalités proviennent de différents facteurs dont la méconnaissance provoque des litiges, des discussions qui pourraient être évitées si l'explication de quelques phénomènes était connue.

Les différences de couleur qui apparaissent sur les parements en pierre calcaire sont dues aux paramètres suivants :

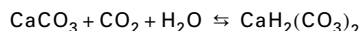
- les modifications de teinte peuvent être temporaires et provenir de l'humidification de la paroi poreuse ou présenter une coloration attribuable à une transformation de la constitution de la surface (efflorescence) ;
- la combinaison des sels transportés par l'eau (pluie fouettante, ruissellement, remontées capillaires, condensation) peut, lors des différentes phases des transformations chimiques, entraîner, dans les cas extrêmes, la destruction par décohésion de la surface des pierres (cristallisation de sels).

4.1.2 Hétérogénéité naturelle des teintes

Les roches sédimentaires sont constituées de dépôts organiques, matières d'origine biologique, débris d'animaux (squelettes, os, dents, écailles, excréments), de végétaux et de cristaux. Ces constituants, plus ou moins cimentés entre eux, composent une micro-structure comportant un volume de vides plus ou moins important favorisant l'accès et la rétention de l'eau. La diversité des fragments de roches, de concrétions, de nodules de fossiles qui forment les roches, explique leurs diverses compositions chimiques, même si le minéral de base est le carbonate de calcium. Les oxydes métalliques sont à l'origine des couleurs jaune, rouge, brune ou verte. Les composés ferriques (Fe_2O_3) qui réagissent chimiquement avec l'eau en présence d'oxygène provoquent ces différences de teinte.

Au cours des millénaires de leur formation, de nombreux phénomènes physico-chimiques ont provoqué des transformations de cette matière.

Les roches carbonatées qui sont peu solubles dans l'eau chargée de CO_2 peuvent se transformer en bicarbonate de calcium très soluble.



Les oxydations transforment les carbonates de fer et de manganèse en oxydes ou en hydrates, les sulfures de fer en sulfates ou en oxydes. Ces transformations chimiques s'accompagnent généralement d'un changement de couleur correspondant au changement d'état du fer.

Le lessivage des couches sédimentaires supérieures provoque la formation d'incrustation, de concrétions ou de cimentation sous l'effet d'une évaporation intense ; des sels remontent en surface et se déposent. Selon leur nature, ils précipitent quelquefois en formant des croûtes, des concrétions, des vernis.

4.1.3 Influence de la pluie sur la coloration

L'action de l'eau atmosphérique sur les parements dépend de plusieurs facteurs : sa composition chimique, sa durée de contact, sa quantité (concentration par unité de surface), etc.

La pluie fouettante, le ruissellement, le rejaillissement, l'infiltration par les joints, la condensation, etc., auront des effets spécifiques selon la vitesse d'absorption capillaire (fonction de la rugosité de la paroi, de la dimension des capillaires et de leur interconnexion).

La nature des minéraux et leur dimension sont les facteurs essentiels qui gouvernent leur transformation en présence d'eau plus ou moins chargée de sels de provenances diverses.

La profondeur de pénétration de la frange capillaire, sa durée de maintien dans les pores (pouvoir de rétention de la structure poreuse) avant l'évaporation, sont les paramètres qui favorisent ces combinaisons physico-chimiques [dissolution de la calcite ou des matières humiques, réactions chimiques, évaporation de l'eau, dépôt en surface dans les capillaires des produits de la combinaison chimique, coloration de ces dépôts au contact des composants de l'air (oxygène, CO_2 , SO_2 , etc.)]. L'orientation des façades est essentielle pour favoriser ces réactions, car la vitesse dépend de l'exposition aux vents, à la pluie et à l'ensoleillement.

4.1.4 Influence de l'eau atmosphérique

L'eau de pluie chargée de gaz carbonique en dissolution se combine avec le carbonate de calcium. L'eau de pluie chargée de sels, après la combinaison, s'évapore en abandonnant dans les orifices des pores le produit de cette réaction (sulfate et carbonate). La poursuite du phénomène donne naissance à une couche superficielle plus dure, plus compacte. Les capillaires débouchant en surface se garnissent du produit de cette transformation, l'obstruction des capillaires n'est que partielle. La perméabilité à l'eau est réduite, mais la diffusion de la vapeur n'est pas complètement empêchée : la pierre respire. Cette couche naturelle superficielle appelée calcin (si l'eau de pluie n'est pas chargée de SO_2 et de SO_3) a toujours été considérée comme bénéfique pour la conservation de la pierre. Sa nature minéralogique est identique à celle de la pierre, l'eau incluse peut sortir sous forme de vapeur, et la pénétration de l'eau est freinée.

Mais ce phénomène est différent si les transferts de l'eau dans la pierre ne s'accomplissent pas, par les mouvements aller-retour, en particulier si l'eau circule à sens unique et ressort, par exemple, par une autre face. On constate ce cas néfaste à la bonne conservation sous une pierre trop poreuse employée comme saillie horizontale (corniche, bandeau) placée sur une façade exposée aux intempéries. L'eau qui atteint le parement horizontal de la face supérieure pénètre en profondeur par gravité et capillarité. Quand le temps redevient sec, l'eau, pour ressortir, parcourt la distance la plus courte ou la plus facile à atteindre : principalement le dessous de cette dalle en saillie. En s'évaporant, cette eau en solution dépose les produits des réactions chimiques, des concrétions se forment sur la face de sortie. Dans l'environnement soumis à la pollution, ces concrétions noires contiennent des cristaux de sels divers (sulfates, nitrates, etc.). Par cristallisation, ces croûtes gonflent et éclatent. Au lieu d'une couche protectrice, une croûte de sels expansifs s'est formée. Peu à peu, l'exfoliation et la décohésion amorcent la dégradation. La surface de la pierre s'effrite et se désagrège sous forme d'alvéolisation, de plaques, de fissures ou de crevasses (figure 11).

4.2 Nettoyage

4.2.1 Généralités

Cette opération, apparemment facile, est assez délicate et peut entraîner des effets quelquefois irréversibles (endommagement du parement). Les nombreux problèmes que l'opération de nettoyage peut provoquer conduisent, par expérience, à montrer que ce travail nécessite d'être abordé avec précautions en prenant en compte le maximum d'informations pour obtenir les résultats optimaux garantissant la conservation de la pierre.

Les principes généraux à fixer sont les suivants.

Le processus technique du nettoyage doit être contrôlable dans toutes ses phases. Il doit être gradué et sélectif (l'élimination de la matière sur le parement doit détruire surtout les incrustations et les salissures). Les réactions chimiques secondaires doivent être évitées, elles sont dangereuses pour l'aspect ou la conservation de la pierre (sels solubles). La méthode utilisée ne doit être ni brutale,



Figure 11 – Dégradation de la pierre par l'eau atmosphérique

ni provoquer d'abrasion importante, ni microfractures qui accélèrent les dégradations par meurtrissures ou accroissement de la porosité de la pierre (en rendant la surface plus rugueuse).

Pour des raisons économiques, on est conduit à distinguer deux catégories d'éléments à nettoyer auxquels les prescriptions citées ci-après devront être appliquées avec une rigueur adaptée.

Pour les grandes surfaces d'immeubles sans valeur historique, les techniques employées l'étant à vaste échelle auront un caractère plus industriel. Elles ne devront pas être néfastes à la conservation de la pierre tout en restant économiques.

L'obtention d'une surface plane, sans salissure, ne nécessite pas toujours les mêmes précautions que sur les parties ornementales sculptées, dont il est indispensable de conserver la totalité des détails de la pierre ciselée.

Il n'est pas possible, sans examiner de très près l'état de la surface de la pierre, de fixer *a priori* la technique à employer ; aussi, dans l'exposé ci-après, des généralités sur les méthodes et produits de traitement seront présentées. En ce qui concerne les techniques et produits dangereux, des règles précises seront données.

En se basant sur une longue pratique, il faut savoir qu'un essai de chaque technique proposée sur un petit échantillon de façade à nettoyer n'a jamais donné lieu à des contestations après coup. L'appréciation d'une surface convenablement propre est très subjective, car plusieurs paramètres influent sur le jugement : l'éclairage, la nature du support, la nature et l'adhérence des salissures, l'aspect de l'environnement. Cette méthodologie a toujours permis de servir de guide le plus sûr ; ainsi, tous les intervenants sont conscients des modalités et des résultats à obtenir.

Suivant l'importance de l'élément à nettoyer, la question est souvent posée de savoir jusqu'où pousser l'opération pour obtenir un matériau suffisamment propre. D'une part on ne doit laisser aucun résidu de dépôts ou de croûtes noires actives, d'autre part on ne doit pas décharner complètement la surface. La limite du fini du nettoyage fait l'objet d'une appréciation délicate. Souvent, les surfaces de pierres longtemps recouvertes de salissures n'apparaissent pas claires et blanches après nettoyage. Le ton original de la pierre fraîchement taillée ne peut être obtenu qu'en utilisant la technique de la retaille qui consiste à supprimer quelques millimètres de pierre sur le parement exposé. Autrement, une coloration légèrement ocre peut subsister. Il s'agit de la patine qui se produit dans le temps, dès qu'une pierre neuve est exposée à l'air.

Nota : la patine résulte de la dissolution des pigments par l'eau atmosphérique, de la réaction chimique due à la combinaison de cette solution avec les minéraux et les débris organiques.

La coloration peut être beige, jaune ou grise, et même quelquefois rougeâtre. Ce changement de teinte provient de l'oxydation de certains cristaux (pyrite, etc.) qui, au contact de l'eau et de l'oxygène de l'air, se modifient. La pénétration de l'humidité provoque la dissolution des matières humiques. Lors de l'évaporation, leur dépôt en surface provoque une oxydation qui cause la coloration. Habituellement, après l'assèchement, un brossage à sec suffit pour faire disparaître ce résidu. Ce phénomène a été fréquent lors des premiers nettoyages par ruissellement d'eau, de longue durée (72 h), sur plusieurs édifices et monuments de Paris. Ce problème a été étudié en laboratoire. La recherche du constituant spécifique ayant provoqué la coloration est très difficile à mettre en évidence par les analyses chimiques classiques, car il s'agit de la chimie des traces. Il suffit d'une partie de matières colorantes pour 10 000 pour provoquer une coloration de surface visible.

4.2.2 Techniques de nettoyage

Il existe cinq procédés principaux de nettoyage (cf. article *Travaux de peinture* [C 3 690] dans ce traité) :

- mécanique ;
- hydropneumatique ;
- à l'eau (froide, chaude ou sous forme de vapeur) ;
- par application de produits chimiques ;
- par microsablage.

L'expérience résultant du ravalement des bâtiments de Paris nous a conduit à constater les avantages, les inconvénients et les limites de chacun de ces procédés.

Suivant la nature des pierres (dureté, surface tendre, surface grenue, etc.), l'état de sulfatation, la forme de la surface (plane ou sculptée), la nature des salissures, une technique est préférable à l'autre.

4.2.2.1 Nettoyage mécanique

Le ragréage à vif ou retailé s'obtient à l'aide d'une ponceuse à disque, au ciseau, à la boucharde ou au chemin de fer. On enlève une certaine épaisseur de pierre à partir du parement. Dessous, on retrouve le calcaire à l'état neuf, tel qu'il était avant son exposition aux intempéries et à la pollution. Cette opération de retaille de la pierre a été réalisée par des spécialistes (ouvriers tailleurs de pierre) sur certaines façades de Paris avec d'excellents résultats esthétiques. Bien entendu, il ne s'agissait pas d'édifices historiques pour lesquels l'éthique, en France et dans quelques pays étrangers, implique de conserver l'authenticité du parement antérieur (lisibilité de l'œuvre). Après ce traitement, les effets de la pollution (croûtes de sulfite) sont enlevés, et un parement propre et sain remis à l'état neuf initial a été obtenu. La patine de la pierre est enlevée. Mais si aucun traitement de protection de surface n'est appliqué, les effets de la pollution et des salissures se reproduiront. La vitesse d'évolution des transformations sera plus rapide que si la croûte de calcaire ou de sulfite avait été conservée. Sur une surface en pierre très dégradée ou recouverte d'une peinture, cette méthode peut être acceptable. La pierre redevient apparente comme à sa sortie de carrière. Cette opération permet également d'améliorer les points faibles résultant de

la réalisation initiale : mise en place de bavette de recouvrement des pierres en saillie dont la qualité (trop poreuse) s'était avérée insuffisante, réfection des joints, suppression des pièces métalliques corrodées, remplacement des pierres très altérées par des roches saines de qualité supérieure appropriée à ces conditions d'expositions.

Au point de vue esthétique et technique, cette méthode de ravalement est très utile, mais le caractère historique et le respect de l'œuvre de sculpture de l'artiste ont complètement été négligés.

4.2.2.2 Sablage hydropneumatique

Ce procédé consiste à projeter du sable fin siliceux ou des grains abrasifs avec de l'eau sous pression sur la façade. La nature, la masse volumique, la forme et la granulométrie des particules solides projetées sont très importantes pour l'efficacité.

Les sables siliceux calibrés et tamisés, la silice, l'alumine, le corindon, l'olivine (silicate de fer et de magnésium) sont les plus utilisés. Les particules, de granulométrie très fine, assurent le meilleur nettoyage pour enlever les croûtes noires très incrustées dans les capillaires des roches éveillées. Mais les paramètres les plus importants sont la pression du jet, la distance au parement et la durée d'application. L'expérience a montré, sur plusieurs immeubles de Paris en pierre tendre, que la **pression de l'air comprimé ne devrait pas excéder 0,3 MPa** (3 kg/cm²). L'expérience et la dextérité du technicien chargé de l'opération sont fondamentales. Cette technique implique une grande conscience professionnelle de l'opérateur, autrement la rectitude des arêtes, les moulures, la planéité ne sont pas respectées. Dans tous les cas, cette méthode de nettoyage enlève par abrasion une certaine épaisseur, sinon la totalité du calcin.

Le sablage par voie sèche est dangereux pour l'opérateur et pour le public, par suite du dégagement de poussières et de particules pouvant provoquer la silicose.

Les avantages du sablage hydropneumatique sur le sablage à sec sont nombreux : l'action abrasive est adoucie par l'eau ; celle-ci, par son action dissolvante, favorise l'enlèvement des sels solubles et des croûtes noires.

4.2.2.3 Microsablage

Ce procédé consiste à projeter à sec sous pression une poudre très fine. Initialement, ce procédé inventé par Thomann-Henry consistait à travailler dans une nacelle équipée d'aspirateurs à poussières, et les opérateurs étaient protégés par des masques et revêtus de scaphandres adaptés.

Le microsablage s'effectue avec des appareils fonctionnant soit à l'air, soit à l'azote, capables de diriger le jet abrasif avec précision sur des croûtes noires ou sur des motifs finement sculptés. Le dispositif comporte un pistolet ou un crayon muni d'une buse à très petite ouverture. L'abrasif est constitué de billes de verre ou d'alumine de 40 µm de diamètre. La finesse de ces poudres nécessite la pulvérisation simultanée d'azote ou d'air déshydraté pour empêcher l'agglomération des grains abrasifs.

La pression du jet est finement réglable et ainsi applicable à différents types de pierres, même dégradées après les avoir consolidées.

Cette technique ne permet pas de purger la pierre en profondeur. Dans une première phase, la finesse de ce procédé a surtout été développée pour les monuments historiques, et ne permettait que de nettoyer quelques dizaines de cm² à l'heure ; il était particulièrement conseillé pour les statues et les sculptures.

Mais, depuis quelques années, son application aux immeubles a montré beaucoup d'avantages. Son utilisation ne nécessite pas d'échafaudage (dont le coût représente souvent 30 % du montant des travaux de ravalement). La technique est propre et souvent assez efficace. Elle s'impose dans le cas de mur de faible épaisseur ou dont la pierre est très tendre.

Dans certains cas, le procédé est rapide ; il existe des exemples de façade courante d'immeubles ravalés en deux ou trois jours.

Cependant, comme toutes les techniques, il faut signaler ses limites. Le travail depuis l'intérieur de la nacelle n'est pas contrôlable en permanence. L'examen de l'état de l'ensemble de la façade, au fur et à mesure, est difficile et empêche l'architecte de définir les travaux complémentaires de restauration à réaliser : réfection des joints, changement de pierre, élimination de la corrosion de parties métalliques. Pour toutes ces réparations, il est indispensable qu'un échafaudage de pied soit élevé le long de la façade.

Un exemple récent de nettoyage de concrétions noires sur la façade de l'Arc de Triomphe (figure 12) a montré l'intérêt de cette technique. Deux essais effectués avec une buse de 2 mm de diamètre, l'un avec de la microfine de verrerie, de grains inférieurs à 30 µm, et l'autre avec de la poudre d'alumine de grains inférieurs à 27 µm, ont donné d'excellents résultats. Les concrétions ont été totalement éliminées, sans aucune attaque de la pierre qui avait conservé sa patine initiale (sous la couche de salissure) ; la teinte apparaît plus foncée (patine) sous les concrétions. On note aussi la nécessité de réfection des joints dégradés.

Par contre, un échec a été rencontré pour enlever des taches provoquées après l'application d'un produit anti-pigeon (à base d'huiles et de silicones). Ces taches se présentent sous forme d'un léger dépôt noirâtre uniformément réparti.

Une seule technique a permis d'enlever les taches dues à l'infiltration de l'huile et de silicone : il s'agit d'un décapant à peinture, formé d'un gel à base de chlorure de méthylène. Après un rinçage final à l'eau, la totalité des taches grasses ont été éliminées, sans aucune altération de la surface de la pierre (le chlorure de méthylène ne réagit pas sur le calcaire).

4.2.2.4 Procédés chimiques

Les produits chimiques utilisables sans danger pour le nettoyage des pierres calcaires sont peu nombreux. L'expérience que nous avons acquise lors du nettoyage des bâtiments et des monuments de Paris montre que la mise en œuvre de réactions chimiques pour l'enlèvement des salissures doit être effectuée après beaucoup de discernement.

Il est indispensable de s'assurer qu'aucune réaction chimique ne s'effectue avec le carbonate de calcium.

Certains **produits dangereux** doivent être **proscrits** : la potasse, la lessive Saint-Marc, l'hydrate de soude, l'acide chlorhydrique (acide muriatique). L'utilisation des **acides** est tentante et s'explique par la vitesse d'action que l'on obtient pour enlever les croûtes noires. Mais l'action n'est pas sélective et elle est difficilement contrôlable. La réaction ne s'arrête pas facilement ; même le lavage et le brossage immédiat ne permettent d'éviter que l'acide appliqué ne pénètre en profondeur par capillarité.

Même les **produits alcalins**, qui doivent être neutralisés dans les minutes et les heures qui suivent, ont présenté des cas pathologiques. Dans les cas les moins graves, des taches (de colorations diverses : blanches, jaunâtres) et des efflorescences apparaissent. Dans les cas extrêmes, l'utilisation de produits à base de soude ou de potasse provoque, par cristallisation des sels, l'éclatement des pierres calcaires (figure 13).

Dès que la loi sur le nettoyage des façades a été promulguée en 1960, sous l'impulsion du ministre de la Culture (André Malraux) à Paris, l'absence de recherches sur le sujet a permis le développement de l'emploi de **produits à base de bifluorures** (de sodium et d'ammonium), qui se décomposent dans l'eau pour donner de l'acide fluorhydrique, et ne réagissent pas avec le carbonate de calcium. Plusieurs applications ont montré que les précautions essentielles pour l'emploi de ces produits étaient les suivantes :

- protéger les surfaces vitrées, car le bifluorure attaque chimiquement le verre (dépolissage) ;
- ne pas dépasser la durée de contact préconisée par le fournisseur ;
- effectuer immédiatement un rinçage abondant à l'eau.

Les **détergents** classiques sont à utiliser avec précaution, même si l'emploi de certains est théoriquement favorable, quand leur rôle est de diminuer la tension superficielle de l'eau en mouillant mieux la croûte noire pour favoriser son ramollissement.

Les détergents se classent en trois catégories :

- les tensioactifs dérivés des amines, qui ont un double rôle : accroissement du pouvoir absorbant et action désinfectante, sans aucun effet sur les salissures ;
- les tensioactifs à base de sulfonates alcalins, qui réagissent avec le carbonate de calcium, mais sans action dissolvante sur les croûtes de salissures. Ces produits risquent de former des sels solubles générateurs d'efflorescences ;
- les tensioactifs dérivés de l'oxyde d'éthylène, qui ne présentent pas d'inconvénients si leurs résidus sont totalement enlevés par lavage et brossage.

4.2.2.5 Nettoyage à l'eau

4.2.2.5.1 Ruissellement et projection basse pression

Cette technique consiste à faire ruisseler de l'eau au moyen de rampes d'arrosage posées dans la partie haute de la surface à nettoyer. Le film d'eau a pour but d'amollir et d'entraîner les salissures. Ce nettoyage doit être accompagné d'un brossage supplémentaire pour accroître le décollement de certaines salissures faiblement fixées ainsi que de certains sels solubles. Les principaux inconvénients de cette technique sont l'importante consommation d'eau et surtout l'infiltration d'eau par capillarité dans les murs en pierre poreuse. La durée de contact de l'eau (très importante) avec la surface de la pierre (plusieurs dizaines d'heures) favorise la pénétration en profondeur, dans l'épaisseur du mur. Ainsi, dans un mur de 0,40 m d'épaisseur, en pierre tendre poreuse, en quelques heures la frange d'humidité atteint le parement intérieur. Des dommages importants peuvent en résulter sur les enduits, les tentures tels que des taches, des moisissures, la croissance d'algues et de champignons.

De plus, en hiver, l'importante quantité d'eau envoyée pendant une longue durée peut permettre d'atteindre la teneur en eau critique qui, en cas d'abaissement de la température, entraîne des dégradations par le gel (§ 3.1.2).

4.2.2.5.2 Projection d'eau sous pression

Cette technique consiste à ramollir des salissures en les détrempeant par mouillage puis, à l'aide d'un jet sous pression, à les éliminer. Des compresseurs permettent de mettre de l'eau sous pression qui est projetée par des lances munies de buses de dimensions réglables. Les pressions peuvent atteindre des valeurs élevées, de 50 à 200 bar. Cette méthode peut être proposée pour les pierres dures

et saines. Toutefois, elle est très souple d'emploi et permet, en fonction de la nature du matériau et de son encrassement, à un ouvrier qualifié et consciencieux de moduler la pression, le débit, la distance et la durée de projection pour obtenir un excellent résultat sans abîmer l'épiderme. Les risques d'infiltrations par les joints et les fissures sont importants, cependant la plus faible durée de projection d'eau permet d'éviter une aussi grande pénétration d'eau par capillarité qu'avec la technique de ruissellement.

La pulvérisation dure 2 à 3 h pour amollir, puis l'enlèvement s'effectue avec une pression qui doit être minimale pour ne pas détruire la couche superficielle de la pierre. Par exemple, sur de la pierre tendre, après 2 h de ruissellement, les salissures sont presque totalement enlevées (figure 12). Sur les pierres calcaires tendres, une faible pression, de l'ordre de 5 bar, peut être recommandée, tandis que sur une pierre dure plus compacte une pression de 70 bar peut être nécessaire.

L'utilisation d'eau chaude à 80 °C permet d'éliminer les graisses adhérentes, la durée du détrempeage et la consommation sont réduites.

La méthode de projection d'eau surchauffée sous pression peut être préjudiciable à l'épiderme des pierres calcaires tendres si la température de l'eau en phase liquide atteint 140 °C et que la pression est de l'ordre de 80 bar.



Figure 12 – Nettoyage par microsablage

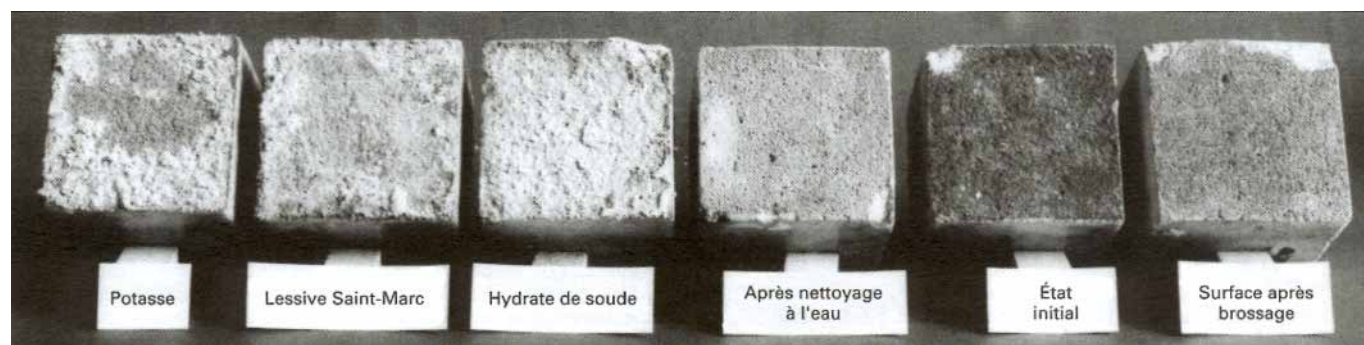


Figure 13 – Produits dangereux pour les calcaires

4.2.2.6 Autres méthodes

Pour les objets d'art en pierre, d'autres méthodes de nettoyage sont employées depuis ces dernières années : les ultrasons, la flamme et surtout le laser qui est très performant pour les façades ornées de sculptures de grande valeur.

■ L'enlèvement des croûtes par utilisation des **ultrasons** s'effectue par la transmission d'une succession de petites vibrations à la croûte noire. Un émetteur en forme de petite spatule agit à travers un film d'eau et permet, en effleurant la croûte, sans la toucher, d'ébranler et de décoller cette croûte. L'eau transmet les vibrations et entraîne le détachement. À cause de sa lenteur, ce procédé reste réservé aux objets en pierre de petites dimensions.

■ La méthode de **nettoyage à la flamme** a parfois été utilisée pour brûler le carbone présent dans la croûte noire et pour la détacher par différence de conductivité thermique avec la pierre saine. Il faut signaler que cette technique peut être dangereuse et provoquer des éclatements, surtout si l'échauffement est brusque (choc thermique) et si la pierre poreuse est humide (dilatation brusque de l'eau dans les pores).

■ Le principe du **nettoyage au laser** consiste à diriger un faisceau laser sur la salissure, au niveau de laquelle la lumière est absorbée et la croûte vaporisée par absorption à haute énergie, alors que la partie de pierre saine est blanche, n'absorbant pas la lumière, n'est pas attaquée.

Les radiations sont absorbées par la croûte noire qui, portée pendant un temps très bref à une haute température (4 000 à 5 000 K), brûle ou se pulvérise. Les instruments utilisés sont extrêmement souples, permettent de doser le nettoyage et sa vitesse d'action. On peut nettoyer jusqu'à 1 cm² de surface par seconde, mais en pratique, on utilise une impulsion toutes les 3 à 4 s.

4.3 Tachabilité et détachage

Les pierres marbrières et les marbres se tachent plus ou moins facilement sous l'effet de différents produits ou matériaux qui sont soumis à leur contact. Ces taches proviennent aussi bien des matériaux de construction (sable, ciment, eau de gâchage) que des projections accidentelles ou des produits détergers utilisés pour l'entretien. Une recherche expérimentale effectuée au CEBTP en 1982 sur plusieurs natures de pierre a permis de dégager les principales conclusions suivantes.

4.3.1 Tachabilité par les liants hydrauliques

Souvent, des efflorescences blanches apparaissent à la surface des pierres après la pose. Les sels solubles dans le mortier de pose, entraînés par l'eau de gâchage, remontent par capillarité par les joints ou par les dalles de faible épaisseur. Après l'évaporation de l'eau, il se produit des taches blanches en surface, le phénomène se renouvelle tant qu'il subsiste de l'eau à l'intérieur du complexe pierre-mortier.

Il a été mis en évidence que les ciments ordinaires contiennent des oxydes alcalins solubles (sodium et potassium), et que certaines roches calcaires sont particulièrement sensibles à cette réaction. Si le choix de la qualité du ciment est possible, il est recommandé d'utiliser des liants hydrauliques à haute teneur en silice (HTS) ou un ciment qui répond aux prescriptions américaines (ASTM C 150) relatives au *Cement low Alkali*. Mais le ciment n'est pas toujours le seul responsable ; certains sables, certaines natures de roches contiennent des sels ou des matières humiques d'origine qui peuvent être la cause des taches, soit seuls soit en se combinant.

Au préalable l'expérience a montré qu'un test simple peut mettre ce phénomène en évidence. Il consiste à réaliser un essai de capillarité sur un prisme de pierre dont la base est scellée dans un petit

socle réalisé avec le mortier de pose. Après séchage du mortier, ce petit bloc est immergé dans 2 à 5 mm d'eau distillée. Dans un local sec et chauffé, l'eau monte par capillarité et après 10 à 15 jours, selon la porosité des roches, la frange d'humidité atteint plusieurs millimètres. Dans la zone d'évaporation, les matières humiques ou les sels éventuels se déposent en surface et la coloration (taches, efflorescences) apparaît. Le même essai doit être réalisé en même temps sur une éprouvette de pierre seule (sans socle de mortier) pour comparaison.

■ Enlèvement des taches provenant de ce phénomène

Il convient d'attendre que la quasi-totalité de l'eau libre incluse dans le mortier ou dans la dalle soit évaporée. La durée peut être de plusieurs semaines, voire plusieurs mois. *A priori*, ce délai est indéterminé, il est fonction de plusieurs paramètres : température, hygrométrie de l'air, conditions de ventilation, teneur en eau initiale, nature et épaisseur des dalles. Après ce délai, dans la plupart des cas, ces colorations s'enlèvent par brossage à sec. Cependant, pour certaines roches (poreuses et grenues), certains sels sont incrustés. La mise en place d'un cataplasme de poudre absorbante (terre de Sommières, sépiolite, poudre de marbre blanc de St-Béat) permet l'extraction de certains éléments colorants.

4.3.2 Nettoyage de différentes taches accidentelles

L'imprégnation dans la masse de la pierre de certains produits colorants peut être tellement profonde que seuls des procédés d'abrasions énergiques (ponçage, sablage) sont efficaces. L'utilisation de produits chimiques est rarement conseillée sans essais préalables, afin d'en vérifier l'efficacité et de constater l'absence de réactions secondaires (attaque de la pierre, dépolissage, colorations, efflorescences, etc.).

4.3.2.1 Nettoyage des taches de rouille

L'opération comprend deux phases : l'extraction des sels et le traitement à l'acide.

Première phase : étendre une solution d'hydrogénodifluorure d'ammonium à saturation et, après une certaine durée de contact, éponger avec un papier absorbant d'ouate de cellulose. L'opération est renouvelée jusqu'à obtention d'une amélioration acceptable. Après un rinçage à l'eau claire, l'application d'un emplâtre avec une poudre absorbante (attapulgit, sépiolite, terre de Sommières, etc.), le résultat est en général satisfaisant.

Deuxième phase : appliquer une solution d'hydrogénodifluorure d'ammonium mélangée avec 10 % d'acide fluorhydrique.

4.3.2.2 Nettoyage des taches d'huile

L'utilisation des poudres absorbantes est le moyen le plus efficace pour éliminer les taches d'huile, en particulier si l'action est immédiate. Une intervention très rapide, dans les minutes qui suivent, a toutes les chances de succès, avec application d'un emplâtre solvanté au white spirit. Certains marbres blancs de porosité inférieure à 3 % sont très difficilement récupérables si l'huile imprègne depuis plusieurs jours les interstices très fins entre les cristaux. Dès l'apparition du sinistre, il est conseillé d'appliquer un détachant sous forme d'aérosol ainsi que de la poudre solvantée au trichloréthylène.

4.3.2.3 Nettoyage des taches de boissons alcoolisées

Le nettoyage est assez facile avec une solution d'eau de Javel ou du savon noir liquide. L'étude expérimentale du CEBTP qui a donné ces résultats a été effectuée sur 7 natures de pierres calcaires depuis les pierres assez tendres (porosité 21 %) jusqu'aux pierres marbrières peu poreuses (marbre blanc de Carrare, porosité 0,6 %).

4.3.2.4 Nettoyage du tannin

Des taches sur les sols sont quelquefois provoquées par de l'acide tannique contenu dans le bois ou dans certains dérivés cellulotiques utilisés généralement après la pose des dallages. Le nettoyage de ceux-ci, après le coulage des joints à la barbotine de ciment, s'effectue par le répandage de sciure de bois qui a pour rôle d'absorber l'humidité de surface, imprégnant le coulis en surplus, qui autrement resterait adhérent à la surface des dallages. On a constaté, dans plusieurs sinistres, que la sciure du bois de chêne est à proscrire, car en présence d'humidité elle provoque ces taches marron. La sciure de bois blanc ou la filasse permettent d'effectuer sans inconvénient l'enlèvement de la barbotine en surface.

La suppression des taches de tannin, après une intervention rapide, a été très efficace avec de l'eau oxygénée à 110 volumes ou avec de l'eau de Javel à 48 °Be. Pour les taches anciennes, il faut avoir recours à un emplâtre réalisé avec du blanc de Meudon ou du blanc d'Espagne, mélangé à l'acétone et répandu sur une épaisseur de 5 mm sur la surface. Toutes les 10 min, l'acétone est à renouveler à cause de son évaporation rapide.

4.3.2.5 Nettoyage des graffitis de peinture

Les meilleurs résultats sont obtenus avec des produits décapants de peinture du commerce à base de chlorure de méthylène ou de dichlorométhane.

Les résultats sont fonction des natures des roches (porosité) et de la composition de la peinture. Les peintures glycérophatiques solvantées à l'acétone sont très difficile à enlever.

Les peintures aérosols laquées sont enlevées avec les solvants courants du commerce, ou certaines lessives ou nettoyants ménagers. Sur certains marbres, les graffitis réalisés avec du minium de plomb sont pratiquement indélébiles avec des solvants : seule l'abrasion par microsablage léger reste la solution.

4.3.2.6 Conclusions concernant la suppression des taches

Les mécanismes de l'origine de certaines taches et les phénomènes dont ils résultent sont encore mal connus. Aussi, en attendant une connaissance théorique plus complète, on est obligé de se contenter de recettes découlant d'essais technologiques. Les actions de détachage s'effectuent en deux phases :

- la décohésion pour la séparation du subjectile ;
- l'élimination des résidus du traitement effectué sur la tache.

L'analyse a montré que la première phase résulte de deux réactions chimiques :

- désorption de l'agent tachant ;
- neutralisation (pour le dissoudre) de l'élément tachant ou oxydo-réduction (pour le décolorer).

La deuxième étape comprend la dilution des résidus d'agents tachants par rinçage, activée par érosion mécanique (brossage et essuyage).

En première approche, cette analyse montre que les taches sont initialement traitées par adsorption ou absorption, voire diffusion, dans une certaine épaisseur. Le phénomène est lié à l'adhérence.

Dans les autres cas, la tache résulte d'un colorant qui est absorbé ou adsorbé entre les cristaux des minéraux.

Comme dans tous les problèmes ou l'adhérence et l'absorption sont les facteurs principaux du mécanisme, la rapidité d'intervention favorise dans la plupart des cas les chances de réussite.

4.4 Protection des surfaces

4.4.1 Rôle des hydrofuges

De tout temps on a cherché à protéger la surface des pierres exposées à l'extérieur. Les progrès effectués par la chimie des produits de synthèse ont favorisé le développement des composés orga-

niques du silicium comme produits hydrofuges n'ayant aucune influence sur l'aspect. Au point de vue théorique, l'imperméabilisation résulte de la réduction des forces d'attraction superficielles. L'eau pure, douée d'une tension superficielle élevée ($72,8 \times 10^{-3}$ N/m à 20 °C), adhère à la surface des pierres, cette humidité favorise l'altération et l'encrassement des façades. L'application sur le parement d'un réseau moléculaire à groupement hydrophobe réduit la tension superficielle des parois à des valeurs de 11×10^{-3} à 24×10^{-3} N/m. L'angle de contact des gouttes empêche leur accrochage sur un mur vertical. On observe l'effet « perlant », les gouttes d'eau sous forme de billes s'écoulent par gravité sans rester fixées à la surface des pores et capillaires.

4.4.2 Avantages des traitements d'hydrofugation

En plus de la conservation de l'état de propreté de la façade, un meilleur autolavage est obtenu, ce qui réduit les risques de pénétration de l'eau par capillarité. Cette eau provoque la dégradation des parements intérieurs (moisissures, efflorescences) et une réduction du confort d'habitation (hygrométrie de l'air trop élevée). Les traitements hydrofuges efficaces augmentent la durabilité des matériaux en réduisant les risques de migration de sels (entraînés par l'eau), les effets du gel, la corrosion des armatures oxydables placées trop près des parements extérieurs, le développement des algues, des mousses et des lichens.

Comme la différence de conductivité thermique entre un matériau poreux sec et un matériau poreux humide peut atteindre 25 %, dans le cas des maçonneries en pierres poreuses et capillaires l'hydrofugation efficace favorise l'isolation thermique.

Les qualités essentielles qui sont exigées de ces produits imperméabilisants sont les suivantes :

- être transparents, ne pas modifier les propriétés esthétiques ;
- être imperméables à l'eau en phase liquide ;
- être perméables à la vapeur d'eau (ne pas empêcher la diffusion) ;
- être stables aux agents polluants de l'atmosphère ;
- être stables aux radiations UV ;
- être résistants dans le temps à l'érosion (pluie et vent).

4.4.3 Choix et limites d'utilisation

Les hydrofuges répondant à tous ces critères sont pratiquement introuvables. L'aspect parfaitement mat est difficile à obtenir. Un très bon pouvoir d'imperméabilisation à l'eau s'accompagne toujours d'une réduction de la diffusion de la vapeur.

La sélection des meilleurs produits nécessite un choix qui résulte d'un compromis. Mais il faut savoir que cette sélection est difficile, car le comportement des hydrofuges est différent suivant la texture des supports. D'importantes recherches effectuées au CEBTP sur des maquettes en vraie grandeur, exposées aux intempéries depuis plusieurs années, ont donné des informations fondamentales sur ce sujet.

Il a été mis en évidence que le traitement avec des produits hydrofuges sur certains murs en pierre à pores fins était dangereux pour la durabilité. Le même produit peut être efficace et non nocif sur une pierre poreuse constituée de pores gros (Saint-Vaast) ; par contre, sur une pierre à pores fins, le film trop étanche, par suite de la réduction de l'évaporation, est dangereux car il provoque après 5 à 6 ans la maladie de la pierre par croûtes exfoliantes. L'analyse de ce cas pathologique a mis en évidence qu'une maçonnerie en pierre poreuse est toujours susceptible de renfermer de l'eau qui provient soit de pénétrations intempéries (défauts de colmatage des joints), soit de condensation de la vapeur d'eau interne. Sous l'effet de différentes conditions atmosphériques, la vapeur d'eau en phase liquide aura tendance à se déplacer dans le réseau capillaire. Le frein partiel ou total, empêchant la sortie de l'eau ou de la vapeur, crée à l'intérieur des pores un accroissement de pression hydraulique. Sous l'effet de cette poussée interne vers l'extérieur, l'épiderme de

la pierre est soumise à des tensions. Celles-ci sont d'autant plus importantes que la surface de la pierre a été traitée avec un hydrofuge filmogène à forte concentration en matières actives. Cette explication permet de comprendre les raisons de l'altération de surface d'une pierre poreuse à pores très fins (le tuffeau de Touraine) avec un hydrofuge rendant la surface trop étanche à la diffusion de la vapeur d'eau. Il est utile de signaler que ces expériences systématiques ont montré qu'après le même laps de temps, les parties de murs constituées avec la même pierre mais non traitées sont restées saines mais se sont salies. Par ailleurs, sur les murs en pierre de Saint-Vaast (à gros pores), le même traitement n'a occasionné aucune dégradation.

4.4.4 Conditions d'application d'un traitement hydrofuge

L'application d'un hydrofuge de surface ne résout pas tous les problèmes de dégradation des parements exposés à la pollution et aux intempéries. Après le nettoyage, les parties friables sans cohésion doivent être supprimées, c'est-à-dire que le support doit subir une préparation résultant d'un examen minutieux.

4.4.5 Préparation d'un support en pierre avant hydrofugation

Si le support comporte des fissures, des vides susceptibles de faciliter la pénétration de l'eau, l'obstruction de ces orifices et discontinuités doit être effectuée. Un hydrofuge de surface, transparent, ne peut pas assurer un pontage sur un vide de plus de 1 mm de large.

4.4.6 Limites d'emploi des produits hydrofuges

À l'extérieur, les produits hydrofuges ne sont pas conseillés en partie horizontale car dans ce cas ils ne sont pas durables.

Par exemple (figure 14), sur une corniche constituée de pierres trop poreuses, l'eau finira par s'infiltrer et, par perméabilité, percolera dans l'épaisseur. Les pressions importantes dues à l'eau dans les pores s'exerceront sur le parement inférieur. La peau de la pierre finira par se cloquer et se détacher. Dans le cas de l'emploi en élément horizontal de pierres trop poreuses, la réfection recommandée consiste soit à remplacer la pierre par une roche de qualité supérieure, soit à recouvrir la pierre tendre par un revêtement étanche : feuille de zinc, de plomb, de cuivre, etc.

Avant l'application d'un hydrofuge sur un parement en pierre présentant des altérations, il convient d'étudier correctement le problème pour définir exactement la cause du sinistre.

La figure 15 montre le cas concret d'échec de l'emploi d'hydrofuge, pour un problème dont la cause n'avait pas été analysée correctement. L'étanchéité à la partie supérieure du tablier d'un pont et les relevés latéraux étaient déficients. L'eau recueillie sur la totalité de la surface horizontale n'avait qu'une possibilité d'évacuation, autre que sa pénétration dans la maçonnerie : par gravité et capillarité, l'eau est descendue dans les piles en maçonnerie. L'application d'un hydrofuge sur les parements extérieurs a été plus néfaste que de ne rien faire.

L'efficacité de l'hydrofuge et sa faible diffusivité a favorisé la décohésion du parement sous l'effet des pressions internes dues à l'eau.

Une autre erreur assez fréquente et à ne pas commettre consiste à appliquer un hydrofuge de surface sur les faces latérales d'un mur ou d'un pilier en maçonnerie soumis à des remontées capillaires puisqu'en contact avec le terrain humide. L'application de l'hydrofuge sur ce parement réduit l'évaporation latérale, ce qui engendre deux complications : l'eau de la frange capillaire monte plus haut et la pression de vapeur d'eau emprisonnée entraîne le cloquage avec éclatement du film et desquamation de la pierre.

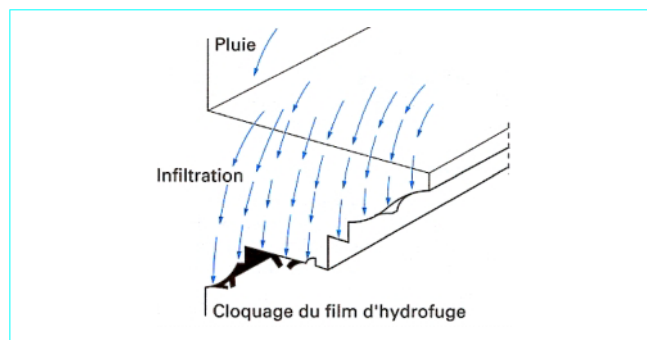


Figure 14 – Dégradation d'un film hydrofuge par pénétration d'eau dans le cas d'une mauvaise application

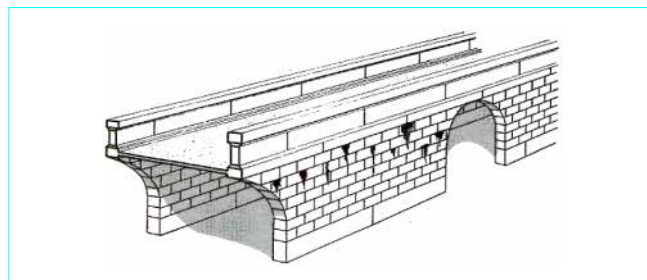


Figure 15 – Dégradation d'un film hydrofuge due au manque d'étanchéité du tablier d'un pont

4.4.7 Différentes familles d'hydrofuges de surface

Les produits hydrofuges commercialisés et conçus pour imperméabiliser les pierres ne changent pas l'aspect des parements. Selon les produits (leur composition et leur viscosité) et la microstructure des roches, la pénétration s'effectue sur quelques millimètres. Ces produits sont des composés chimiques de différentes origines : silicates, silicones, silanes, siloxanes, organométalliques, organofluorés, acryliques et vinyliques.

4.4.7.1 Siliconates

En phase aqueuse, ils sont utilisés depuis plus de 20 ans. Les formulations souvent rencontrées sont à base de méthylsilicate de sodium ou de potassium. Ces produits sont employés en émulsion dans l'eau et leur action hydrophobe provient d'une réticulation des groupements méthyles en présence du gaz carbonique de l'air.

4.4.7.2 Silicones

Les produits commercialisés dans cette famille se classent en différentes catégories suivant la liaison Si. Ces résines sont formées de chaînes silicium-oxygène (Si-O-Si-O) auxquelles des groupements organiques sont rattachés. Ces produits polymères sont en solution dans différents solvants (white-spirit, éther, butyl alcool) ou des composés aromatiques du cycle benzénique (toluène, xylène). Les concentrations en matières actives varient de 2 à 15 %. Les meilleurs résultats sont obtenus par des formulateurs qui élaborent des concentrations adaptées aux supports poreux. Lors de l'application, les résines sont entraînées par le solvant dans le réseau capillaire. Suivant les conditions de température et d'hygrométrie, le solvant peut s'évaporer en partie et perdre une quantité variable de matières actives sur les parois des capillaires. La vitesse de la réaction de réticulation dépend des conditions thermo-hygrométriques. Dans l'état actuel des connaissances, le problème théorique n'est pas totalement résolu, le phénomène physico-chimique est complexe compte tenu du nombre de paramètres.

La solution passe d'une phase liquide (au moment de l'application, il est souhaitable que la viscosité soit la plus faible possible pour favoriser la profondeur de pénétration) à la polymérisation, qui s'effectue sous forme d'un gel qui obstrue certains capillaires en se collant sur leurs parois. Les forces d'adhérence conditionnent la durabilité, et la pénétration l'efficacité du traitement.

Une recherche expérimentale effectuée sur des murs en vraie grandeur, exposés à l'extérieur, au CEBTP à St-Rémy-lès-Chevreuse, a montré la difficulté de trouver des produits de cette famille efficaces et durables. Dans 80 % des cas, après 3 ans d'exposition aux intempéries, les produits étaient inefficaces.

Il est indispensable, pour que la pénétration de cette solution s'effectue en profondeur, que l'humidité soit très faible, autrement la polymérisation ne s'effectue que superficiellement et l'efficacité du produit est limitée. Cette condition rend difficile l'application immédiatement après le nettoyage (ce qui est très intéressant pour éviter l'échafaudage).

Cette même étude a donné un très bon résultat en procédant en deux phases : application d'un primaire compatible avec un support humide sous forme d'une solution aqueuse de fluosilicate de magnésium, puis de l'hydrofuge proprement dit, un silicone avec solvant.

4.4.7.3 Silanes

Ce sont des molécules monomères de très petites dimensions qui, après application, s'hydrolysent pour former des polymères. On trouve sur le marché des solutions à 20 ou 40 %. Comme les silanes sont dilués dans des solvants alcooliques, leur pénétration dans les supports humides est favorisée. Les alcoxysilanes sont commercialisés dans cette catégorie. Le remplacement dans la molécule de l'une des liaisons hydrogène par un radical organique confère des propriétés hydrophobes.

4.4.7.4 Siloxanes

Ce sont des composés organiques du silicium sous forme d'oligomère dilué principalement dans les solutions alcooliques. Ils se situent entre les silicones monomères et polymères. Leurs molécules sont de très faibles dimensions et elles sont moins volatiles que les silanes.

4.4.7.5 Composés organométalliques

Ce sont des molécules mixtes organiques et inorganiques, comme les silicones. Un ion métallique remplace l'atome de carbone.

Le stéarate d'aluminium et l'orthotinate de butyle sont les constituants les plus utilisés (comme il y a une quarantaine d'années).

4.4.7.6 Composés organofluorés

L'intérêt de ces produits réside dans leur effet répulsif très important vis-à-vis de l'eau (la tension superficielle n'est que de 14×10^{-3} N/m, soit 5 fois moins que l'eau). Comme ils sont très récents, leur durabilité dans le temps conditionnera une large diffusion de cette famille d'hydrofuges.

4.4.7.7 Résines acryliques et vinyliques très diluées

Leur fabrication se fait par polymérisation de l'acide acrylique ou de l'acide méthacrylique, dérivés de l'éthylène, par substitution d'un ou deux atomes d'hydrogène. Ces résines sont solubles dans des solvants organiques. Leur durabilité aux rayons UV et aux agents chimiques est en général satisfaisante. Leur point faible est leur adhérence au support.

4.4.7.8 Conclusions sur les hydrofuges

Dans l'état actuel des connaissances, il n'existe pas une famille de produits réunissant tous les critères de performance quelle que soit la structure poreuse du support. La non-nocivité (trop forte réduction

de l'évaporation) qui provoque l'altération des pierres à pores très fins est le facteur essentiel à rechercher en priorité. Dans le domaine des pierres, des progrès sont encore à faire pour la mise au point d'un produit, équivalent d'une lasure, efficace et non nocif, utilisé pour la protection incolore du bois apparent. Actuellement, ce n'est qu'après expérimentation, ou sur la base de références précises, qu'il est possible de choisir une solution, souvent de durée limitée, mais sans aucun risque pour la pierre traitée.

Récemment, le CEBTP a eu à conseiller et à contrôler le traitement hydrofuge des pierres constituant les parties ornementales de l'Arc de Triomphe. Après une sélection en laboratoire des meilleurs produits, un hydrofuge de surface, composé d'une émulsion acrylique, a été retenu. Après application en deux couches successives au pinceau et au rouleau, l'efficacité du traitement a été mesurée par un essai de perméabilité :

Avant traitement les valeurs suivantes ont été obtenues :

- pierre de Chérence : perméabilité de 50 à 250 L/h/m² ;
- pierre de Château-Landon : perméabilité inférieure à 20 L/h/m².

Après traitement, sur 78 essais effectués à des emplacements différents, aucune pénétration d'eau n'a été observée dans les jours qui suivaient l'application.

4.5 Bouchage et collage

L'opération d'obturation doit être effectuée avec beaucoup de soin. Il est important de ne pas introduire n'importe quel matériau dans les vides, il ne s'agit pas d'une opération qui consiste à faire un simple remplissage. Bien entendu, le choix des techniques et des matériaux à adopter est fonction de l'importance et de la valeur des édifices ou des objets, et aussi du nombre et de la dimension des vides. Il est possible de différencier les injections des maçonneries de pierres calcaires, à base de coulis de liants hydrauliques (technique et matériaux les moins onéreux), des injections de résines plus appropriées pour le traitement des petits éléments. Pour des raisons économiques, il est nécessaire de considérer deux catégories de bâtiments : d'une part les œuvres d'art, les monuments classés présentant pour le patrimoine culturel une valeur historique reconnue, et d'autre part les bâtiments courants n'ayant aucune valeur artistique, mais qui sont à maintenir en état. Dans ce cadre d'intervention, compte tenu des surfaces à traiter, pour être réaliste, l'aspect économique prédomine souvent sur le choix des méthodes.

Dans ce paragraphe il convient de distinguer les interventions qui ont essentiellement pour rôle de renforcer la résistance structurelle de celles qui sont réalisées dans le seul but esthétique : le bouchage.

Mais en réalité la démarcation entre ces deux types d'interventions n'est pas aussi tranchée ; il existe certaines actions, comme par exemple l'injection de résine, qui ont un double rôle : boucher et coller. Elles assurent l'adhérence des fragments qui pourraient se détacher de la surface, mais quand on injecte dans une fissure, on redonne de la cohésion au bloc, ce qui améliore sa portance.

4.5.1 Injection de coulis de liants hydrauliques

Les maçonneries anciennes (dites de blocage) sont souvent désagrégées : le mortier de liaison ancien était composé de chaux aérienne, de sable, de terre argileuse et a souvent perdu sa cohésion par lavage au cours du temps.

Dans ce type de maçonnerie, l'injection dans ces vides importants a pour rôle d'assurer la liaison par contact d'adhérence entre les blocs (moellons apparents et blocages intérieurs). Comme souvent la stabilité de cette maçonnerie est précaire, il est impossible d'injecter sous une forte pression, pour ne pas accroître les désordres de la structure. L'expérience a montré que le coulis classique, simple barbotine de ciment obtenue par un mélange de ciment hydraulique

et d'eau, ne convient pas. Ce coulis n'a pas la faculté de pénétrer en grande profondeur, car sa fluidité est réduite par l'absorption de l'eau par succion des particules (argiles, sable et matériaux divers) que l'on souhaite réagglomérer. Mais la solution qui consiste à injecter une barbotine trop fluide ne convient pas non plus, car un tel mélange est trop ségrégable. La séparation de l'eau de ses constituants lourds (ciment) ne permet plus la progression d'un mélange homogène. Pour résoudre ce problème de composition de coulis, le CEBTP a réalisé une recherche expérimentale et plusieurs applications pratiques *in situ* (église de Sainte-Menehould, Arc de Triomphe...).

Des nouvelles compositions de coulis ont été trouvées et des applications ont montré leur efficacité. La composition d'un des coulis les plus performants est la suivante :

- ciment CLK 45 : 50 kg ;
- eau : 40 kg ;
- fluidifiant : 1 kg ;
- bentonite hydratée à 100 % : 16,5 kg.

Ce mélange obtenu dans un malaxeur à haute turbulence a des propriétés rhéologiques à l'état frais très intéressantes et donne des performances importantes à l'état durci. Des essais ont été réalisés sur des maquettes en vraie grandeur. Cette composition peut être injectée sous une faible pression sans se bloquer et pénétrer sur une grande profondeur dans la maçonnerie à renforcer.

Des essais de résistance mécanique et de déformabilité sous charge ont été réalisés sur ces maquettes sous une presse pouvant exercer une force de 600 t. Les résultats sont très significatifs.

Comme l'examen de la structure interne a montré qu'après un premier remplissage il existait encore dans le mortier de liaison quelques petits vides de 0,5 à 1 mm de diamètre, les chercheurs ont pensé que le remplissage de cette structure pouvait être complété. Une deuxième injection avec un produit plus fluide, le silicate de sodium, déjà utilisé dans certains domaines pour son intérêt économique, a été employée. La compacité a été nettement améliorée, et la résistance a dépassé toutes les espérances : la portance du mur a doublé.

4.5.2 Injection de résines

Le choix des résines doit être fait en fonction du rôle que l'on attend de cette intervention, de la nature des maçonneries, de la disposition et de l'importance des parties fragmentées. L'injection nécessaire pour redonner de la cohésion n'est pas la même que celle destinée à obstruer des pores pour imperméabiliser, par exemple pour empêcher les transferts par capillarité.

Pour le collage, les résines sont principalement des époxydes et des polyesters. Si, en même temps, il est nécessaire de fixer des pièces métalliques, par exemple des goujons (en résines, en acier inoxydable ou au titane), la résine pourra être armée de fibres de verre. L'assemblage nécessitant une armature est mis en place par des perforations dans les deux pièces à assembler. Pour certaines qualités de pierres tendres, il est nécessaire de durcir la pierre par imprégnation d'un consolidant avant le collage. Le défaut des colles à base d'époxydes et de polyesters est la mauvaise conservation de leur couleur aux rayons ultraviolets. Les études ont montré qu'il était intéressant de terminer en surface le colmatage, avec un mélange de pierre broyée et de résine acrylique qui est plus stable à la lumière.

L'injection dans les fissures s'effectue avec des produits et des techniques déjà éprouvés depuis plusieurs années, mais le résultat n'est garanti que si l'opération respecte la réalisation de ces différentes phases :

- dépoussiérage et nettoyage avec un solvant compatible ;
- percement des trous d'injection ;
- scellements des injecteurs et des événements ;
- après séchage, injection par gravité ou sous pression suivant la viscosité de la résine.

Dans le cas d'injection sous pression, les injecteurs formés de tôle en U sont collés à cheval sur la fissure (figure 16). Celle-ci est

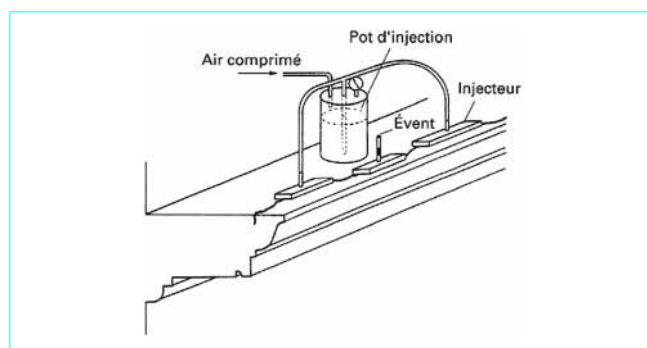


Figure 16 – Injection de résines

colmatée en surface pour éviter les fuites de produit. Des événements permettent à l'air de s'échapper pendant le remplissage, et le contrôle de la fin d'injection.

4.5.3 Bouchage

L'opération de bouchage consiste surtout à obstruer des vides et des cavités qui apparaissent en surface par un apport de matières étrangères donnant le même aspect. Souvent, l'apport n'est que superficiel (de quelques millimètres de profondeur), mais dans le temps cette reconstitution devient visible. Il est pratiquement impossible de garantir qu'un matériau artificiel vieillira de la même façon et aura donc le même aspect que la roche naturelle qui est autour.

Le matériau de bouchage est constitué d'une pâte contenant les liants et une charge minérale inerte. Après sa mise en place, son durcissement et la finition de sa surface extérieure, le produit de qualité devrait avoir les caractéristiques de couleur, de grain, de porosité et de dureté les plus proches possible de la pierre traitée. Le liant utilisé est principalement une résine acrylique en émulsion. Son rôle est d'assurer la résistance mécanique (dureté de surface, collage pour l'adhérence à la pierre). Son aspect peut être modifié par des pigments inorganiques. De bons résultats sont obtenus avec des mélanges composés de 12 à 20 % de résine par rapport au poids sec de poudre broyée. La quantité de résine doit être adaptée, expérimentalement, à la granulométrie de la poudre, pour que les grains inertes soient parfaitement enrobés.

Le bouchage avec des liants inorganiques (ciment blanc, chaux) est délicat à réaliser par suite des risques de coloration et de fissuration.

4.6 Réfection des joints

Les murs constitués de blocs assemblés entre eux nécessitent fréquemment la réfection des joints extérieurs s'ils sont dégradés ou fissurés. Les produits hydrofuges ne sont pas aptes à obstruer une fissure qui, souvent, est « vivante » et varie de largeur dans le temps. La membrane superficielle, constituée par un hydrofuge invisible à l'œil, n'est pas assez souple pour suivre les mouvements des supports. Aussi, avant d'envisager l'imperméabilisation d'une façade avec un hydrofuge, est-il indispensable de reprendre les joints en effectuant les opérations suivantes :

- dégarnissage des joints sur une profondeur de 2 à 3 cm ;
- remise en place d'un mortier de rejointoiement dont le rôle est d'assurer l'étanchéité à la pluie, tout en laissant respirer la maçonnerie.

Théoriquement, le mortier de rejointoiement doit avoir une porosité voisine de celle de la pierre. Une erreur fréquente consiste à réaliser un mortier très riche en ciment ; sa présence contribue à provoquer l'altération de la pierre tendre qui est autour. La

meilleure solution consiste à réaliser un mortier à la chaux ou un mortier bâtard. À sa mise en place, ce mortier relativement sec devra être comprimé et serré au fer à joint pour qu'il adhère le mieux possible à la pierre et qu'il soit suffisamment compact.

4.7 Durcisseurs et consolidants

Certains états de friabilité superficielle des roches exposées à l'extérieur peuvent être améliorés par l'imprégnation avec un durcisseur-consolidant, dont le rôle consiste à augmenter la cohésion et la liaison entre les cristaux des minéraux. Ainsi, la résistance mécanique du matériau est améliorée et la compacité de la structure devient moins accessible à l'eau. Ce traitement favorise la durabilité : meilleure résistance au gel et à la cristallisation des sels ainsi qu'aux tensions mécaniques dues aux facteurs extérieurs (érosion, efforts mécaniques).

La réussite d'une consolidation est fonction de trois paramètres :

- les conditions d'application de l'imprégnation ;
- la nature du produit consolidant ;
- la nature et l'importance de la texture poreuse du matériau.

Il existe essentiellement deux techniques d'imprégnation qui diffèrent selon que les éléments à traiter sont déplaçables ou pas. Les éléments transportables (statues, mobiliers urbains, objets) qui peuvent être maintenus en contact prolongé avec la solution consolidante sont imprégnés dans de meilleures conditions en profondeur. Dans le domaine des œuvres d'art, les progrès de ces traitements sont les plus avancés.

Les éléments à traiter *in situ* sont imprégnés essentiellement par les faces extérieures. Les solutions à l'état fluide du consolidant sont surtout appliquées par pulvérisation, à la brosse ou au rouleau. La pénétration s'effectue par absorption capillaire. Selon la durée de contact ou le nombre de couches appliquées, il est difficile d'espérer atteindre une profondeur supérieure à 20 mm. Actuellement, sur le marché, les consolidants les plus répandus sont à base de silicium. Les silicates inorganiques et organiques donnent naissance à un composé intermédiaire : le silicate d'éthyle.

La silicatation est un procédé connu depuis de nombreuses années. Comme durcisseur de surface, une solution aqueuse de silicates alcalins qui imprègnent les pores (silicates de potassium et de sodium) a souvent été utilisée sur les pierres calcaires tendres.

Les produits à base de fluosilicate sont très souvent employés, surtout les sels de magnésium et de zinc. Il se forme une croûte superficielle de carbonate de sodium et de potassium. Mais les nombreuses dégradations de pierre, observées après plusieurs années d'expérience (en France et en Italie), montrent que cette technique de consolidation est plus néfaste que de laisser les pierres sans traitement.

Il est recommandé d'étudier les produits et les techniques avant leur utilisation sur un support donné. Un certain nombre de propriétés de la croûte formée sont à mesurer, principalement la perméabilité à l'eau et surtout la possibilité de la diffusion de la vapeur. Les coefficients de dilatation thermique et le module d'élasticité doivent être comparés avec ceux de la pierre avant imprégnation.

À l'occasion du ravalement de l'Arc de Triomphe de Paris, il a été possible de tirer plusieurs informations sur ce sujet. Certaines parties ornementales de ce monument (attique, boucliers, corniche, tête de lion, frises à bas et haut relief, bandeaux) ont présenté un début de décohésion superficielle. Une sélection expérimentale a abouti à choisir une formule commerciale de produit consolidant minéralisateur à base de silicate d'éthyle (RC 70). Ce traitement a été appliqué par pulvérisation à refus.

L'efficacité du traitement a été mise en évidence par des mesures de vitesse du son en surface effectuées avant et après traitement.

Sur la pierre de Cherance (porosité : 6 à 23 %), les vitesses sont les suivantes :

- corniche : avant traitement : 3 700 m/s
après traitement : 4 300 m/s
amélioration : 15 %
- têtes de lion : avant traitement : 4 410 m/s
après traitement : 4 850 m/s
amélioration : 10 %.

Parmi les différents produits consolidants qui sont commercialisés actuellement, on peut noter :

- les silicates organiques associés à des résines méthyles ;
- les silicates organiques associés à des résines méthylphényles ;
- les résines méthylphényles.

4.8 Assèchement des remontées capillaires

4.8.1 Généralités

Les mouvements ascensionnels de l'eau dépendent de la nature de la maçonnerie constituant la base des murs et de la teneur en eau qui imprègne le sol en contact avec le soubassement.

De nombreux procédés d'assèchement des murs existent sur le marché, mais il est très difficile d'effectuer une évaluation de leur efficacité sans réaliser des mesures. Pour cette raison, nos bases d'évaluation reposeront sur les résultats d'une importante expérimentation effectuée au CEBTP à la demande du ministère des Affaires culturelles. Cette étude expérimentale, unique au monde, a consisté à réaliser 120 m de murs en pierre calcaire tendre et poreuse avec, à leur base, une jardinière remplie d'eau qui simulait un cas extrême de terrain imprégné d'humidité et qui alimentait en eau d'une façon constante le socle de ces murs. Plusieurs systèmes d'assèchement ont été mis en place librement par les sociétés qui commercialisent différentes techniques d'assèchement.

Les murs expérimentaux étaient constitués de blocs de pierre de taille de dimensions 0,25 × 0,50 × 0,80 m, montés d'une façon traditionnelle : sur cales de bois et coulis de mortier de chaux, puis rejointoiement avec finition au plâtre à modeler. Les pierres utilisées, pierre de Saint-Vaast (Oise) et Tuffeau (Vienne), avaient respectivement des porosités de 41 et 45 %. Chaque procédé d'assèchement a été expérimenté sur ces deux types de pierre.

L'évaluation de l'efficacité a été effectuée par plusieurs types de contrôles :

- prélèvements (mesures pondérales avant et après dessiccation) ;
- sondes d'humidité diélectriques (mesure de l'impédance).

À titre de comparaison, certains murs n'étaient pas munis de dispositifs d'assèchement et permettaient de déterminer les écarts d'efficacité de ces procédés à différents niveaux dans le temps.

4.8.2 Principales techniques de lutte contre les remontées d'eau par capillarité

4.8.2.1 Procédés par électro-osmose passive

Ce procédé est basé sur la différence de potentiel existant entre le mur et le terrain et qui est faible. Le principe consiste à attribuer cette différence de potentiel à la capillarité. En mettant en court-circuit le mur et le sol, le courant doit s'annuler et l'ascension de l'eau être arrêtée.

4.8.2.2 Siphon atmosphérique ou aérateurs

Le système d'assèchement comprend un tube en terre cuite poreuse, scellé au mortier de ciment dans un forage réalisé dans le mur.

Le principe théorique du procédé est le suivant :

- l'eau du mur est aspirée par succion par la terre cuite plus capillaire ;
- sous l'effet de la ventilation naturelle, l'air sec à l'extérieur passe dans la partie supérieure du tube car il est plus léger, l'air humide, plus lourd, s'accumule en partie inférieure et s'évacue par gravité vers l'extérieur.

4.8.2.3 Injection de résine

Ce procédé consiste à introduire une résine dans la maçonnerie, soit par gravité, soit par sous pression. Une rangée de trous est réalisée dans le mur. Une résine à l'état liquide (siliconate, latex, etc.) est injectée dans chaque orifice, le liquide s'infiltre alors par capillarité dans la microstructure. Après une certaine durée, la résine polymérise et forme un gel qui obstrue les canaux capillaires, formant une barrière étanche à la remontée d'eau.

4.8.2.4 Création d'une barrière horizontale étanche

Dans une saignée horizontale réalisée dans toute l'épaisseur du mur, une barrière étanche est réalisée, soit en introduisant des plaques métalliques inoxydables, soit en mettant en place un mortier étanche (par exemple un mortier de résine époxyde) ou un autre produit étanche.

Le découpage du mur s'effectue par tronçon. Cette technique s'apparente à une reprise en sous-œuvre. Quand la totalité du périmètre est réalisée, l'ensemble de la construction au-dessus repose sur le matériau étanche introduit.

4.8.2.5 Barrière verticale étanche

Ce procédé consiste à empêcher le contact entre le terrain et le mur. Pour cela, un contre-mur est réalisé avec des dalles de béton moulé (béton très compact et pas capillaire). Des saillies aux quatre coins de ces éléments assurent un vide d'air (figure 17). Les eaux de ruissellement s'écoulent vers le bas et sont évacuées par un drain.

4.8.2.6 Drain assurant l'assèchement du terrain en contact avec le mur

Si les parois verticales en contact avec le sol ne sont pas étanches ou sont constituées de matériaux (briques, pierres ou mortier) trop capillaires (porosité supérieure à 15 %), la meilleure solution consiste à assainir le terrain. Si un accès existe autour des murs périphériques du bâtiment dont les murs sont à assécher, on peut éloigner l'eau du mur par un drainage complet.

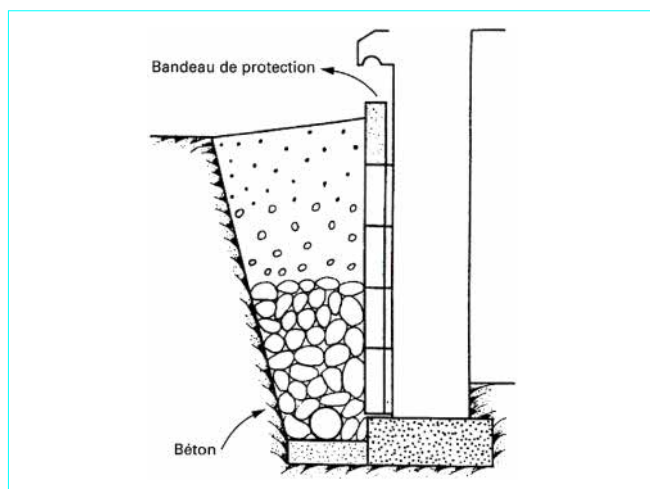


Figure 17 – Assèchement par drainage et contre-mur

Il faut que les eaux collectées par le drain puissent s'écouler librement par gravité vers un réseau d'évacuation bien conçu (cf. DTU 20.1).

4.8.2.7 Électro-osmose-phorèse

Elle consiste à adapter des conducteurs de nature différente (anode en cuivre dans la maçonnerie, cathode en acier galvanisé sous le sol). Elle est ensuite complétée par le remplissage des trous contenant les électrodes murales avec des « produits de phorèse » contenant des particules métalliques en suspension. Si le système fonctionne, sous l'action du courant créé par la pile (Cu^+ , Fe^-) l'eau contenue dans le mur est refoulée vers le sol, entraînant avec elle les produits qui doivent colmater les capillaires.

4.8.2.8 Électro-osmose active

Ce procédé complète le système passif (ou un court-circuit est créé) en ajoutant un générateur pour provoquer une différence de potentiel de l'ordre de 6 à 8 V, le mur étant rendu positif par rapport au sol.

4.8.3 Résultats obtenus par ces différents procédés

L'analyse des résultats obtenus par les essais expérimentaux du CEBTP et les différentes enquêtes effectuées sur chantiers permettent de donner les conclusions suivantes.

Le système de drainage du terrain donne toujours d'excellents résultats. La barrière étanche verticale est très efficace. La barrière étanche horizontale, très développée en Italie, et le procédé qui consiste à introduire des tôles inoxydables dans les joints horizontaux sont efficaces. Le seul inconvénient réside dans les risques statiques d'ébranlement de la maçonnerie située au-dessus de la coupure. La création de fissures, lorsque l'ensemble de la construction reposera sur le lit étanche, est la seule limite de cette technique.

Les procédés consistant à injecter un produit de colmatage dans la maçonnerie, bien que théoriquement très séduisants, n'ont pas donné satisfaction dans les essais réalisés dans des pierres très poreuses. La vitesse de polymérisation des résines étudiées n'a pas pu provoquer un gel colmatant les pores. Le produit est resté fluide trop longtemps et s'est dispersé dans les capillaires. Sa diffusion dans le milieu humide n'a pas été suffisamment mise au point.

Les procédés par électro-osmose n'ont donné aucune amélioration. Cependant, beaucoup de références en Suisse, Autriche et Belgique font état de réussites. Là encore, on peut se poser la question de la porosité excessive des pierres étudiées en France. Il faut signaler que les maçonneries de briques sont beaucoup moins capillaires (porosité moyenne : 18 %).

Les siphons ou drains atmosphériques n'ont pas encore donné satisfaction. Dans certains cas où leur efficacité avait été signalée, il faut noter qu'en parallèle un drainage avait été réalisé dans le terrain.

Plusieurs causes peuvent expliquer l'échec de ce procédé. Le transfert d'eau de la pierre vers le tube de terre cuite faisant office de drain ne peut s'effectuer que si les conditions suivantes sont remplies.

Un contact intime doit être réalisé entre la pierre et la brique. Or le scellement au mortier (susceptible de faire du retrait) n'a pas la possibilité d'assurer un contact aussi parfait.

L'absorption capillaire de la brique et du mortier doit être supérieure à celle de la pierre à assécher. Dans les problèmes de succion, le transfert ne s'effectue d'un matériau à l'autre que si la microstructure poreuse du matériau absorbant est plus capillaire que celle du matériau à assécher. En réalité, compte tenu de la grande variabilité des pierres constituant les murs, il est impossible d'avoir une qualité de terre cuite unique permettant d'assurer cette succion dans tous les cas.

5. Réfection des pierres altérées

5.1 Généralités

Si l'état de désagrégation des blocs de pierre est très important dans la masse, la consolidation par un traitement superficiel n'a aucune chance d'être efficace et durable. Le remplacement de la pierre altérée (en totalité ou en partie) s'impose. Le choix de la nature et de la qualité de la pierre à utiliser pose souvent trois problèmes : l'éthique, l'esthétique et la technique. En général, on essaie d'utiliser une pierre provenant de la même carrière, d'aspect, de couleur et de grain les plus identiques possible.

En ce qui concerne la finition d'aspect de la pierre neuve, les avis peuvent être différents. Dans le cadre des œuvres historiques, la règle de base est souvent de marquer distinctement la restauration, ce qui doit permettre de la différencier des parties originelles ; par exemple, l'état de surface doit avoir une présentation différente de celle antérieure. Mais le choix du type de finition dépend de la sensibilité du directeur des travaux. Suivant les pays ou les régions, il n'y a pas de doctrines codifiées faciles à faire respecter. Dans certains cas de restauration par substitution, la présence de blocs isolés de pierre neuve se distingue tellement de l'ensemble que l'on applique un traitement de coloration pour harmoniser le ton de l'ensemble. Cette opération consiste à tenter de patiner artificiellement la pierre neuve ; ce travail délicat s'effectue en appliquant une solution colorée avec un pigment au badigeon de barbotine de chaux grasse.

Si l'état général d'un parement montre que l'ensemble des pierres exposées se sont bien comportées en ce qui concerne leur cohésion, il n'y a aucune raison technique de ne pas restaurer avec la même qualité de pierre. Si, au contraire, l'état de l'ensemble montre une insuffisance de qualité compte tenu des conditions d'exposition, il est plus raisonnable économiquement de choisir une pierre de couleur et de texture similaire, mais ayant des performances plus élevées. En restauration d'œuvre historique ce dilemme se pose souvent.

5.2 Exécution de la substitution à l'identique

La méthode de restauration par substitution, dite en « tiroir », comprend les phases suivantes :

- le refouillement du bloc de pierre altérée sur la totalité de sa surface en découpant le bloc jusqu'aux joints latéraux. La purge doit être effectuée sur toute la profondeur en état de décohesion. En général le remplacement s'effectue sur une épaisseur de 5 à 10 cm ;
- suivant l'état d'humidité, il est nécessaire de laisser sécher le défoncement pendant plusieurs jours ;
- le remplacement s'effectue par l'encastrement du morceau de pierre de substitution dans le défoncement en effectuant un scellement au mortier ;
- les joints sont coulés ou fichés tout autour de la pierre neuve au mortier de liants hydrauliques (chaux aérienne et ciment ne tachant pas la pierre) ;
- le rejointoiement est réalisé sur 1 ou 2 cm de profondeur. Le garnissage et le bourrage s'effectuent en serrant énergiquement le mortier de consistance ferme au fer à joint. Ce mortier de rejointoiement ne doit pas être trop riche en ciment, mais il doit avoir une compacité voisine de celle de la pierre après serrage au fer et prise.

5.3 Substitution par de la pierre artificielle

Pour des raisons économiques, la réfection avec de la pierre naturelle n'est pas toujours possible ; dans ce cas, la substitution s'effectue par un mortier imitant la pierre naturelle. Quelquefois, il vaut mieux faire provisoirement une réfection (par exemple un morceau de corniche) avec un matériau artificiel, moins noble, que de laisser les intempéries aggraver la dégradation. Cette solution a été réalisée

sur plusieurs édifices avec une plus ou moins bonne durabilité. En ce qui concerne l'esthétique, même si immédiatement après l'exécution la réfection avec le mortier est une bonne imitation, l'exposition aux intempéries montre que, dans le temps, le vieillissement ne permet pas la conservation de la tonalité (aussi bien pour les mortiers hydrauliques que pour les mortiers de résine). Comme cela a déjà été indiqué, la patine des pierres provient des modifications physico-chimiques de certains minéraux et sels des roches, qui sont des constituants différents des matériaux artificiels.

5.4 Différents mortiers de ragréage

Les mortiers utilisés pour imiter la pierre naturelle se divisent en deux catégories.

5.4.1 Mortiers traditionnels à base de liants hydrauliques et mortiers spéciaux élaborés avec divers liants

Les mortiers à base de liants hydrauliques peuvent être conçus et dosés à la demande sur les chantiers, ou préparés en usine et vendus prêt à l'emploi.

En général, les mortiers préparés sur les chantiers sont des mortiers bâtards, constitués de ciment blanc, chaux blanche (naturelle ou chaux grasse), sable et poudre de pierre. De bons résultats ont été obtenus avec des réfections réalisées en trois couches. Pour améliorer l'adhérence et la résistance à la fissuration, un grillage en métal inoxydable est fixé par scellement dans le fond de la pierre à ragréer.

Dans cette catégorie il existe aussi les réfections avec les mortiers plâtre et chaux. Les dosages conformes au DTU 26.1 (chapitre 12) sont, pour 2,5 volumes d'eau :

- 1 volume de chaux aérienne ;
- 2 volumes de sable fin (de 0 à 1,6 mm) ;
- 3 volumes de plâtre gros.

L'application s'effectue en deux couches si l'épaisseur est inférieure à 3 cm. Le dégrossi peut s'effectuer en plusieurs passes de 2 cm. Chaque passe est recoupée de manière grossière (Berthelet ou autre). La finition peut être coupée en diagonale ou grattée.

Les parties moulurées sont aussi réalisables avec ce procédé, mais les parties extérieures en saillie (corniche, bandeau) doivent être protégées et recouvertes (par exemple de zinc).

5.4.2 Mortiers prêts à l'emploi

Constitués de liants hydrauliques, avec des adjuvants spécifiques, ils permettent également d'excellentes réalisations. Certaines sociétés proposent des produits avec des grains de plusieurs finesses, qui s'associent parfaitement à différentes duretés de pierre. D'une façon générale, si l'épaisseur à reconstituer dépasse 3 cm, on l'effectue en plusieurs couches. En pratique, l'utilisation de ces mortiers prêts à l'emploi nécessite sur les pierres tendres, avant application, une préparation spéciale du support. Si la dureté de la surface, après purge, est trop faible, il est indispensable d'appliquer un consolidant (par exemple à base de silicate d'éthyle).

Puis, pour que l'absorption de l'eau de gâchage du mortier ne soit pas trop rapide (dessiccation), un régulateur de porosité (acétate de vinyle, éthylène) peut être incorporé au gobetis ; l'adhérence est ainsi améliorée.

5.4.3 Mortier à base d'oxyde de zinc (ciment métallique)

Un mortier très ancien a été souvent utilisé dans la région parisienne et en France. Il est composé d'un mélange d'oxyde de zinc et d'une poudre de pierre broyée. Le gâchage est effectué avec une solution de zinc dans un acide dilué (solution aqueuse de chlorure

de zinc). L'expérience a donné d'excellents résultats pour l'imitation du grain de la pierre. En partie très exposée aux intempéries (couverture, corniche), une protection par un revêtement étanche (feuille de zinc ou de cuivre) est recommandée.

5.4.4 Mortiers de résine (liants organiques)

La composition identique dans toute l'épaisseur comprend un mélange de résine et de durcisseur, avec une matière inerte (sable, cendres volantes, poudre de pierre). À partir d'un échantillon de pierre, le mortier prêt à l'emploi préparé en usine peut être livré avec le grain et la couleur de la pierre.

5.4.5 Conclusions sur les mortiers de ragréage

Une étude sur des maquettes en vraies grandeurs a été réalisée au CEBTP afin d'établir une comparaison de ces différents produits. Les conclusions suivantes en résultent.

Toutes les teintes des parties ragréées avec des mortiers artificiels sont, après quelques années d'exposition aux intempéries, différentes de la pierre naturelle.

Quelques parties ragréées avec le mortier présentent des fissures (retrait hygrométrique ou contraction thermique).

Le phénomène le plus important est dû à la contraction thermique. Le coefficient de contraction thermique du mortier de liants hydrauliques étant supérieur à celui de la pierre calcaire, la partie réparée est, tout autour, solidaire de la partie existante (collage par adhérence) et la liaison entraîne la rupture de la pierre en bordure du mortier de ragréage. Par contre, si l'on observe les recommandations suivantes, ce désordre peut être évité.

Il est nécessaire de dissocier la pierre artificielle de la pierre existante. La meilleure technique de séparation s'exécute par la mise en place d'un joint plastique tout autour de la partie reconstituée, et légèrement en retrait. En partie vue, sur le parement, le rejointoiement effectué au mortier bâtard (de largeur identique au joint d'origine) cache ce joint de dilatation. Si la fissuration doit se produire, elle reste localisée dans le joint. Par ailleurs, au point de vue éthique, la nouvelle restauration est distinctement marquée. Le rejointoiement au mortier de résine, qui a un coefficient de dilatation thermique de 8 à 10 fois celui de la pierre, s'est désolidarisé de la pierre par cisaillement. Mais si la recherche d'un dosage en résine moins élevé avait été faite, l'expérience n'aurait pas été négative. Des exemples d'opérations ponctuelles de réfection aux mortiers à base de résine (par exemple, résine époxyde) ont donné d'excellents résultats de durabilité. Ce mortier est pratiquement insensible à l'eau ; des perspectives de développement après études peuvent, dans ce domaine, encore être envisagées.

Restauration des bâtiments en pierre

par **Marc MAMILLAN**

*Ingénieur de l'École du Bâtiment et des Travaux Publics
Conseiller Technique au CEBTP (Centre Expérimental de Recherches
et d'Études du Bâtiment et des Travaux Publics)*

Bibliographie

- [1] *Altération et protection des monuments en pierre*. Actes du Symposium International. Colloque UNESCO-RILEM. Bulletin RILEM 13, n° 75, Paris, 5-9 juin 1978.
- [2] HONEYBORNE (D.B.). – *The buildings limestones of France*. BRS (1982).
- [3] LAZZARINI (L.) et TABASSO (M.). – *La restauration de la pierre*. ERG (1989).
- [4] SNEYERS (R.V.) et De HENEAU (J.P.). – *La conservation de la pierre*. Extrait de *La préservation des biens culturels*. UNESCO (1969).
- [5] TORRACA (G.). – *Solubilité et solvants utilisés pour la conservation des biens culturels*. ICCROM (1980).
- [6] VIOLLEAUD (F.) et LAURENT (M.). – *Le ravalement*. Le Moniteur. Sept. 1990.
- [7] MAMILLAN (M.). – *Recherches récentes sur le nettoyage des façades en pierres calcaires*. Annales ITBTP, n° 75, juil.-août 1964.
- [8] MAMILLAN (M.). – *Nouvelles connaissances pour l'utilisation et la protection des pierres de construction*. Annales ITBTP, n° 335, janv. 1976.
- [9] MAMILLAN (M.). – *La gélivité des matériaux*. Annales ITBTP, n° 235, juil.-août 1967.
- [10] MAMILLAN (M.), BOUINEAU (A.) et GARNIER (D.). – *Nettoyage des dallages en pierres calcaires et procédés pour enlever les graffitis*. Annales ITBTP, n° 415, juin 1983.
- [11] MAMILLAN (M.). – *L'état des recherches dans le domaine de la pierre de construction*. Annales des Mines. janv. 1985.
- [12] MAMILLAN (M.). – *Méthodes d'évaluation de l'état d'altérations des pierres des monuments*. Colloque UNESCO-RILEM. Conservation of stone and other materials. volume I, Paris. juin 1993.

Normalisation

Association Française de Normalisation (AFNOR)

- NF B 10-301 4.75 Pierres calcaires. Identification.
- NF B 10-504 8.73 Pierres calcaires. Mesure du coefficient d'absorption d'eau.
- NF B 10-505 8.73 Pierres calcaires. Mesure de la vitesse de propagation du son (ondes longitudinales).
- NF B 10-506 8.73 Pierres calcaires. Mesure de la dureté superficielle (largeur de la rayure).
- NF B 10-508 8.73 Pierres calcaires. Essai d'usure au disque métallique.
- NF B 10-509 8.73 Pierres calcaires. Essai de compression.
- NF B 10-514 7.81 Pierres calcaires. Essai de résistance aux attaches.

Documents Techniques Unifiés (NF)

- DTU 20.1 9.85 Parois et murs en maçonnerie de petits éléments (= NF P 10-202).
- DTU 26.1 5.90 Enduits aux mortiers de ciment, de chaux et de mélange plâtre et chaux aériennes (= NF P 15-201).
- DTU 55.2 5.93 Revêtements muraux attachés en pierre mince (= NF P 65-202).

American Society for Testing and Materials (ASTM)

- C 150-92 Spécification for Portland Cement.