

PIERRESUD

BASE DE DONNEES SUR LES PIERRES
DU PATRIMOINE HISTORIQUE ET ARCHEOLOGIQUE
DU SUD DE LA FRANCE



Guide sur les techniques de Conservation de la pierre

Auteur : **Philippe Bromblet**

SOMMAIRE

Introduction	2
1. Importance du diagnostic préalable.....	3
2. Les traitements biocides	4
3. Les nettoyages.....	5
4. La consolidation superficielle	9
5. Le dessalement.....	11
6. Les réparations	13
7. La consolidation interne et le renforcement.....	14
8. La protection	15
9. Le moulage	17
Conclusions	18
Bibliographie	19

© Clichés photographiques : Philippe Bromblet

Introduction

La conservation est une pratique relativement récente qui a progressivement relayé ou complété les travaux de restauration des objets d'art et des monuments. Ses principes et ses objectifs ont été fixés dans les années 70.

La restauration consistait jusqu'alors à restituer un état ancien ou idéal de l'objet, au prix d'interventions importantes. Elle a conduit à des réparations, des réfections, des remplacements de pierre importants, proches de véritables rénovations, voire à des restitutions complètes d'éléments manquants (anastylose). Elle s'est aussi caractérisée par un manque de précaution dans l'utilisation de produits qui se sont révélés par la suite néfastes, dans l'application de traitements inefficaces mais irréversibles et par la mise en œuvre de matériaux (pierres, mortiers) incompatibles avec les matériaux originels.

Par réaction, la doctrine actuelle se caractérise par des objectifs et des principes beaucoup plus prudents. Les interventions sont réduites et doivent modifier le moins possible l'existant et uniquement pour améliorer ses conditions de conservation, son état, son environnement, dans le but de prolonger sa durée de vie.

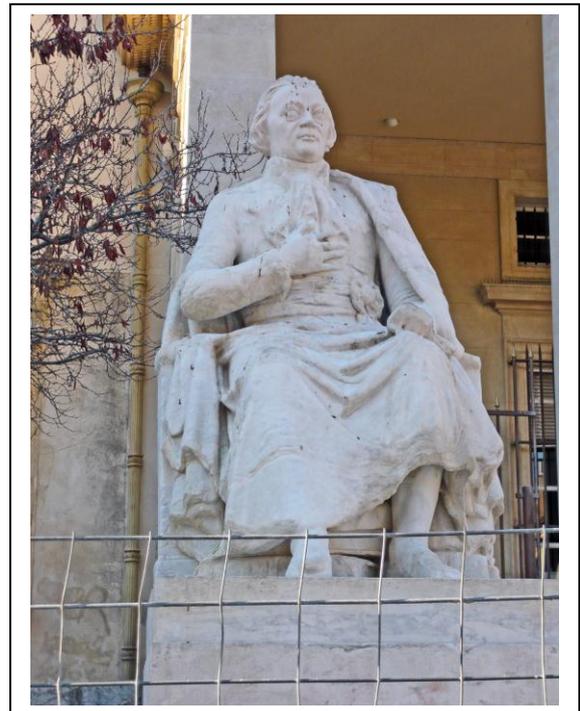
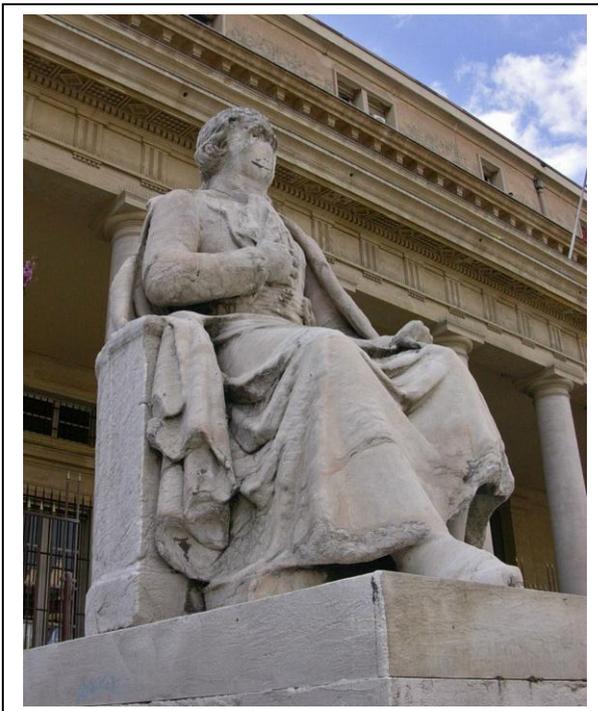
Les produits et les traitements se sont diversifiés. Depuis trente ans, la conservation de la pierre comme celle des autres matériaux a largement bénéficié des progrès considérables des sciences analytiques et des innovations industrielles. Les techniques de conservation de la pierre ont rapidement évolué. Elles intègrent aujourd'hui les analyses de laboratoire les plus diverses, les silicones, les lasers, la biotechnologie, les fibres de verre ou de carbone et bien d'autres produits ou technologies modernes.

Produits et méthodes sont dans la mesure du possible réversibles, compatibles avec les matériaux à traiter. Une science de la conservation s'est développée dans des laboratoires de nombreux pays où travaillent des scientifiques spécialisés dans le diagnostic des altérations, l'évaluation et l'optimisation des produits et des techniques de conservation.

La démarche qui s'est progressivement mise en place ne consiste donc plus uniquement à intervenir par des travaux de restauration sur l'œuvre, mais à procéder par les étapes suivantes :

- + établir un diagnostic des dégradations lors d'une étude préalable aux travaux,
- + supprimer les causes des altérations en agissant en amont sur l'environnement,
- + restaurer l'œuvre (réparer, compléter et consolider)
- + protéger l'œuvre restaurée de dégradations possibles futures en assurant son entretien.

Depuis une dizaine d'années, une nouvelle démarche est venue progressivement compléter cette approche pour limiter encore plus les interventions. Il s'agit de la conservation préventive.



1. Importance du diagnostic préalable

La nécessité de cette phase préalable à toute intervention de conservation est maintenant bien admise. Elle est le plus souvent réalisée dans le cadre d'une "étude préalable" qui précède les travaux et permet au maître d'œuvre de mener une étude historique, des investigations scientifiques, des essais de produits et de méthodes indispensables pour établir un projet de restauration documenté. Elle peut être menée selon les besoins en collaboration avec un historien d'art, un restaurateur, un laboratoire d'analyse.

Les analyses peuvent être réalisées in situ, et de façon non destructive ou destructive ou en laboratoire sur des prélèvements dont la dimension est liée aux possibilités d'échantillonner et aux besoins analytiques.

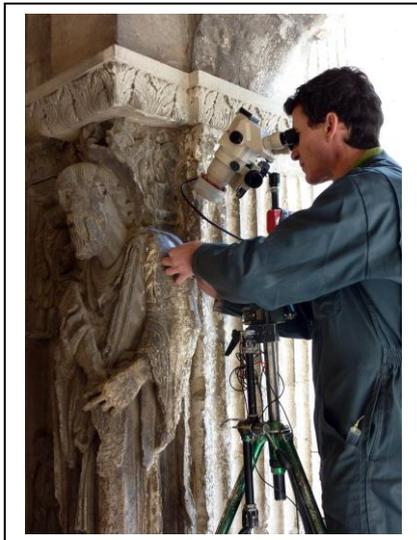
Pour les essais de techniques ou de produits et leur indispensable évaluation, les possibilités sont encore plus nombreuses.

Les essais pratiqués in situ peuvent simplement être examinés sans plus d'investigation. Ils peuvent aussi être évalués directement sur place par des méthodes non destructives ou destructives. Il est possible enfin de prélever des échantillons de pierre traitée (pierre déposée, carottage, poudre obtenue par percement, fragments cassés...) pour des évaluations en laboratoire, destructifs ou non destructifs. La technologie progresse et permet de développer des méthodes d'investigation non destructives et utilisables in situ qui remplacent les méthodes destructives de laboratoire.

Les essais pratiqués en laboratoire sont effectués selon le cas sur des pierres déposées, des carottes, des fragments ou des poudres ou sur une pierre équivalente mais neuve, prise en carrière. Là encore, les méthodes d'évaluation peuvent être destructives ou non destructives.

Les causes de dégradation sont très variées. Ce n'est qu'une fois le diagnostic établi, les causes de dégradations identifiées et l'état de conservation de la pierre reconnu, qu'il devient possible d'envisager une ou plusieurs interventions pour, selon le cas :

- ✚ stopper et stabiliser les altérations en éliminant les agents responsables,
- ✚ appliquer un traitement de protection adapté,
- ✚ réparer les zones dégradées,
- ✚ connaître et prévoir les effets de toute intervention de conservation/restauration.



2. Les traitements biocides

2.1. Diagnostic

Ces traitements répondent à un diagnostic précis : on a reconnu sur la pierre des colonisations biologiques (mousses, lichens, algues) ou microbiologiques (bactéries, champignons, algues, lichens...). On est parfois amené à identifier avec plus de précision les micro-organismes pour mieux choisir le traitement biocide qui va les supprimer.

2.2. Choix des produits

Leur utilisation a pour unique but de supprimer des recouvrements biologiques : mousses, lichens, algues et champignons préalablement identifiés.

Les produits les plus employés sont des sels d'ammonium quaternaire. Ils ne laissent pas de sels solubles résiduels. Les tests d'efficacité sont réalisés systématiquement en laboratoire pour sélectionner le produit le plus performant au cas par cas. L'eau de Javel, l'eau oxygénée qui ont été employées dans le passé ne sont plus préconisées car leur utilisation présente de graves inconvénients (production de sels solubles, de taches...).

2.3. Protocole d'utilisation

Le protocole classique d'utilisation est le suivant :

- + éliminer le maximum de dépôts par brossage à l'eau chaude si possible,
- + réaliser le traitement par temps sec pour éviter une dilution dans l'eau de pluie,
- + respecter les taux de dilutions indiqués par le fabricant,
- + effectuer le traitement par pulvérisation ou au pinceau, pendant 2 à 3 jours consécutifs à raison d'une application par jour,
- + laisser agir le produit au moins 4 à 5 semaines pour une action complète,
- + vérifier que les recouvrements sont bien desséchés avant de les éliminer par brossage, sinon renouveler le traitement,

Il faut prendre la précaution de rincer à l'eau si la façade doit être hydrofugée dans des délais relativement brefs (< 15 jours).

Si les colonisations biologiques se sont développées à la faveur d'une situation anormale (des ruissellements d'eau liés à une descente pluviale déboîtée par exemple), elles ne réapparaîtront pas après leur élimination si l'on a pris soin d'intervenir sur la descente pour réassurer sa continuité. Par contre, si les colonisations se sont développées parce que la surface de la pierre constitue un environnement propice, humide, éclairé..., les colonisations biologiques vont progressivement réapparaître à moins de prévoir des traitements biocides d'entretien à intervalles réguliers.

3. Les nettoyages

Quels types de salissures trouve-t-on sur une façade, une sculpture ?

A la surface, on trouve des particules minérales (grains de sable, argiles, des sels ...), des produits organiques ou organo-minéraux issus de l'activité industrielle et urbaine (cendres volantes, suies, huiles et des résidus de combustion essence, diesel et fuels), et / ou des matières végétales et animales (pollen, algues, insectes et bactéries). Toutes ces salissures constituent un dépôt de surface qui selon les expositions sera meuble ou induré, fin ou épais, grisâtre ou noir.

En imprégnation, sous la surface, on rencontre des résidus d'imprégnations locales volontaires ou involontaires (anciens traitements, graffiti, huile, graisse, rouille, sel...). Tous ces produits imprègnent plus ou moins profondément la porosité des matériaux.

L'épiderme de la pierre a, quant à lui subi des transformations qui le fragilise (patine, couche d'épigénie), mais il faut tenter de le préserver.

Il faut toujours veiller à adapter la technique de nettoyage en fonction du type de salissures que l'on souhaite éliminer (poussières meubles ou croûtes indurées, recouvrements biologiques...) et des propriétés du support (tendre, dur, poreux et capillaire...).

Quels sont les dangers du nettoyage?

Le nettoyage peut être trop poussé, insuffisant ou incomplet, ne pas présenter une durabilité suffisante, donner à la pierre un aspect inattendu, (jugé) inesthétique, ou accélérer les dégradations en cours ou en provoquer de nouvelles.

Le nettoyage est une opération irréversible qui est effectuée en premier lieu pour supprimer une altération esthétique, visuelle. Il doit être associé à d'autres interventions plus spécifiques pour lutter contre les dégradations physiques qui induisent des pertes de matière (dessalement, consolidation, réparation...) et pour améliorer la conservation de l'œuvre.

3.1. Le nettoyage des façades

La ou les méthodes pour nettoyer une façade donnée doit ou doivent répondre aux **critères** suivants :

- ✚ la technique utilisée doit être efficace,
- ✚ elle ne doit pas provoquer des dommages directs ou indirects à la façade (ni à l'environnement, et ne pas exposer les intervenants),
- ✚ elle doit permettre la meilleure conservation possible de l'épiderme, de la patine de la pierre,
- ✚ elle ne doit pas générer des produits néfastes ni accélérer les processus d'altération en cours,
- ✚ elle doit être contrôlable, l'opérateur doit pouvoir ajuster ou stopper le nettoyage à tout moment

Le choix de la ou les méthodes de nettoyage pour une façade donnée nécessite une **étude de mise au point préalable en 4 phases**, dont l'objectif est de définir le protocole de nettoyage :

- ✚ 1^{ère} phase : l'examen de l'existant (matériaux, état de conservation, risques...)
- ✚ 2^{ème} phase : les tests préalables sur des zones représentatives (avec différentes méthodes ou une même technique en faisant varier certains paramètres ; par exemple la taille des particules dans le cas d'un sablage fin)
- ✚ 3^{ème} phase : la constitution d'une zone de référence/témoin du résultat à atteindre.
- ✚ 4^{ème} phase : évaluation du nettoyage en laboratoire (prélèvement / coupe ou lame mince examiné au microscope optique).

Pendant et après le chantier, un **contrôle scientifique du nettoyage** peut être prévu et demandé à un laboratoire indépendant (granulométrie des poudres utilisées, prélèvements et mesures, pression (à la sortie de la buse, au compresseur), qualités des opérateurs, sérieux de la surveillance, qualité du résultat, dosage en sels résiduels, etc...)



Essais de nettoyage sur les assises de grès sombre (pietra serena) alternant avec les assises en calcaire blanchâtre (calcaire de Calissanne) dans les voûtes du porche de la cathédrale de la Major (Marseille, France)

Les **méthodes de nettoyage des façades** en pierre se sont diversifiées et les maîtres d'œuvre disposent aujourd'hui d'une gamme étendue de techniques basées sur des principes d'action différents :

Les lavages à l'eau (nébulisation et projection d'eau sous basse pression, cataplasmes) :

Méthodes proscrites : nettoyage haute pression (> à quelques bars), ruissellement d'eau.

L'eau agit chimiquement par dissolution complète ou partielle (décollement, ramollissement) des salissures indurées et par lessivage des salissures meubles. Les salissures sont généralement peu solubles. Les procédés sont simples mais lents. **L'utilisation de la pression** ajoute un effet physique (découpage, creusement) et augmente la dissolution chimique. L'utilisation de pressions supérieures à quelques bars est absolument déconseillée car l'effet physique de creusement devient alors trop important et incontrôlable. **L'utilisation de la température** augmente les solubilités et donc l'effet dissolvant de l'eau. Les lavages à l'eau ne sont pas appropriés pour enlever les organismes végétaux (lichens, mousses...).

Nébulisation (brouillard) et projection d'eau sous faible pression (<1 bar) :

Le principal problème de ces méthodes est lié à l'imbibition du matériau car elles utilisent de grands volumes d'eau. Ce problème est encore plus crucial lorsque l'on utilise des rampes car il est alors difficile d'adapter le lavage aux différents degrés d'encrassement que montre le plus souvent une façade. Les conséquences de l'imbibition sont nombreuses :

- ✚ apparition de taches brunes dues aux eaux sales qui viennent sécher à la surface des pierres et des joints,
- ✚ efflorescences de sels,
- ✚ perte de petites écailles de pierre à la suite de la dissolution des sels,
- ✚ élimination des joints trop faibles,
- ✚ infiltration d'eau par les joints, les fissures, les fixations métalliques, des matériaux à base de plâtre, implantation de circuits électriques, les cavités ou les caves, le blocage (résurgence possible très loin de la zone lavée),
- ✚ développement d'algues dans les zones les plus poreuses ou à l'arrière de la zone nettoyée,
- ✚ gel en période hivernale (nécessité de chauffage).

Une autre limite de ces techniques est qu'elles sont globales et difficiles à appliquer sur une partie seulement de la façade.

Quelques règles fondamentales sont donc à respecter telle que :

- + éviter l'emploi des rampes car le lavage dure tant que la zone la plus sale n'est pas nettoyée,
- + assurer une surveillance constante,
- + passer le plus rapidement possible au brossage (brosse douce en Nylon, laiton...pinceau ou pierres abrasives jamais de brosses en acier dur et oxydable),
- + éviter l'impact de grosses gouttes ou de jets puissants, le ruissellement continu de grandes cascades d'eau.

Le mode opératoire préconisé est la nébulisation de microgouttelettes (brouillard) à au moins 30 cm de la surface, en privilégiant l'usage de tuyaux souples pour pouvoir orienter les buses vers les zones les plus sales. Afin de limiter la zone à nettoyer, des feuilles de polyane sont à mettre en place. Si la hauteur est vraiment importante, il devient nécessaire d'installer des collecteurs reliés au réseau urbain par des descentes d'évacuation des eaux (idem au dessus des fenêtres) pour éviter le ruissellement de grandes cascades d'eau jusqu'à la base de la façade.



Nettoyage à la vapeur d'eau sur les sculptures en marbre blanc du portail de la Primatiale Saint-Trophime (Arles, France).

Les cataplasmes :

De nouvelles méthodes ont été mises au point récemment pour nettoyer une façade complète par projection d'un cataplasme humidifié. Les salissures se ramollissent au contact du cataplasme et se décollent partiellement. Le cataplasme est retiré avec une spatule en plastique souple. Un brossage doux sous arrosage permet d'éliminer les salissures restantes.

L'utilisation de cataplasmes prolonge l'action de l'eau sans apport excessif et sans pression. On contrôle l'avancement du nettoyage à intervalles réguliers en découpant des petites fenêtres. Les risques de creuser le support sont minimisés. L'expérience montre toutefois que ces méthodes ne permettent pas d'enlever des salissures très indurées et épaisses.

Dans le procédé Tollis ®, on a recours à de la laine de roche humidifiée, projetée puis talochée. Des capillaires préalablement fixés à différentes hauteurs dans les joints, permettent une alimentation en eau. Cette alimentation est commandée par des sondes qui mesurent la teneur en eau du cataplasme. Le nettoyage est long (plusieurs semaines) et les risques d'infiltration par les joints persistent en raison de l'alimentation en eau pas toujours correctement maîtrisée (fuites...). Cette méthode est adaptée pour l'élimination des salissures moyennes à fines.

Une autre méthode utilise la pâte Lutum, un mélange à base d'argiles fibreuses et de charges (sable...). La pâte est projetée humide sur la salissure et reste humide naturellement de par sa composition (forte rétention en eau des argiles de type attapulgite). Elle permet surtout l'élimination

des salissures fines (intérieurs). Le rinçage est préconisé avec un système injection/extraction qui réduit encore la consommation d'eau.

Les nettoyages mécaniques (sablage ou gommage fin et l'hydrosablage fin) :

Méthodes proscrites : disquuse, chemin de fer (retaille), sablage grossier (particule de diamètre supérieur à 0.3 mm (300µm).

Le principe de toutes ces méthodes est l'**abrasion mécanique**. Elles ne peuvent donc pas convenir pour éliminer des taches dues à des produits imprégnant la pierre ou la brique, mais sont particulièrement adaptées pour enlever les dépôts de surface.

Les brosses :

Le brossage est utile pour dépeussierer, pour améliorer le lavage à l'eau, pour éliminer les recouvrements biologiques (algues, mousses et lichens). Il est indispensable de n'utiliser que des brosses douces, en laiton, à chiendent, en Nylon, de soie, etc...

Les outils fins (fraise de dentiste, scalpel médical, etc...) :

La fraise de dentiste est à employer localement (car ce sont des méthodes lentes) pour enlever le plus gros d'un encroûtement résistant (s'arrêter avant d'arriver sur l'épiderme et employer alors une méthode plus douce). Le scalpel est préconisé pour éliminer localement les champignons, les lichens, les algues et les mousses après un traitement biocide.

Le sablage fin (ou gommage) :

Le sablage fin avec des poudres de diamètre inférieur à 200 - 150 microns est recommandé aux conditions suivantes :

- + pression inférieure ou égale à 5 bars,
- + taille, dureté et forme des particules (cf. tableau 1) et taille de la buse, adaptées,

Nature de la poudre	Dureté Mohs
alumine	9
quartz (sable)	7
verre	6 à 7
calcite	3
noyaux de fruits	?

Tableau 1 : dureté des poudres les plus courantes

- + projection de la poudre perpendiculairement ou tangentiellement à la surface à nettoyer. Les appareillages les plus sophistiqués ont un système de projection par vortex très doux (impact tangentiel et non perpendiculaire à la surface).

Les **avantages du sablage fin** sont les suivants :

- + aucun risque d'imbibition d'eau donc utilisable en hiver,
- + pas de risques d'infiltration d'eau, d'apparition d'efflorescences, de taches,
- + peut être utilisé localement,
- + très grande variété de poudres et de machines.

Ses **inconvénients et limites** sont les suivantes :

- + les nuisances engendrées - poussières : le sablage nécessite le port d'un casque contre l'aspiration des poussières pour l'opérateur et un abri pour limiter la diffusion des particules dans l'environnement (passants, autres façades, gouttières...). Un brouillard d'eau, une aspiration des poussières peuvent diminuer ces nuisances - bruit : au niveau de la buse (jet d'air) et du compresseur
- + le risque de dépolir (mater) les surfaces polies, brillantes,

- ✚ une faible efficacité sur des organismes végétaux (lichen, mousses...),
- ✚ le risque important de dommages si le manipulateur n'est pas expérimenté, attentif, etc...
- ✚ à ne pas utiliser sur du décor sculpté, de la sculpture (passer en microsablage <50 µm), ni sur des zones fragiles,
- ✚ des poussières restent accrochées sur la pierre, d'où des teintes blanches, des polluants résiduels possibles. Il faut toujours terminer par un jet d'air ou un rinçage à l'eau
- ✚ la mauvaise vision de ce que l'on fait. Ne pas aller trop vite et s'arrêter dès que des dégradations apparaissent.



Essai de nettoyage par sablage fin sur le soubassement en pierre dure d'un bâtiment (Marseille)

L'hydrosablage fin (ou hydrogommage) :

Cette méthode présente certains avantages du sablage fin à sec et réduit ses inconvénients :

- ✚ peut être utilisée localement,
- ✚ très rapide sur des surfaces planes,
- ✚ très grande variété de poudres et de machines,
- ✚ limite la production de poussières aériennes.

Ses inconvénients sont ceux inhérents aux méthodes de lavage à l'eau, et d'autres plus spécifiques :

- ✚ inopérante en saison froide car risque d'imbibition d'eau,
- ✚ risques d'infiltration d'eau, d'apparition de taches ou d'efflorescences,
- ✚ les abrasifs peuvent contenir des produits polluants solubles,
- ✚ la récupération du sable mouillé est fastidieuse

A noter que si l'eau arrive à basse pression, elle diminue l'action abrasive. A l'inverse, l'eau est amenée sous forte pression, génère une abrasion plus forte qu'à sec.

Les nettoyages chimiques (tensioactifs, les complexants...) :

Méthodes proscrites : nettoyages avec des bases (potasse, soude, pH 9 à 14) ou des acides (pH 1 à 5), exceptés pour des applications localisées sur des taches ou des peintures.

Les nettoyages chimiques utilisent des produits qui vont réagir chimiquement (par solubilisation, solvantation, complexation...) avec les salissures pour les éliminer. Ces méthodes sont particulièrement **adaptées pour éliminer les taches** dues à une substance ayant imprégné le matériau en profondeur. Certaines ont un **inconvénient majeur** : elles introduisent des **sels solubles** dans le matériau.

L'utilisation de produits sous forme de gels, de pâtes ou de compresses permet de prolonger le contact du produit sur la surface à nettoyer et donc d'optimiser son action. Un autre avantage pour les produits très actifs est de limiter les risques de coulures qui marqueraient le parement sous la zone traitée. Plus le gel est consistant, plus il pourra être appliqué en épaisseur et plus il sera efficace. Les produits utilisés en solution pénètrent dans le matériau et sont difficiles voire impossibles à rincer totalement. Ces techniques ont des temps d'action et d'application longs.



Pâte de nettoyage contenant un complexant (EDTA) appliquée sur des moulures sculptées de l'église Saint Pierre (Avignon, France).

La pâte à base de complexant :

Mélange = EDTA (disodique) + bicarbonate d'ammonium + bicarbonate de sodium + carboxyméthylcellulose + eau (exemple de proportions en grammes : 25+30+50+60+1000). L'EDTA (acide éthylène diamine tétraacétique) est un complexant du calcium. La carboxyméthylcellulose est un matériau gélifiant et absorbant.

Initialement mis au point pour la restauration d'œuvres d'art sous le nom de terme de pâte « Mora » du nom de ces inventeurs italiens, ce mélange est aussi employé sur les façades.

La pâte s'applique de manière répétée de 1 à 24 heures, puis la compresse est recouverte d'une feuille de polyéthylène pour limiter l'évaporation. Elle est retirée avec une spatule. Un rinçage abondant est ensuite nécessaire.

Ses principaux **avantages** sont les suivants :

- + produit sans danger (pH 7.5) – peut toutefois attaquer la pierre calcaire si on prolonge les applications.
- + performant pour des applications locales

Les tensioactifs (détergents organiques, savons) :

Les tensioactifs améliorent le pouvoir mouillant de l'eau et facilitent la mise en solution des salissures dans les lavages à l'eau. Ils sont utiles dans le cas de salissures grasses. On préférera les tensioactifs non ioniques, neutres.

Les pelables :

Il s'agit de produits récents à base de latex ou caoutchouc soluble, stabilisé. Ce sont des liquides qui s'appliquent au pinceau ou au pistolet de peintre sur de grandes surfaces. Une fois le film polymérisé, on le retire. Les salissures, si elles ne sont pas trop indurées et adhérentes sur la pierre, sont arrachées avec le film de latex.

Ce type de nettoyage est particulièrement **bien adapté au nettoyage de murs à l'intérieur** des édifices, dans lesquels l'utilisation d'eau, de particules est difficile à envisager. Il est performant pour

nettoyer des pierres empoussiérées, noircies par la fumée. Il est **peu efficace pour éliminer des croûtes noires** qui se forment sur les parements extérieurs des bâtiments.

Les nettoyages particuliers (de taches diverses) :

La nature des taches que l'on peut trouver sur une façade est incroyablement variée : oxydes, sulfates de fer, de cuivre, ciment, noir de fumée, matière organique, bitume, graffiti...

Il existe de multiples « recettes » ainsi que des produits prêts à l'emploi dans la littérature. Il est néanmoins toujours prudent de **faire des essais dans une zone peu visible** avant de s'engager dans le nettoyage de la tache entière. On veillera aussi à utiliser des produits sans résidus nuisibles (sels solubles, matière organique...) qui auraient des effets secondaires indésirables.

En règle générale, si l'imprégnation est superficielle et récente, il est possible d'éliminer totalement la tache. Si l'imprégnation est profonde et / ou ancienne, on ne peut qu'espérer atténuer, éclaircir la tache. Il est donc primordial de procéder au nettoyage le plus rapidement possible.

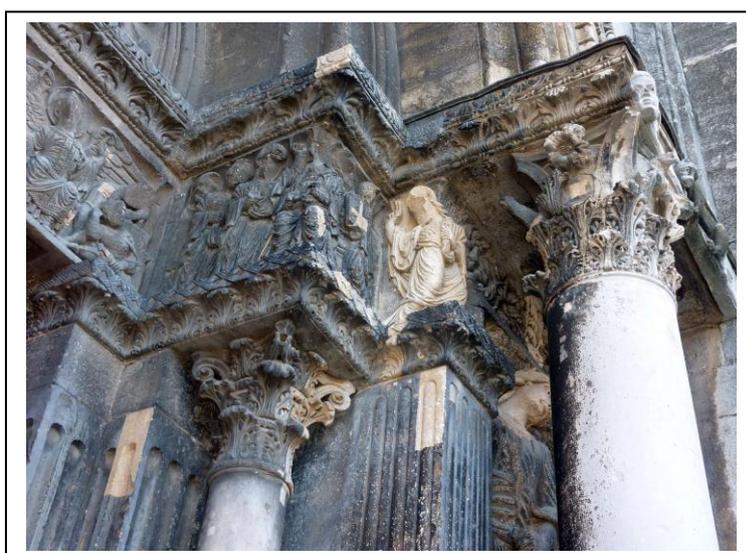
La solution de facilité qui consiste à user la surface tachée doit être considérée comme un dernier recours lorsqu'aucune autre méthode n'a donné satisfaction et lorsque le nettoyage est absolument nécessaire.

Quand on veut éliminer une tache, le risque est grand de l'étaler en dispersant le produit dans un plus gros volume de pierre. Pour limiter ce risque, il est recommandé d'appliquer tout d'abord les produits, notamment en compresse, sur une plus grande surface que celle couverte par la tache.

3.2. Le nettoyage des sculptures

Les méthodes de nettoyage des sculptures sont le microsablage (particules de diamètre inférieur à 50µm, pression de 0,1 à 0,5 bar), l'usage des compresses, pâtes, le laser, et les appareils à ultra sons. Les avantages et inconvénient de chaque méthode sont synthétisés dans le tableau 2 en page suivante.

Il faut noter que le **laser**, réservé pour le moment au nettoyage des sculptures, est un appareillage que l'on tente de développer aussi pour des nettoyages de façades. L'évaluation de la qualité du nettoyage par laser se fait principalement par examen visuel, faute de pouvoir réaliser des prélèvements destructifs sur une statue.



Essais de nettoyage par laser sur la sculpture de l'un des portails de la façade de l'ancienne abbaye de Saint Gilles du Gard (France).

Procédés	Principe	Paramètres	Risques pour l'objet	Risques pour l'opérateur	Observations
MICROSABLAGE	projection d'une poudre (alumine, poudre végétale, quartz, microfine de verre...)	nature, granulométrie, morphologie des poudres, distance pièce à main substrat, pression d'air, taille de l'ouverture de la buse	surabrasion, perte de parties fragiles	silicose si poudre ou substrat libèrent des particules très fines de silice Irritation des yeux et des muqueuses	Port d'un scaphandre obligatoire Dépôt de poudres un peu partout Rendu final souvent plus jaune A ne pas mettre entre des mains inexpérimentées
COMPRESSES de cellulose imbibées de produits chimiques	dissolution et/ ou chélation des espèces chimiques réactives contenues dans la salissure	pH, température, concentration et nature de produits chimiques, teneur en eau de la compresse, durée d'application	efflorescences salines, attaque chimique	brûlures chimiques	Pas de contrôle en continu Rendu final souvent plus blanc A ne pas mettre entre des mains inexpérimentées
COMPRESSES d'attapulgite ou sépiolite imbibées d'eau	dissolution et ramollissement des salissures	température, teneur en eau de la compresse, durée d'application	pas de risque particulier	pas de risque particulier	Pas de contrôle en continu Efficace seulement sur matériaux très peu encrassés
PATE MORA	dissolution et/ ou chélation des espèces chimiques réactives contenues dans la salissure	pH, température, concentration et nature de produits chimiques, teneur en eau de la compresse, durée d'application	efflorescences salines, attaque chimique	brûlures chimiques	Pas de contrôle en continu Rendu final souvent plus blanc A ne pas mettre entre des mains inexpérimentées
LASER	A faible densité d'énergie : vaporisation des suies contenues dans la salissure A forte densité d'énergie : création d'une onde de choc	densité d'énergie, fréquence et durée des impulsions, longueur d'onde	A forte densité d'énergie : attaque de l'épiderme. Si durée d'impulsions trop longues, vitrification superficielle	destruction irrémédiable de la rétine si tir dirigé dans l'œil	Port de lunettes obligatoire Rendu final plus jaune A ne pas mettre entre des mains inexpérimentées Préconsolidation non nécessaire
APPAREIL A ULTRASONS	décollement des incrustations par vibration	fréquence des ultrasons, superficie et qualité du contact avec le matériau,	Décollements des épidermes fragiles	pas de risque particulier	A n'utiliser que sur support sain, pour éliminer des incrustations (par exemple de calcite)

Tableau 2 : procédés de nettoyage de la statuaire

4. La consolidation superficielle

La consolidation consiste à appliquer un produit pour **améliorer la cohésion de la pierre** en renforçant l'adhésion des constituants entre eux. La consolidation n'est indispensable que lorsque la pierre présente de graves phénomènes de détérioration et d'altération. C'est donc un traitement à appliquer localement, uniquement sur les zones dégradées. Comme tout traitement, la consolidation ne doit pas induire de risque de dégradation ultérieure, par exemple par la formation de sous-produits dangereux (sels solubles). Enfin, le traitement de consolidation doit annihiler les effets de la dégradation, redonner sa cohésion au matériau, mais il ne supprime pas les causes de la dégradation et ne protège nullement la pierre contre une reprise de l'altération.

De nombreux types de produits de consolidation ont été employés sur les monuments (cf. tableau 3). Certains ont été abandonnés, d'autres sont encore utilisés avec des restrictions particulières liées à leurs avantages et inconvénients (cf. tableau 4).

Famille	Type	Exemple
résines organiques	époxy	SOL 28-15 (SINMAST)
	acrylique	Paraloïd B72 (ROHM et HAAS)
silicates inorganiques	silicate de sodium, potassium	-
silicates organiques	tri-éthoxy-silane (silicate d'éthyle) TEOS	Wacker OH (Hoegst) RC 70 (Rhodia) Tegovakon (Goldschmidt)
	alkyl-tri-alkoxy-silane (ATAS)	Brethane (Colebrand Ltd) Z -6070 (Dow Corning) Dri-film 104 (General Electric) Tegovisin HL 100 (Goldschmidt)
	alkyl-aryl-polysiloxane (AAP)	RC 11309 (Rhône Poulenc)
mélanges	TEOS + ATAS	Wacker H (Hoegst) Tegovakon T (Goldschmidt)
	ATAS + acrylique	Cocktail Bolognese
	TEOS + AAP	RC 90 (Rhodia)

Tableau 3 : les différents types de produits consolidants.

Type	Remarques
époxy	utilisées surtout comme colles, bouche-pores
acrylique	utilisées surtout comme fixatifs de surface (peintures murales)
silicate de sodium, potassium	non efficaces, générateurs de sels solubles, parfois proposés comme hydrofuge de masse
tri-éthoxy-silane (ou silicate d'éthyle) TEOS	généralement efficace. Non recommandé sur certains grès argileux peu efficace sur marbre cristallin, sur granite
alkyl-tri-alkoxy-silane (ATAS)	<i>propriétés hydrofuges</i>
alkyl-aryl-polysiloxane (AAP)	utilisé en Angleterre sur objets de musée <i>propriétés hydrofuges</i> , plus souples que les polysiloxanes, utilisé entre autres sur marbre
TEOS + ATAS	<i>propriétés hydrofuges</i> , plus souples que les polysiloxanes
ATAS + acrylique	<i>propriétés hydrofuges</i> , utilisé sur marbre en Italie
TEOS + AAP	<i>propriétés hydrofuges</i> , utilisé sur marbre en Italie

Tableau 4 : principales caractéristiques des différents types de produits consolidants.

A l'heure actuelle, le silicate d'éthyle (TEOS) est le produit le plus employé. C'est un liquide incolore, transparent et solvanté dont la viscosité est voisine de celle de l'eau. Il se compose d'un mélange de TEOS (tri-éthoxy silane = $\text{Si}(\text{OC}_2\text{H}_5)_4$), de solvants de type acétone (25%) et de catalyseurs. Au contact de l'humidité de l'air et de l'eau absorbée dans la pierre, il s'hydrolyse pour donner un gel de silice hydratée (SiO_2) et des solvants organiques qui se volatilisent (alcool éthylique) selon la réaction suivante :



Durci, il ne représente que 30 % de son volume initial et de ce fait réduit peu la porosité de la pierre traitée, ce qui permet de respecter les propriétés de transfert (capillarité, séchage...) du matériau tout en améliorant sa cohésion en profondeur.

Les produits sont appliqués au pinceau, à la brosse ou pulvérisés. La bonne pénétration du produit est prépondérante dans l'efficacité du traitement. On a parfois recours à des compresseurs ou même à des imprégnations par immersion sous vide pour améliorer la pénétration du produit.

Problèmes de réversibilité : à efficacité équivalente, on doit préférer le produit le plus réversible. Mais, en réalité, il est pratiquement impossible d'extraire de l'intérieur d'une structure poreuse un produit que l'on a fait pénétrer et durcir pour rétablir la cohésion du matériau.

Enfin, des travaux de plus en plus nombreux montrent que la **consolidation** est **dangereuse sur des pierres contenant des sels solubles** (chlorures, nitrates, sulfates...) : il a été constaté que la consolidation accélère la dégradation de ces pierres si elles contiennent seulement quelques dixièmes de pourcent de ces sels.

5. Le dessalement

Les sels sont les principaux agents de dégradation de la pierre à cause des pressions élevées qu'ils exercent lorsqu'ils cristallisent. Certains sels sont de plus, hygroscopiques : ils réagissent selon l'humidité relative de l'air. Au dessus d'une humidité dite d'équilibre (spécifique à chaque type de sel, exemple H_{eq} (NaCl) = 75% à 20°C), ils forment une solution saline qui peut migrer dans la porosité de la pierre. Au dessous de ce seuil, ils cristallisent. L'alternance naturelle ou artificielle de phases de séchage et d'humidification de l'air (chauffage, ensoleillement...) entraîne donc une succession de cristallisations qui multiplie l'effet des sels sur la pierre.

Les principales méthodes de dessalement sont les bains (réservés aux objets mobiles ou aux pierres déposées) et les compresses (argiles, celluloses de différentes granulométries) plus efficaces si l'on ne peut employer les bains. Il existe d'autres méthodes (électro-osmose) peu connues et d'efficacité douteuse.

Le dessalement par compresse est une opération réaliste et utile quand il s'agit d'éliminer des sels sur de faibles épaisseurs de pierre. L'expérience montre qu'il est impossible de dessaler réellement une maçonnerie contaminée à cœur.

Le contrôle d'une opération de dessalement se fait par différentes méthodes analytiques : mesure de la conductivité globale du matériau dans un volume d'eau donné, dosage des sels solubles, etc...



Projection de poudre de cellulose et d'eau pour dessaler superficiellement la pierre sur la cathédrale de la Major (Marseille, France).



Dessalement par compresses appliquées par projection d'un mélange à base d'argile sur une statue.



Pièce archéologique dans un bain de dessalement en préparation.

Les techniques associées sont basées sur la mise hors d'eau des édifices (réfection des toitures et des systèmes d'évacuation des eaux pluviales) et la lutte contre les remontées capillaires. Cette dernière est assurée soit par la mise en place d'un drainage efficace, soit par la création d'une barrière imperméable par intercalation de feuilles de plomb à la base des murs ou par injection de produits hydrofuges dans la maçonnerie. L'efficacité de ces procédés dépend grandement de la qualité de la mise en œuvre, c'est à dire du sérieux de l'entreprise et du contrôle qui est fait lors de l'opération.

Il existe des **méthodes alternatives au dessalement**. Certaines sont provisoires : par exemple, on peut appliquer sur la pierre un cataplasme sacrificiel qui va avoir pour rôle de stocker les sels et de subir, à la place de la pierre, les effets des cristallisations salines. D'autres sont théoriquement des solutions à long terme. Il s'agit non plus d'éliminer les sels mais de les identifier précisément et de réguler le climat à proximité de la pierre en maintenant notamment des conditions hygrométriques stables et une humidité relative supérieure à l'humidité d'équilibre des sels présents. Les sels ne cristallisent plus et l'évaporation est réduite. En pratique, on obtient ce résultat en fermant l'édifice, la salle pour limiter les échanges avec l'extérieur (confinement) et dans les pires des cas, on est amené à mettre en place une véritable climatisation active. Ce type d'intervention est cependant encore peu répandu en France et plus fréquent en Italie par exemple. Il implique une surveillance régulière pour contrôler l'évolution de la pierre et prévenir d'éventuelles colonisations biologiques dues à l'humidité ambiante.



Autel placé dans une enceinte provisoire permettant de stabiliser l'humidité et la température autour du marbre attaqué par les sels, dans l'église de l'ancienne abbaye de Gellone (Saint Guilhem le Désert, France).

6. Les réparations

Selon le type de dégradation, on s'orientera vers un remplacement de la pierre ou d'une partie superficielle de la pierre (bouchon, plaquette) ou vers un mortier de réparation (ragréage, modelage, réfection d'enduits, solins pour colmater des fissures, refixer des plaques et des écailles, rejointoiement...). Les **problèmes de compatibilité** avec le support sont fréquents et limitent la durabilité de la réparation. Pour assurer une bonne compatibilité entre la pierre originale et la pierre ou le mortier de réparation, il faut veiller à minimiser les écarts entre les matériaux concernant les propriétés suivantes :

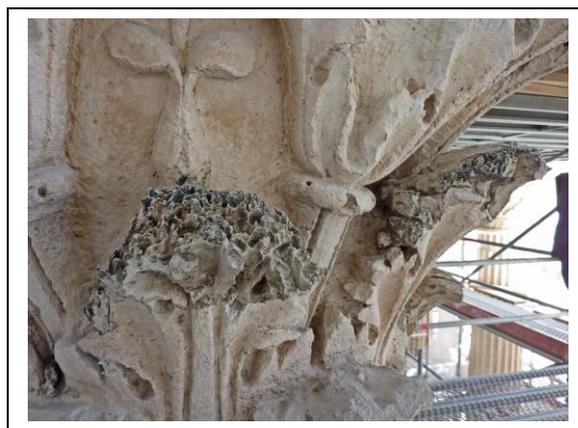
- ✚ la couleur et l'aspect de surface,
- ✚ la capillarité,
- ✚ le module d'élasticité (rigidité),
- ✚ les résistances mécaniques (flexion, compression),
- ✚ la perméabilité à la vapeur d'eau,
- ✚ les dilatations hydriques et thermiques.

Un mortier est constitué d'un mélange d'agréats (sable siliceux, ou calcaire), de liants (plâtre, chaux aérienne, chaux hydrauliques, ciments...), d'eau, et éventuellement d'adjuvants destinés à améliorer ses performances (ouvrabilité, mise en œuvre, compatibilité et durabilité).

Il faut éviter d'employer des produits trop adhérents, souvent à base de ciment, qui sont difficilement réversibles et très rigides. Le ciment a un autre inconvénient qui restreint son utilisation dans la formulation des mortiers de restauration de la pierre : il contient aussi des sels solubles qui, on l'a vu précédemment, sont très actifs dans la dégradation de la pierre et des autres matériaux poreux.

En règle générale, on utilisera des mortiers moins résistants, plus souples, plus capillaires et plus perméables de façon à privilégier la dégradation future du matériau de réparation par rapport à la pierre originale. Ces mortiers sont généralement à base de chaux aérienne (CL90), de chaux hydrauliques naturelles (NHL 2 et NHL 3.5). Certains mortiers dits prêts à l'emploi constitués d'un mélange savamment dosé en chaux et liants hydrauliques (ciment blanc...) et adjuvantés pour améliorer leur performance, offrent une alternative intéressante tant du point de vue de la compatibilité que de celui de la durabilité.

Le plâtre est un liant à éviter (hormis sur les maçonneries déjà au plâtre ou au plâtre et chaux), car il est soluble et dans certaines conditions, on peut le considérer en fait comme un véritable sel soluble (sulfate de calcium = gypse) susceptible d'attaquer la pierre.



Dissolution de feuillages refaits au plâtre au XIXe sur un chapiteau romain de la maison carrée (Nîmes, France).

7. La consolidation interne et le renforcement

On utilise des **collages époxy pour refixer des écailles** complètement ou presque complètement détachées de la pierre et pour neutraliser des fissures. Les plans de collage ne sont jamais tapissés de colle (risque de barrière étanche, de point fort...) mais on procède par petits points de collage et le reste des vides est rempli avec un mortier fin ou un coulis injecté au moyen d'une seringue.

Lorsque les pièces à coller sont de taille et de poids importants, on réalise des **goujonnages** en insérant dans les deux pièces à joindre (bras de sculpture cassé par exemple) un goujon, pièce de renfort en matériau inoxydable métallique (inox, laiton, titane) ou fibres de verre ou de carbone. On préfère placer plusieurs petits goujons répartis régulièrement sur la face à refixer plutôt qu'un gros goujon central. On a longtemps utilisé du fer qui en s'oxydant, se dilatait et fissurait les pièces qu'il joignait. Le produit de scellement a aussi son importance pour l'efficacité et la durabilité du goujonnage. On utilise à l'heure actuelle les colles époxy. Plusieurs cas difficiles ont montré qu'il faut toujours minimiser le volume de colle, en évitant des trous trop gros qui imposeraient des remplissages considérables et en formulant des produits très chargés, riches en matières inertes (poudre de pierre, microsilice...). Ceci dans le but de limiter les gonflements et échauffements provoqués par de trop importants volumes de colle.

A l'échelle d'une maçonnerie qui flue ou montre une instabilité structurale, il est courant aujourd'hui de pratiquer une injection de micromortier, sous la forme d'un coulis, très fluide, de manière à colmater les vides et à renforcer le mur. Ces coulis ne doivent pas avoir des propriétés mécaniques très différentes de la maçonnerie qu'ils renforcent, ni ne doivent produire de sels solubles ou de réaction avec les matériaux de constitution. On évite notamment l'usage des liants hydrauliques (ciments et chaux hydrauliques) lorsqu'on suspecte la présence de plâtre dans la maçonnerie à traiter (risque de formation d'ettringite gonflante et de destruction de l'ouvrage). Les formulations les plus courantes sont réalisées à base de chaux hydrauliques (NHL 3.5). La chaux aérienne qui fait sa prise par carbonatation avec le CO₂ de l'air ambiant, n'est pas appropriée comme liant dans ce type de coulis, mais elle est parfois utilisée comme charge inerte.



*Réassemblage d'une meule en basalte cassée en deux fragments par collage
(site archéologique de Volubilis, Maroc).*

8. La protection

8.1. Hydrofugation et produits hydrofuges

L'hydrofugation a pour but d'empêcher le passage de l'eau liquide à travers la surface de la pierre. Elle doit être envisagée uniquement si la pierre présente des dégradations causées de façon certaine par les eaux. Il est vrai que la présence d'eau est le principal facteur de dégradation des pierres car elle transporte les sels solubles, permet les colonisations biologiques, le gel, les dissolutions sous les pluies et les ruissellements...

Il faut noter que l'eau agit au sein de la porosité du matériau par imbibition, mais aussi sur sa surface, par exemple lorsqu'elle ravine par dissolution un marbre. C'est pourquoi il peut s'avérer utile d'hydrofuger non seulement des matériaux poreux et capillaires mais aussi des matériaux réputés imperméables mais sensibles à la dissolution superficielle.

Les produits hydrofuges modernes ne sont pas des bouche-pores mais agissent en modifiant les propriétés superficielles des minéraux de la pierre. Ce sont des polymères de la famille des silicones ou des résines acryliques fluorées. Ils rendent leur surface non mouillante en diminuant l'énergie de surface et la tension superficielle. Les produits sont très dilués (en phase aqueuse ou solvantée), et la proportion de matière introduite dans la porosité du matériau est faible, inférieure à 10%.

L'hydrofugation a une efficacité dont l'importance et la durabilité dépendent de la pierre, du produit et de la qualité de l'application (les quantités et les conditions climatiques sont importantes). Nous connaissons des traitements encore efficaces après 30 ans tout de même pour certaines applications tests réalisés sur la cathédrale de Nantes. C'est un traitement qui peut modifier la couleur, diminuer la vitesse de séchage et la perméabilité à la vapeur d'eau du matériau. Il faut donc éviter de traiter des surfaces derrière lesquelles l'eau peut arriver (base de mur soumise à des remontées capillaires, appareillage présentant des fissures, des joints défectueux, intrados d'arc ...), car l'évaporation de cette eau est difficile et sa rétention favorise les altérations. En particulier, des études récentes indiquent que de faibles teneurs en sels solubles (chlorures, sulfates ou nitrates) suffisaient à provoquer des altérations considérables dans une pierre hydrofugée traversée par de l'eau liquide. Les hydrofuges résistent mal à un contact permanent avec l'eau liquide et ne doivent donc pas être appliqués sur des surfaces horizontales ou avec des dépressions où l'eau pourrait stagner. L'hydrofugation s'applique sur l'ensemble d'une sculpture, d'une façade et ne peut être un traitement ponctuel (contrairement à la consolidation).

Le rôle du support est primordial dans l'efficacité et la durabilité des traitements hydrofuges : avant d'hydrofuger, il est donc indispensable de réaliser des essais au cas par cas sur les différents types de pierres du monument.

Des méthodes de protection alternatives existent : les statues du parc de Versailles sont couvertes d'une bâche (géotextile respirant) durant la saison froide (protection contre les pluies et le gel). Pour la même raison, en Allemagne, les statues sont couvertes d'un caisson en bois en hiver. Enfin, certains monuments qui ont connu de graves dégâts (nef ou mur effondré) et qui sont susceptibles de subir des infiltrations d'eau sont protégés par un contre-mur en ardoise, bardeaux.

8.2. Produits anti-pigeons

Ces produits ont subi une évolution remarquable en vingt ans qui illustre bien les progrès de la conservation de la pierre et des biens culturels en général. Jusqu'en 1990, on appliquait des gels collants et des pics inesthétiques, qui tachent la pierre à cause de leur produit de fixation. Plus sagement, lorsque cela était possible, on tendait un "filet" invisible pour empêcher les oiseaux de passer, mais les oiseaux passaient l'obstacle et se retrouvaient enfermés sur les sculptures.... Depuis 5 ans, une nouvelle technologie est apparue, venue d'Italie. Elle est basée sur le principe du fil à vache. Un générateur alimente un circuit de câbles électriques fins qui est installé sur les éléments exposés avec beaucoup de soin, de manière à être invisible du public. Les impulsions sont douloureuses car délivrées sous haute tension, mais leur intensité et leur durée sont très faibles, ce qui les rend inoffensives. De très nombreux édifices sont équipés de ces dispositifs qui semblent très efficaces et satisfaisants sur le plan esthétique comme pour la conservation de la pierre.

8.3. Produits anti-graffitis

Devant l'acuité du problème des graffitis, des produits de protection sont apparus sur le marché. On distingue 3 classes principales en fonction de leur durée d'utilisation :

- + les sacrificiels solubles et peu stables, (polysacharrides) que l'on enlève avec le graffiti (à l'eau chaude ou sous pression 30bars). Ils sont intéressants car réversibles.
- + les pelables, souvent des bases acryliques, dont on élimine seulement une partie de la couche lorsqu'on enlève le graffiti. Ils sont filmogènes et très visibles (film brillant).
- + les permanents, qui sont des produits très comparables aux hydrofuges et se nettoient des dizaines de fois sans perdre leur propriété. Ils sont irréversibles et imposent d'hydrofuger une façade, une pierre qui n'en a pas besoin, si ce n'est pour la protéger des graffitis!

Une autre solution existe qui consiste à procéder à l'application de revêtements sacrificiels (badigeons, peinture couvrante) en évitant tout risque d'abîmer le support du graffiti.

9. Le moulage

On a de plus en plus tendance à mettre la statuaire de plein air originale encore relativement bien conservée, définitivement à l'abri dans un musée ou une réserve tandis qu'une copie remplace l'original sur le monument. Ces copies ont été longtemps exécutées en pierre par des sculpteurs. Très neuve d'aspect, avec de nombreuses parties plus ou moins adroitement restituées, elles étaient parfois vieillies à la demande de l'architecte, à coups de ciseaux ou par un sablage général. Le résultat n'était pas toujours très satisfaisant. Ces copies sont de plus en plus souvent restituées à partir d'un moulage de la sculpture originale, selon des techniques traditionnelles mais avec des produits très performants issus de technologies modernes (élastomères, microbétons).

9.1. Les produits de moulage

Ce sont des systèmes comprenant un agent de démoulage (ou de protection) et un produit de moulage ou de prise d'empreinte. Actuellement, les produits les plus utilisés sont l'alcool polyvinylique plus ou moins dilué comme agent de démoulage et les silicones élastomères vulcanisables à froid (RTV = Room Temperature Vulcanised) combiné avec un durcisseur comme produit de moulage. Le choix de l'élastomère, thixotropé ou liquide, résistant, souple ou rigide, va dépendre des formes de l'objet à mouler, de la fidélité exigée (notamment dimensionnelle parce que certains types d'élastomères se déforment plus que d'autres), des conditions de moulage (température, humidité, propreté de la surface) et de la prévision du nombre et du type de tirages. Certains élastomères ne supportent pas les tirages en résine, d'autres ne polymérisent pas ou mal en présence de certains éléments (soufre, plomb...).

Le moulage est une opération complexe qui doit être confiée à un mouleur professionnel. De plus, il est vivement conseillé de faire appel à un atelier de restauration où l'on pratique le moulage pour qu'un restaurateur compétent puisse intervenir sur la pierre dégradée, si son l'état le nécessite, avant le moulage. En effet, la prise d'empreinte comporte des risques pour l'original. Ces risques, d'autant plus importants que la pièce est ancienne et dégradée, sont liés à une mauvaise protection de la pierre. Si les huiles silicones les plus mobiles imprègnent la pierre, il peut en résulter divers dommages visuels tel qu'un assombrissement ou un jaunissement généralisé ou la formation de taches colorées, luisantes ou, pire, une véritable adhérence du silicone qui provoque des arrachements du support au démoulage. On utilise des agents de protection ou agents de démoulage qui protègent l'original et facilitent le démoulage sans nuire à la qualité de la prise d'empreinte. Ces agents de démoulage sont réversibles et sont éliminés délicatement à l'aide de compresses d'eau ou à la vapeur. Néanmoins, le moulage peut avoir un impact sur les propriétés de la pierre, la prise d'empreinte étant responsable soit d'un colmatage partiel de la porosité par des résidus du produit de démoulage, soit d'un effet hydrophobe dû à la pénétration de très faibles quantités d'huiles silicones dans le matériau original.

9.2. Les produits de restitution (tirage)

Il existe deux grandes familles de matériau à couler ou à estamper dans le moule pour réaliser une copie :

- ✚ les résines (polyester)
- ✚ les microbétons (à base de ciments), eux-mêmes divisés en deux sous-familles - les préformulés vendus en sac prêts à l'emploi et ceux qui sont faits sur chantier de façon traditionnelle à partir de matières premières traditionnelles, de performance plus aléatoire.

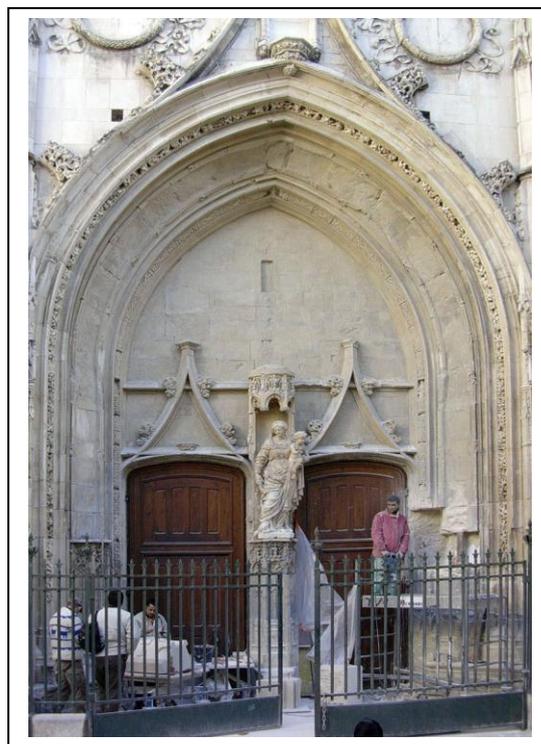
Conclusions

Il existe toute une gamme d'interventions pour assurer la conservation de la pierre. Le choix des techniques à mettre en œuvre dépend des résultats du diagnostic préalable et doit être validé par des essais au cours de l'étude préalable aux travaux. Il est souvent nécessaire de tester plusieurs méthodes de traitement afin de sélectionner la plus satisfaisante pour une problématique donnée (dessalement, consolidation...) ou d'en mettre au point une nouvelle.

L'expérience nous enseigne qu'il faut toujours être prudent et ne pas utiliser sans précaution les nouveaux produits, les nouvelles méthodes qui doivent être testées en laboratoire, évaluées dans des zones d'essai ou sur des maquettes, avant d'être mis en œuvre sur de véritables chantiers de restauration. Il ne faut jamais négliger les effets secondaires inattendus et à moyen ou long terme d'un nouveau produit ou d'une nouvelle technique dont les résultats immédiats sont très séduisants. Des revues scientifiques et techniques, des colloques et des ouvrages spécialisés exposent régulièrement les résultats de la recherche dans ce domaine de la conservation des biens culturels. Il est indispensable de se tenir informé de ces résultats ou d'interroger les personnes compétentes et informées.

Les interventions sont souvent irréversibles, techniquement délicates et nécessitent des produits et des matériels spécifiques. Elles doivent être confiées aux professionnels expérimentés, ayant reçu une formation de restaurateur.

Enfin, pour éviter des interventions lourdes à cause de dégradations très importantes, il est préférable de pratiquer une maintenance régulière, un entretien programmé (surveillance + dépoussiérage et relevé des désordres) du monument et d'intervenir dès les premières manifestations d'une nouvelle altération ou dès que les conditions de conservation se dégradent. Cette nécessité de maintenance qui apparaît de plus en plus indispensable, rejoint les préoccupations actuelles qui sont regroupées sous le terme de conservation préventive.



Portail de l'église Saint-Pierre à Avignon en échafaudage et après travaux de nettoyage.

Bibliographie

Pierre et patrimoine, connaissance et conservation, BIGAS JP., BROMBLET P., MARTINET G., GAUDON P. et al., (2009) Actes Sud/Cefracor, Arles, 214 p.

Le nettoyage de la pierre (VERGES-BELMIN V. et BROMBLET P.) dossier technique, Monumental, revue scientifique et technique des monuments historiques, éditions du Patrimoine, centre des monuments nationaux, 2000, p. 220-273.

La protection des pierres, guide sur les hydrofuges de surface (VALLET J.M. . avec la collaboration de BROMBLET P., VERGES-BELMIN V., PALLOT FROSSARD I. et HENRY F.) Les cahiers techniques du Cercle des Partenaires du Patrimoine, Champs sur Marne, n°3, Cercle des Partenaires du Patrimoine, avril 2000, 55 p.

La pierre et les sels : altération par les sels, méthodes d'identification, méthodes de dessalement. VERGES-BELMIN V., BROMBLET P. (2001) dossier technique et scientifique, Paris, Direction du patrimoine, In : Monumental, p. 236-271

Consolidation et hydrofugation de la pierre, **BROMBLET P. , J.D.MERTZ, VERGES-BELMIN V. (2002) dossier technique, Monumental 2002, revue scientifique et technique des monuments historiques, éditions du Patrimoine, centre des monuments nationaux, p. 200-243.**

La protection par hydrofugation : état de l'art, conditions et évaluation d'un traitement, MERTZ JD., VALLET JM., BROMBLET P. (2008), Pierre Actual, 865, oct 2008, p. 78-84.

Dossier : joints, mortiers de pose et produits de ragréage (2^{ème} partie) Les différentes pathologies. Reflexions et préconisations, BROMBLET P. et MARTINET G. (2002), Pierre Actual, 785, janvier 2002, p. 66-77.

Laser Cleaning in Conservation, an introduction (COOPER M.). Butterworth-Heinemann, Oxford, ISBN 0 7506 3117 1, 1998, 98 p.

La méthodologie scientifique appliquée à l'étude des biens culturels. Diagnostic et évaluation technico-économique (Salvatore LORUSSO, Bruno SCHIPPA) traduit de l'italien par M. Stefanaggi, Erec, 1995, 262 p.

La conservation de la pierre monumentale en France (coordonné par PHILIPPON J., JEANNETTE D. et LEFEVRE R.A.), Presse du CNRS, Paris, 1992, 268 p. ISBN 2 87682 0595.

La restauration de la pierre (LAZZARINI L. et TABASSO M.L.), ed. ERG, trad J. Philippon, 1989, 264 p. ISBN 2 90 3689 25 3

Le laser de nettoyage de la pierre et la restauration des sculptures, (BROMBLET P. ET VIEWEGER T.), Pierre Actual, 829, septembre 2005, p 86-94.

Préserver les objets de son patrimoine, précis de conservation préventive. Collectif SFIIC, Pierre Mardaga éditeur, Sprimont, Belgique, 2001, 264 p., ISBN 2-87009-766-2