

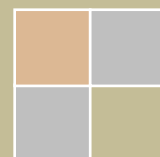
Guide « Altérations de la pierre »



2010

Association MEDISTONE

www.asso-medistone.org



L'association MEDISTONE



www.asso-medistone.org

Guide rédigé par :

Philippe BROMBLET, géologue spécialisé dans la conservation de la pierre et du bâti au Centre interdisciplinaire pour la conservation et la restauration du patrimoine (CICRP, Marseille, France), Ingénieur de recherche du ministère de la Culture et de la Communication.

MEDISTONE est une association internationale dont le but est de développer et participer à des activités de coopération, recherche scientifique, assistance technique et formation, touchant à :

- ❖ la conservation des matériaux du patrimoine (pierres décoratives et pierres de construction, terres, enduits, mortiers, mosaïques, etc),
- ❖ la valorisation des sites et monuments historiques des pays du pourtour méditerranéen.

L'association propose une démarche novatrice d'assistance aux organisations gouvernementales et autres structures méditerranéennes en charge du patrimoine culturel, depuis l'expression de leurs besoins, jusqu'à la structuration de projets collaboratifs pluridisciplinaires et d'actions intégrées.

Elle s'appuie sur un réseau de membres ayant une expérience éprouvée en matière de préservation ou de valorisation du patrimoine. Tous ont en commun de vouloir se mettre au service gracieusement de l'action publique.



Membres de l'association et collaborateurs algériens dans les jardins du site antique de Djemila, Algérie, juin 2008.

Le présent guide est le fruit du travail de membres de l'association.

SOMMAIRE

Introduction	2
1. Les différentes figures d'altération de la pierre	3
2. Les conditions environnementales, facteurs externes d'altération	4
3. Les propriétés de la pierre, facteurs internes d'altération	18
4. Le rôle de l'homme (facteur anthropique)	23
Conclusions.....	27
Bibliographie	28

© 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 1970. 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.

1. LES DIFFERENTES FIGURES D'ALTERATION DE LA PIERRE

Les altérations prennent des formes variées qui ont été recensées et décrites dans un glossaire illustré sur les figures d'altération de la pierre, document téléchargeable sur le site <http://www.international.icomos.org>.

Ce glossaire définit quelques termes généraux (altération, dégradation...). Il distingue 5 grandes catégories de formes d'altération dans lesquelles sont classées plus de 70 altérations différentes.

-  Fissures et déformation (fracture, clivage...)
-  Détachement (boursoufflure, éclatement, délitage, désagrégation, fragmentation, pelage, desquamation)
-  Figures induites par des pertes de matière (alvéolisation, érosion, dégât mécanique, microkarst, partie manquante, perforation, pitting)
-  Altération chromatique et dépôt (croûte, dépôt, altération chromatique, efflorescence, encroûtement, aspect luisant, graffiti, patine, encrassement, subefflorescence)
-  Colonisation biologique (colonisation biologique, algue, lichen, mousse, moisissure, plante)

2. LES CONDITIONS ENVIRONNEMENTALES, FACTEURS EXTERNES D'ALTERATION

Les altérations de la pierre ont de nombreuses origines et causes possibles. Elles dépendent en premier lieu des conditions environnementales. On parle aussi de facteurs externes d'altération.

2.1. Le rôle primordial de l'eau

La présence d'eau est déterminante dans l'apparition de la plupart des altérations. L'eau mobilise les sels solubles, gèle, dissout les minéraux, favorise l'implantation et l'activité des organismes vivants, modifie les propriétés mécaniques... Dans une maçonnerie ou dans une œuvre sculptée, l'eau peut avoir plusieurs origines et engendrer des altérations dans des zones très différentes.

Impact de la pluie : zone noire vs zone blanche

Le rôle de l'eau météorique (pluie, ruissellement) en fonction de l'exposition est remarquable lorsque l'on examine la distribution des dégradations sur une façade ou une statue. Il est facile de montrer que le cheminement des eaux détermine la nature et l'intensité des altérations superficielles. Ainsi, dans les grandes villes et les banlieues où la pollution atmosphérique liée au trafic automobile, aux industries et aux installations de chauffage est importante, on distingue 2 grandes zones sur un parement ou une sculpture.

✚ **Les zones blanches** sont celles qui sont exposées aux ruissellements, aux pluies battantes. La pierre est plus ou moins attaquée par les eaux qui dissolvent ses constituants les plus solubles, dont la calcite (0.02 gramme par litre). Aucun dépôt ne peut se fixer sur ces surfaces qui sont en quelque sorte lavées par les pluies.



Juxtaposition de zones blanches et de zones noires sur une travée extérieure de l'amphithéâtre de Nîmes (France).

✚ **Dans les zones noires** abritées et des pluies et des ruissellements, il n'y a pas de lessivage par les eaux, mais la vapeur d'eau des brumes et brouillards ou les eaux de condensation peuvent mouiller épisodiquement la pierre. Les particules atmosphériques se fixent sur les surfaces et sont cimentées par des cristallisations de sels, en particulier le gypse (sulfate de calcium hydraté de formule $\text{CaSO}_4, 2 \text{H}_2\text{O}$), formés en grande partie par interaction de l'eau et les polluants gazeux atmosphériques (SO_2 , NO_x) avec la pierre. Les dépôts, appelés *croûtes noires*, sont indurés, fines et lisses ou bourgeonnantes.

Il existe enfin des zones grises où la pierre est complètement abritée de tout apport d'eau, les particules se déposent et ne sont jamais cimentées. Ces dépôts de poussières meubles peuvent être très épais, en particulier à l'intérieur des édifices et sur les surfaces horizontales où les particules se fixent plus facilement. Ils se retrouvent aussi couramment à l'intérieur des édifices sur les surfaces rarement nettoyées.

En milieu moins pollué, rural, ce sont les recouvrements biologiques qui sont distribués en fonction de l'exposition de la pierre. Les surfaces exposées aux pluies, au rejaillissement ou au ruissellement se couvrent de divers revêtements biologiques souvent noirâtres alors que les surfaces sèches restent nues.



Lichens et algues noires (cyanobactéries) colonisent les parties hautes et l'ensemble des pierres exposées aux pluies ainsi que les zones de ruissellement, cloître de l'ancienne abbaye du Thoronet (France).

Les remontées capillaires du sol :

L'eau peut monter par capillarité depuis le sol jusqu'à quelques mètres à la base des murs. Une nappe phréatique subaffleurante, un sous-sol mal drainé, une contre-pente malencontreuse induisent la concentration de grands volumes d'eau au pied d'un édifice. Dans ces zones de remontées capillaires, les dégradations sont fréquentes. L'eau imbibe les matériaux qui montrent des taches d'humidité plus ou moins sombres. En se concentrant et en s'évaporant, l'eau permet aussi la cristallisation de sels solubles qui forment des efflorescences, des croûtes salines superficielles et qui, en contaminant plus en profondeur la pierre, sont capables de produire différents types d'altérations : selon le cas, la pierre se desquame (formation d'écailles) ou se désagrège (formation d'un sable) de façon uniforme ou en créant des figures particulières ressemblant à des alvéoles.



Alvéolisation de la pierre dans une zone de remontées capillaires à la base des remparts d'Aigues-Mortes (France).

Il ne faut pas systématiquement incriminer les remontées capillaires lorsque l'on constate l'apparition d'altérations à la base d'un mur. Elles peuvent être dues à l'impact des pluies battantes obliques qui frappent le pied du mur ou encore au phénomène de rejaillissement qui correspond aux éclaboussures produites par l'impact des gouttes d'eau qui explosant au contact du sol. A l'intérieur des édifices, l'humidité à la base des murs peut tout simplement être liée à un phénomène de condensation qui oblige la vapeur d'eau contenue dans l'air ambiant à se transformer en eau liquide au contact de la pierre et du sol froid ou à cause de la présence de sels hygroscopiques.

Le mécanisme physique de transfert capillaire ne s'exerce pas uniquement vers le haut mais de façon homogène dans toutes les directions. On peut ainsi dans certains cas observer des figures d'altération liées à une alimentation capillaire latérale ou descendante...



*Alvéolisation de la pierre sur le mur de soutènement du jardin du Peyrou à Montpellier (France).
Les transferts d'eau par capillarité et gravité sont descendants.*

Infiltrations au travers des maçonneries :

L'eau des pluies peut s'infiltrer à travers les maçonneries et venir s'évaporer en sous-face des corniches, à l'intrados des voûtes, des arcs en permettant la cristallisation de sels solubles et des dégradations identiques à celles que l'on observe dans les zones de remontées capillaires. Les transferts gravitaires (perméabilité) s'ajoutent aux transferts capillaires sur ces surfaces.



Zone d'humidité signalant des infiltrations d'eau de pluie au travers de la maçonnerie, ancienne cathédrale d'Agde (France).

Lorsque la pierre est peu perméable (granites, marbres, calcaires compacts...), les eaux pluviales s'infiltrant dans les joints de la maçonnerie, plus favorables aux transferts. Elles dissolvent la calcite des mortiers qu'elles rencontrent et mobilisent les phases les plus solubles des ciments (portlandite). Des concrétions de calcite se forment dans des zones de résurgence au niveau des joints où les eaux de percolation suintent et s'évaporent à la surface des pierres.



Concrétions formées à partir de joints horizontaux sur la surface des claveaux d'un petit arc dans une galerie du cloître de l'abbaye du Thoronet (France).

Enfin, l'action combinée de l'eau et de la température va être à l'origine de dégradations purement mécaniques. Ainsi, en période de gel, lors du passage de l'état liquide à l'état solide, l'eau augmente de volume de 9% et exerce des pressions internes suffisantes pour fissurer la plupart des pierres. Il faut cependant veiller à ne pas attribuer au gel les dégradations qui affectent les pierres lorsque celles-ci ne sont pas soumises à un contact prolongé avec l'eau liquide ou ne se saturent en eau que difficilement en raison de leur capacité à piéger de l'air dans leur réseau poreux.

Par ailleurs, des desquamations peuvent aussi résulter de phénomènes de dilatation différentielle qui se produisent à la surface de certaines pierres, en particulier les pierres argileuses, au gré des alternances de phases d'imbibition (pluies) et d'évaporation (séchage).



Desquamation en plaque sur le mur de l'ancien château de Capestang (France).

2.2. L'action des sels

Les sels solubles sont responsables d'une grande partie des dégradations sur les monuments historiques et plus généralement du bâti. Ces sels sont des espèces minérales solubles dans l'eau et donc facilement mobilisables par les solutions. Ainsi, le gypse qui est l'un des moins solubles de ces sels (2,4 grammes par litre d'eau pure) est encore 150 fois plus soluble que la calcite qui est le principal constituant des roches calcaires. Ces sels, une fois solubilisés, se concentrent et précipitent dans les zones d'évaporation des solutions que constituent les surfaces des pierres.

Origine des sels :

Les sels ont de nombreuses origines possibles, naturelles ou liées aux activités humaines. L'action des sels est plus particulièrement évidente à proximité de la mer où les matériaux sont contaminés par les embruns et la pluie chargée en sels, par l'usage de matériaux pollués (eau de gâchage des mortiers,...) ou même par la nappe phréatique plus ou moins salée. Certaines pierres, extraites à proximité de la mer, peuvent d'ailleurs être déjà contaminées en carrière. La pollution atmosphérique est aussi un vecteur de contamination des matériaux pierreux, par des apports particulaires et gazeux ou par les eaux de pluie. Les mortiers à base de ciment sont une source potentielle de sels alcalins parfois sous-estimée. Enfin, les eaux du sol (nappe, ruissellement,...) contiennent différents sels en liaison avec l'activité humaine bordant un bâtiment (déverglage, pratiques agricoles,...).



Efflorescences salines blanches apparaissant sur des rejointoiements réalisés à base de ciment gris, ancienne abbaye de Valmagne (France).

Les sels les moins solubles se forment à la base du mur (carbonates et sulfate de calcium) tandis que les chlorures et les nitrates très solubles se trouvent au sommet de la frange capillaire. Ces concentrations de sels dans la pierre sont à l'origine d'altérations spectaculaires.

Type de sel	Origines possibles
Sulfate de sodium (mirabilite, thénardite)	ciments de type Portland, mortiers au ciment, bétons, lessives, briques...
Carbonate de sodium, de potassium Natron, thermonatrite, trona...	ciments de type Portland, mortiers au ciment, bétons, lessives, résidus de nettoyage chimique...
Chlorure de sodium (halite)	eau de mer, embruns, sels de déverglaçage, sel de salaison...
Chlorure de potassium (sylvite)	sol...
Sulfate de calcium (gypse, anhydrite, bassanite)	plâtre, mortiers contenant du plâtre, ciments, mortiers au ciment, SO ₂ atmosphérique, embruns, activités bactériennes
Sulfate de magnésium (hexahydrate, epsomite)	pierre dolomitique, chaux magnésienne...
Nitrate de sodium (Nitratine)	sol, engrais, matières organiques décomposées, activités bactériennes
Nitrate de potassium (Nitre)	matières organiques décomposées, sol, engrais, activités bactériennes
Sels doubles (Aphthitalite, glauberite, syngénite...)	Origine variée en fonction des ions disponibles et des équilibres chimiques

Quelques origines courantes des sels solubles dans la pierre.

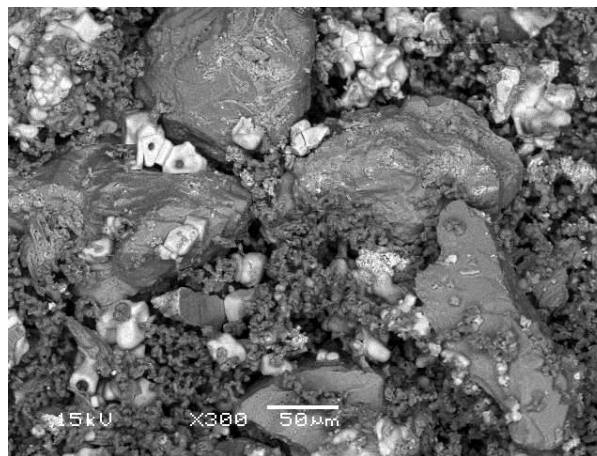
Les mécanismes d'altération liés à l'action des sels :

Les sels en cristallisant exercent des pressions de cristallisation importantes qui peuvent dépasser les résistances mécaniques des pierres les plus dures.



Efflorescence à la base d'une colonne monumentale et desquamation / désagrégation du grès sur la base du fût. Fouille de la salle péristyle du temple d'Amenophis 3 (Louxor, Egypte).

Cependant, tous les sels n'ont pas le même effet destructif. Ainsi, le chlorure de sodium n'engendre que des dégradations très modérées comparé à d'autres sels beaucoup plus dommageables tels que les sulfates de sodium (thénardite/mirabilite). En fait, les pressions de cristallisation dépendent du type de sel (réseau cristallin) et du taux de sursaturation de la solution à partir de laquelle il cristallise. Le degré de sursaturation est lui même lié à la vitesse d'évaporation de la solution (rapide si l'atmosphère est sèche, si la pierre est soumise à un fort ensoleillement...).



Microcristaux de sel (NaCl (halite) en clair et $\text{MgSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ (hexahydrate) en gris) dans la porosité entre les grains de quartz du grès prélevé dans la zone de desquamation et de désagrégation à la base du fût. Microscope électronique à balayage

Par ailleurs, de nombreux travaux ont montré que la nature du réseau poreux de la pierre entre en ligne de compte. Ses propriétés déterminent si les sels cristallisent à la surface ou à l'intérieur du matériau. Quand la cristallisation se produit à l'intérieur de la pierre, elle y provoque des fissures importantes et des desquamations sous la forme d'écailles de plus ou moins grandes dimensions. Les efflorescences en surface sont moins dommageables.



Efflorescences salines blanches à la surface de pierres gréseuses, cathédrale de Figeac - France (sel de déverglaçage). Photo de détail (à droite), la pierre d'angle sans efflorescences est affectée par une désagrégation granulaire liée à des cristallisations à l'intérieur du matériau.

Certains sels dits hygroscopiques sont sensibles aux variations de température et d'humidité de l'air. Ils sont cristallisés et stables au dessous d'un certain taux d'humidité de l'air (*humidité relative d'équilibre*). Ils se transforment en une phase plus hydratée voire en une solution saline lorsque l'air devient plus humide. Ainsi, si l'atmosphère est instable (ensoleillement épisodique, chauffage intermittent), on observe alternativement sur la pierre des efflorescences ou des taches sombres d'humidité. Les alternances de cristallisation et de mise en solution de ces sels hygroscopiques, plus ou moins cycliques, aboutissent à une désagrégation superficielle du matériau. Des œuvres en pierre que l'on a cru mettre définitivement à l'abri dans un musée peuvent ainsi continuer à se dégrader au gré des variations thermohydriques (température et humidité atmosphériques). Le processus est très efficace et pour le stopper, il faut recourir à une élimination quasi complète des sels ou à une meilleure stabilisation de la température et de l'humidité de l'air ambiant.

Sel	Solubilité en g/l à 20 - 25°C	Humidité relative d'équilibre % à 20°C et 25°C
natron $\text{Na}_2 \text{CO}_3, 10\text{H}_2\text{O}$	220 -	98 - 88
thermonatrite $\text{Na}_2 \text{CO}_3, \text{H}_2\text{O}$	160	95 -
thénardite $\text{Na}_2 \text{SO}_4$	388	82
mirabilite $\text{Na}_2 \text{SO}_4, 10\text{H}_2\text{O}$	110 - 193	94 - 91
halite NaCl	360	75 - 75
nitrate de potassium KNO_3	47	95 - 94
gypse $\text{CaSO}_4, 2 \text{H}_2\text{O}$	2.4	100

Solubilité et humidité relative d'équilibre de quelques sels solubles fréquents.

2.3. Les altérations biologiques

De nombreux organismes vivants sont actifs dans l'environnement et interfèrent avec les pierres en œuvre. Les micro-organismes responsables des dégradations peuvent être séparés en deux groupes. Ceux qui entraînent la formation de dépôts visibles, tels que les algues, champignons, lichens. Ceux, plus insidieux qui, comme certaines bactéries, provoquent une décohésion du matériau au travers de leurs réactions métaboliques sans former de dépôt visible.

Les algues :

Ce sont des organismes chlorophylliens qui croissent dans les milieux très humides. Les facteurs qui jouent un rôle dans leur installation et leur développement sont essentiellement l'humidité et la lumière. Les algues étant très peu exigeantes en substances nutritives, la nature du substrat n'est pas très importante. On retrouve les algues sur les pierres mais aussi les enduits, les bétons et même les peintures murales ou les vitraux. Les algues participent à l'altération du support :

- ✚ par le phénomène de rétention d'eau qu'elles entraînent,
- ✚ par la production de certains acides organiques,
- ✚ de façon mécanique par l'accrochage sur le support grâce aux prolongements de certaines de leurs cellules appelées *rhizoïdes*,
- ✚ mais aussi par des modifications chromatiques inesthétiques.

Selon les colorations visibles, on distingue différentes salissures biologiques :

- ✚ Les salissures vertes : On va les rencontrer sur des supports très lisses (vitraux) jusqu'à des supports très rugueux (pierre) et toujours très humides et exposés à la lumière. On y trouvera un mélange de *chlorophycées* (algues vertes) et de *cyanobactéries* (algues bleues).



Développement d'algues vertes dans une galerie souterraine à la faveur d'un éclairage, château de Brézé (France).

- ✚ Les salissures noires se rencontrent en extérieur sur des supports rugueux et plutôt orientés à l'ouest, mais également en situation intérieure dans une ambiance très humide. Les responsables sont principalement des *cyanobactéries* ou *algues bleues*. Les salissures noires d'origine biologique se développent sur des surfaces bien exposées aux pluies ou aux ruissellements et ne peuvent donc pas être confondues avec les croûtes noires qui se forment dans les zones qui ne sont jamais lavées.
- ✚ Les salissures rouges : Les algues dominantes dans ce type de recouvrement sont les chlorophycées de la

famille des *Trentepolhia*. On les rencontre sur des substrats exposés aux vents pluvieux (nord ou nord-ouest) dans le Nord et l'ouest de la France.



Coulures noires verticales marquant des zones de ruissellement et correspondant à des recouvrements de cyanobactéries (algues bleues) à la surface des pierres. Remparts médiévaux d'Aigues-Mortes.

Les lichens, les champignons et le biopitting :

Les lichens sont constitués d'une association complexe entre champignon et algue, l'ensemble formant un thalle. Ils s'accrochent sur le matériau grâce à leurs racines, les *rhizines*. Ils forment des recouvrements colorés sur les surfaces humides. Parmi les grands groupes morphologiques de lichens, ce sont les *foliacés* et les *crustacés* que l'on rencontre majoritairement sur les monuments.

Les foliacés forment un recouvrement compact mais superficiel, sans insertion véritable dans la roche. En revanche les crustacés font presque partie intégrante de la pierre. Leurs *rhizines* pénètrent dans les fissures existantes de la pierre ou même en créent d'autres par la production d'acides organiques. Ils sont donc capables d'entraîner à long terme une désagrégation granulaire superficielle.

Globalement, les lichens vont dégrader les supports qu'ils colonisent par émission d'acides organiques. Ces composés réagissent avec les pierres calcaires pour créer une patine brune riche en oxalate de calcium mais aussi pour former par attaque chimique des petits cratères superficiels qui correspondent à un phénomène d'altération caractéristique nommé pitting.



Gauche : thalle de lichen blanc sur une stèle romaine gravée dont le texte est rendu illisible (ville antique de Cuicul, Djemila, Algérie).

Droite : zone de pitting sur une pierre de parement après nettoyage, ancienne abbaye du Thoronet (France).

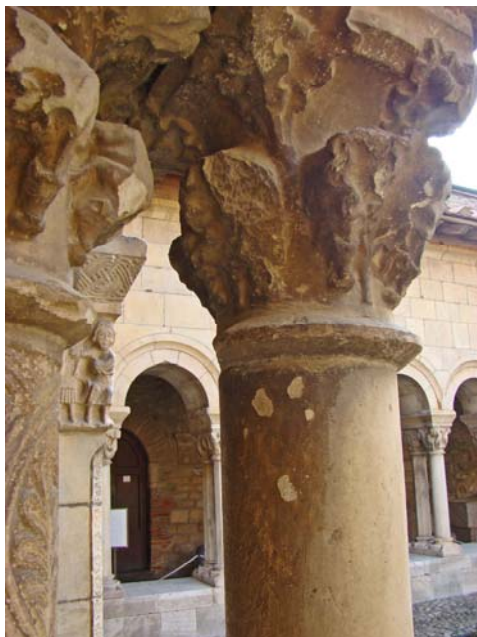
Les bactéries :

Elles peuvent être classées, entre autres, selon deux types de métabolisme : *hétérotrophes* ou *autotrophes*.

Les bactéries hétérotrophes ne peuvent subvenir à leurs besoins énergétiques qu'en présence de composés organiques d'origine naturelle (poussières, pollens,...) ou apportés par d'anciens traitements. Elles sont présentes en grand nombre sur la pierre (jusqu'à 10^8 ou 10^9 par gramme) et sont parfois à l'origine de la formation d'acides organiques (acide oxalique, par exemple) qui entraînent la formation de patine par la formation indirecte de phases tels que les oxalates de calcium, et de phénomènes de dissolution, en particulier de minéraux sensibles comme les carbonates.

Les bactéries autotrophes utilisent pour vivre et comme source d'énergie, l'oxydation d'un composé minéral. Dans ce groupe, on va trouver en particulier:

- 🌈 les bactéries nitrifiantes (*Nitrosomonas* et *Nitrobacter*) qui oxydent l'ammoniaque (provenant de la pollution agricole ou de traitements de la pierre) en nitrates ce qui peut aboutir à la formation de nitrate de potassium (salpêtre). Cette microflore spécifique a été signalée à maintes reprises dans les altérations des calcaires et des grès. Toutefois aucune relation entre la quantité de nitrates présents dans la pierre et la population de germes nitrifiants n'a pu être établie, du fait de la grande solubilité des nitrates.
- 🌈 les bactéries qui oxydent le soufre, les *Thiobacilles*. Il en résulte la formation d'acide sulfurique (phénomène de dissolution), puis de sulfates (formation de sels néfastes tels que les sulfates de calcium ou de potassium). Ces sels d'origine biologique auxquels s'ajoutent généralement ceux qui ont pu se former par la simple évaporation des solutions, vont participer à l'apparition des désordres liés à des cristallisations salines déjà décrits plus haut (desquamation...).



Les analyses microbiologiques ont mis en évidence une forte population de bactéries oxydantes du soufre associée à des dégradations dues à des cristallisations de gypse (sulfate de calcium dihydraté) sur les chapiteaux et les colonnes du cloître de l'abbaye d'Elne (France).

Les autres organismes vivants :

Outre les micro-organismes, les végétaux supérieurs et les animaux peuvent aussi entraîner des dégradations. Les pigeons griffent la pierre. Leurs déjections qui enlaidissent les sculptures sont aussi une source de phosphates et nitrates et donc de sels solubles.

Lorsqu'on les laisse pousser, les plantes herbacées ou grimpantes, les arbres, les arbustes développent des systèmes racinaires qui exploitent les plans de faiblesse tout en exerçant des pressions suffisamment importantes pour provoquer l'élargissement des fissures préexistantes et la fragmentation de la pierre. Ils génèrent en outre des microsols humides qui sont une source de sels et le lieu d'une intense activité biologique. Leur élimination régulière est recommandée.

2.4. L'impact de la pollution atmosphérique

Présents dans l'air en concentrations suffisantes pour produire un effet nocif mesurable sur la vie et les matériaux, les polluants particulaires, les polluants gazeux et les pluies acides sont autant de causes d'altération de la pierre.

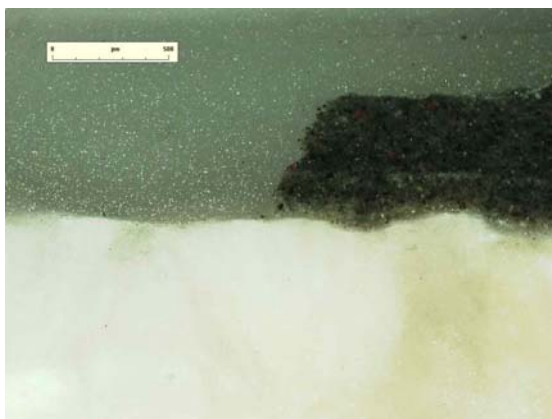
Les particules :

Les particules présentes dans l'atmosphère sont très variées. Elles peuvent être d'origine naturelle ou liées à la pollution anthropogénique (industrie, chauffage, transports).

Les polluants particulaires issus de la combustion du charbon ou des dérivés du pétrole sont constitués de *suies* de très petites tailles (10^{-9} m) et de cendres volantes de plus grandes dimensions (10^{-6} m). La plus grande partie de ces microparticules est principalement composée de carbone d'où leur coloration générale noire. Elles contiennent aussi du soufre réactif et des métaux lourds en faibles quantités que l'on soupçonne de

catalyser les réactions entre matériaux et composants gazeux de l'atmosphère. Elles représentent un constituant majeur des croûtes noires qui couvrent la pierre et dans lesquelles on trouve aussi d'autres particules d'origine anthropique (grains silico-alumineux...) ou naturelle (sables, limons et argiles d'origine éolienne, pollens et spores d'origine végétale...).

Les particules participent à l'altération des pierres par les dépôts inesthétiques, compacts et relativement imperméables qu'elles forment, mais aussi en apportant des éléments réactifs susceptibles de favoriser la sulfatation et la cristallisation de sels solubles (soufre, métaux lourds catalyseurs...) ou d'alimenter une activité microbiologique nuisible (pollens, spores et autres matières organiques).



Détail en section polie d'une croûte noire et des particules noires carbonées qui la constituent. La section polie a été réalisée sur un prélèvement pour évaluer le résultat d'un essai de nettoyage effectué sur la cathédrale de la Major à Marseille, France (à gauche, zone nettoyée ; à droite, croûte noire).

Les polluants gazeux :

La nature des polluants gazeux est variée : monoxyde de carbone (CO), dioxyde de carbone (CO₂), méthane (CH₄), oxydes d'azote (NO et NO₂), protoxyde d'azote (N₂O), dioxyde de soufre (SO₂), chlorofluorocarbures (CFC), ozone (O₃).

Les polluants gazeux atmosphériques les plus nocifs pour la pierre sont le dioxyde de soufre et les oxydes d'azote (NO et NO₂). Ce sont surtout des facteurs d'acidité de la pluie, mais ils peuvent aussi agir directement en tant que gaz.

✚ **Le dioxyde de soufre :** Dans l'atmosphère, les sources de dioxyde de soufre sont naturelles (océans, volcans,...) et anthropiques (combustion du charbon, du fuel, fonderies de métaux non ferreux et usines de pâte à papier). Parmi les polluants atmosphériques, c'est le plus agressif pour la pierre. Il peut être véhiculé sous forme de SO₂ ou d'aérosols par l'air, ou sous forme de sulfates ou d'acide sulfurique, par les eaux de pluie. Quand il est apporté par l'air, il agit directement sur la calcite de la pierre. Il s'oxyde en acide sulfurique. Son action sur la pierre calcaire peut-être une transformation des carbonates de calcium en sulfates de calcium (gypse) dans les premiers millimètres sous la surface, mais aussi par dessus la surface (encroûtements).

✚ **Les autres polluants gazeux :** En premier viennent les dioxydes d'azote, dont les sources peuvent être naturelles (oxydation des sols, protéines,...) ou anthropiques (combustion d'hydrocarbures). Les oxydes d'azote gazeux (parce qu'ils participent à la production d'ozone) sont susceptibles d'accélérer la réaction de sulfatation. Le monoxyde de carbone n'agit pas directement sur la pierre en tant que gaz.

L'ensemble de ces polluants atmosphériques particuliers et gazeux affecte directement les eaux de pluie qui se chargent en acides et en sels dans l'atmosphère. Le dioxyde de soufre et les oxydes d'azote forment des acides sulfurique et nitrique, qui sont des acides forts et provoquent des dissolutions importantes et rapides des pierres calcaires.

Les oxydes de carbone forment de l'acide carbonique, qui est un acide faible et instable, mais réagissant immédiatement avec les carbonates du calcaire pour former des bicarbonates solubles, accélérant ainsi la dissolution des pierres calcaires.

Même si, pour ce qui concerne l'Europe, de nombreuses mesures ont permis de limiter et de réduire la production de certains polluants, la pollution atmosphérique est encore responsable de nombreuses altérations superficielles qui se développent principalement en milieu urbain ou industriel.

Dans les zones non lessivées, l'interaction polluants/pierre produit des couches d'altération et de dépôt (salissures) : patines, écaillages, pellicules, croûtes noires, poussières, couches d'épigénie. A l'heure actuelle, on peut considérer qu'en milieu urbain, une façade nettoyée va se réencrasser dans un intervalle de 20 à 35 ans, selon le taux de pollution ambiant et, en particulier, en fonction de la densité du trafic automobile local. Dans les zones lessivées par les eaux, l'acidification accentue les phénomènes de dissolution et le ravinement.



Tête de lion sculptée fortement érodée sur la corniche sommitale de la cathédrale de la Major bâtie au XIXe siècle (Marseille, France).

3. LES PROPRIETES DE LA PIERRE, FACTEURS INTERNES D'ALTERATION

Toutes les pierres ne réagissent pas de la même façon aux contraintes environnementales. Les formes et l'intensité de l'altération sont aussi régies par certaines propriétés intrinsèques de la pierre. On parle aussi de facteurs internes d'altération.

3.1. Les propriétés mécaniques

En règle générale, les constructeurs ont veillé à employer les matériaux les plus résistants dans les parties structurels, en charge, des bâtiments. On voit ainsi bien souvent des assises de soubassement réalisées avec une pierre bien plus compacte que l'élévation au-dessus. Cette compaction est généralement associée à une plus grande dureté superficielle et une porosité réduite, de sorte que les assises de soubassement à la fois supportent parfaitement la charge de la construction, mais constituent aussi une barrière contre les remontées capillaires du sol et offrent une bonne résistance à l'érosion et à l'abrasion.



Soubassement en pierres dures blanches de Cassis et élévation en molasse tendre beige de Fontvieille, Château Borely à Marseille (France).

Cependant, ces pierres particulièrement dures et compactes peuvent malgré tout se fracturer sous l'effet de surcharges locales ou de l'instabilité de la maçonnerie. Elles présentent parfois des discontinuités qui constituent des plans de faiblesse propices à la propagation des fissures et sensibles à l'action des intempéries.



Fracturation d'une stèle, les fissures se propagent le long de veines verticales de calcite présentes dans le calcaire tectonisé (Cuicul, Djemila, Algérie)

3.2. La composition chimique et minéralogique

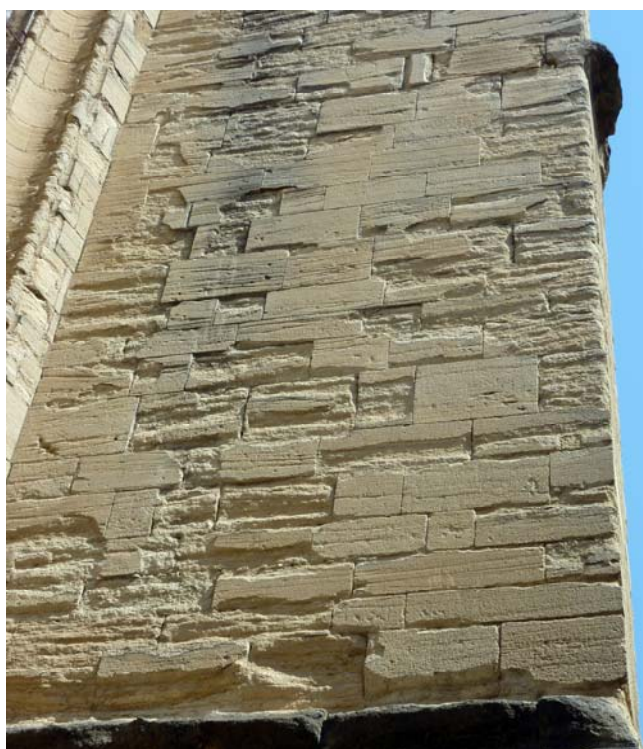
La composition même de la pierre peut favoriser le développement de certaines altérations. Les pierres calcaires sont plus solubles que les pierres silicatées (granite, grès...). La présence d'argiles gonflantes est connue pour provoquer un « ramollissement » de la pierre lorsqu'elle est saturée en eau et engendrer un gonflement lié à la présence d'humidité induisant des variations dimensionnelles importantes (cas des molasses). On mesure par exemple une perte de résistance à la compression qui peut dépasser 30% à saturation en eau sur du tuffeau du Val de Loire, et 20 à 25% sur la pierre de Barutel (Gard) qui a été utilisée pour la construction de l'amphithéâtre de Nîmes. Ceci peut contribuer par effet de fatigue à la fracturation des pierres, en particulier lorsqu'elles sont soumises à des charges importantes ou à des mouvements dans les maçonneries.



Fragmentation en esquilles de pierres relativement compactes contenant des argiles (amphithéâtre de Nîmes). L'absence de joint due à la pose à sec et les phénomènes de gonflement-retrait liés au comportement des argiles sont à l'origine de ces fragmentations.

Ces mêmes argiles sont aussi responsables d'un phénomène de dilatation hydrique : le volume de la pierre augmente avec sa teneur en eau. Certaines desquamations dites en plaque sont attribuées à ce type de phénomènes : les contraintes qui s'exercent entre le cœur de la pierre et sa partie superficielle régulièrement imbibée par les pluies peuvent conduire à la formation de fissures parallèles à la surface de la pierre. Une plaque se forme, d'épaisseur parfois considérable (plusieurs centimètres) et se détache finalement de la masse de la pierre.

Certaines pierres sont en carrière déjà enrichies naturellement en sels solubles (gisement de sel à proximité, pollution agricole, proximité de la mer), ou contiennent des phases réactives délétères. Par exemple, la pyrite, un sulfure de fer gris métallique (FeS_2), présent dans certaines pierres comme le tuffeau, les schistes ou certains calcaires marneux, s'oxyde dans la partie superficielle de la pierre en sulfates et oxydes de fer. Cette transformation génère des taches de couleur rouille et s'accompagne d'un accroissement de volume conduisant à l'éclatement de la pierre et à la formation de cratères plus ou moins profonds à sa surface.



Desquamation en plaque sur les parements sud de la cathédrale de Carpentras (France).

Un autre cas particulier est celui de la déformation des marbres sous l'effet des gradients thermiques. Cette déformation spectaculaire qui peut aller jusqu'à la fracturation, est liée à des contraintes internes qui se développent au cours des élévations de température (insolation solaire, incendie...). En effet, la calcite est un minéral qui ne se dilate pas de manière homogène dans toutes les directions lorsqu'il est chauffé. Sa plus grande expansion est d'environ + 2% et sa plus petite expansion correspond en réalité à un retrait de - 0,5% dans des directions perpendiculaires. Cette altération spectaculaire est l'objet de nombreuses études aujourd'hui car elle affecte les plaques de marbre et de pierres marbrières utilisées dans la construction moderne en placage extérieure (comme la grande arche de la Défense à Paris). Les torsions des plaques, contrariées par les systèmes d'attache, aboutissent à des fracturations et à des chutes dangereuses d'éléments de grande dimension. Des protections par filets métalliques ont été posées sur certains bâtiments où cette altération se manifestait.

3.3. La texture des pierres

Parmi la multitude de variétés des pierres de construction, certaines présentent des textures et des constitutions hétérogènes très marquées.

La succession de passées grossières et fines dans un grès ou un calcaire riche en éléments détritiques, révélée quelquefois par la présence de microstructures héritées tels que les joints stylolithiques ou des fractures préexistantes peut être également une source d'hétérogénéités. L'existence de ces hétérogénéités confère au matériau un comportement non uniforme vis-à-vis du développement des altérations différentielles de formes caractéristiques comme pour la formation des alvéoles ou des stries de désagrégation, dans la création de surfaces ravinées ruiniformes qui présentent des reliefs plus résistants et des creux très altérés, ou encore dans l'implantation des colonies de lichens.

En règle générale, plus les grains constitutifs ont une taille importante, plus la pierre est altérable. Ainsi à porosité et composition égales, les liaisons inter particulières sont moins nombreuses, la cohésion de la roche est plus faible et l'action des agents de dégradation dans les joints ou pores inter granulaires est beaucoup plus « efficace ».



Désagrégation granulaire laissant en relief certaines passées plus résistantes du grès dans le parement de la cathédrale de Lodève (France).

3.4. Rôle de la porosité

La porosité permet le stockage et la circulation de l'eau, des sels et peut favoriser l'implantation des végétaux. Il existe aussi une fraction des vides qui dans des conditions naturelles et pour des pierres non immergées, n'est en réalité jamais envahie par l'eau. Ces vides constituent ce que l'on appelle la porosité piégée. L'importance de cette porosité où se trouve piégé l'air, dépend de la forme des pores et de leurs interconnexions. Elle peut être exprimée par rapport à la porosité totale sous la forme d'un coefficient dit de saturation ou d'Hirschwald, et elle a un impact décisif dans la résistance au gel et aux sels.

La sensibilité au gel (gélifraction) et aux sels, qui se manifeste par des éclatements de la pierre résulte des contraintes exercées par les cristaux de glace ou les cristaux de sels sur les parois des pores. Pour que la pierre soit sensible aux effets du gel, il faut en premier lieu qu'elle puisse se saturer en eau convenablement, au moins momentanément. Une pierre sans porosité ou très faiblement capillaire ou protégée de l'eau ne peut être affectée par le gel. Il faut aussi que la cohésion de la pierre, sa résistance mécanique soit inférieure à la pression développée par les cristaux de glace.

L'existence d'une porosité piégée importante et donc d'un coefficient de saturation faible ($< 80\%$) permet de ménager des vides d'air dans lesquels la glace pourra cristalliser librement et où l'eau résiduelle pourra se déplacer sous l'effet de la pression de cristallisation de la glace. La porosité piégée limite la gélifraction. Elle agit de même vis à vis des cristallisations salines. L'eau par ailleurs gèle à 0°C dans les pores les plus gros mais à des températures bien plus basses dans les pores fins et ultrafins. Toutes les pierres n'ont donc pas la même sensibilité au gel.

Le degré de gélivité de la pierre s'exprime par sa capacité à résister en laboratoire, à un plus ou moins grand nombre de cycles de gel/dégel dans une enceinte prévue à cet effet. En conséquence, sous un climat où le nombre de jours de gel est élevé, les pierres qui ne présentent pas une tenue à un nombre de cycle de gel/dégel suffisant ne peuvent pas être utilisées dans des situations où elles pourraient se saturer en eau, par exemple en dallage extérieur, en soubassement, ou comme élément de corniche très exposé aux pluies.

3.5. Les propriétés de transfert

La granulométrie et les propriétés (importance, taille, forme et homogénéité) du milieu poral d'une pierre déterminent ses propriétés de transfert des fluides telles que la cinétique d'évaporation, l'imbibition capillaire ou la perméabilité à la vapeur d'eau. Ces propriétés sont déterminantes dans le développement des altérations. Ainsi, à porosité égale et dans un même mur, une pierre constituée de gros pores mal connectés entre eux, dans lesquels les processus de capillarité sont faibles, sera beaucoup moins imbibée par les eaux de pluie qu'une pierre microporeuse très capillaire.

Tous les mécanismes d'altération associés à la pénétration de l'eau (dissolution, cristallisations de sel, dilatation hydrique...) affecteront donc beaucoup plus en profondeur la pierre capillaire et microporeuse. Selon les cas, ces dernières s'exfolient, se desquament en plaques épaisses, se désagrègent sur plusieurs centimètres.

L'action de l'eau sera prolongée si la vitesse de séchage de la pierre est lente. L'action des sels est amplifiée si au cours du séchage, la majeure partie de l'eau s'évapore depuis un front de séchage à l'intérieur du matériau et non à sa surface. Les sels cristalliseront en effet sous la surface de la pierre et les altérations s'exprimeront par des desquamations au lieu de simples efflorescences ou croûtes superficielles qui n'endommagent pas la pierre sous-jacente.

Les pierres peu ou pas capillaires, sur lesquelles les eaux de pluie vont plutôt ruisseler montreront quelle que soit leur porosité, des marques d'altérations très superficielles telles que des ravinements.



Figures de dissolution à la surface d'une pierre peu poreuse et peu capillaire, amphithéâtre de Nîmes (France).

4. LE ROLE DE L'HOMME (FACTEUR ANTHROPIQUE)

Extraite de sa formation géologique et employée pour un édifice ou une statue, la pierre devient un matériau utile aux activités humaines qui peut être soumis aux interventions volontaires ou involontaires de l'homme.

Parmi ces interventions, certaines sont liées au non respect des règles de l'art et de certaines dispositions constructives au moment de la construction ou de la restauration. D'autres correspondent très souvent à un manque d'entretien des édifices et d'autres enfin résultent de la modification de l'environnement (pollution, élimination de protections au cours du temps).

4.1. Les défauts de mise en œuvre

La plupart des pierres sédimentaires (calcaire, grès) ont un lit perpendiculaire au sens de dépôt : les éléments se sont déposés à plat puis transformés pour former la roche originale. Ils sont globalement tous orientés dans la même direction et déterminent une succession de plans de feuilletage ou litage plus ou moins marqués dans la roche.

La pierre doit être posée en respectant ce litage, car ses propriétés mécaniques sont optimales perpendiculairement à ce litage. La pose en délit, c'est à dire en disposant le litage verticalement, outre qu'elle affaiblit la résistance à la charge, favorise les exfoliations sous l'effet du gel ou des sels. Cette pose en délit a parfois été intentionnelle parce que la hauteur du banc dans la carrière était insuffisante pour tailler correctement une statue ou une colonne monolithique de plusieurs mètres de haut.



*Délitage de colonnes en calcaire à entroques (petit granite) posé en délit.
Façade de l'ancienne abbaye de Saint Gilles du Gard (France).*

Les problèmes de compatibilité entre les matériaux et notamment entre les pierres et leurs mortiers de jointoiement, sont difficiles à maîtriser. Dans une maçonnerie de pierres tendres, poreuses et capillaires, les

joints dits durs, peu poreux forment une barrière étanche et les solutions s'accumulent au-dessus, qui en séchant produisent dans la pierre des sels et des écaillages. Dans des maçonneries de pierres « dures ou froides », tels que les granites, certains calcaires ou grès compacts, les joints tendres, trop poreux sont des réservoirs potentiels pour l'eau chargée en sels et l'altération s'initie au contact du joint pour progresser vers le centre de la pierre ou du moellon.

La présence d'humidité au contact de pièces métalliques oxydables noyées dans la maçonnerie tels que des tirants, des gougeons ou des agrafes peut entraîner une altération indirecte de la pierre par gonflement lié au développement de produits de corrosion expansifs. Cette corrosion est souvent responsable de fracturations. L'oxydation superficielle des éléments en fer, cuivre, bronze... produit de plus des taches ou des coulures rouille, brune ou verte caractéristiques.



Fracturation de la pierre causée par la corrosion d'éléments métalliques insérés.

4.2. Usage et changement d'usage

L'usage même du bâtiment peut induire des dégradations. Les visiteurs font des marques d'usure par frottement dans les passages les plus fréquentés. Le simple geste de toucher ou frotter une pierre, s'il est répété des milliers de fois, suffit à polir la pierre la plus dure ou à la creuser de façon spectaculaire.



Usure des pierres de la bordure d'un bassin par les cordes utilisées pour plonger les récipients et puiser l'eau dans l'antique ville romaine de Cuicul (Djemila, Algérie).

A l'intérieur des édifices comme dans les grottes naturelles, les visites sont responsables de variations de la température et de l'humidité qui peuvent causer des cycles de dissolution/cristallisation des sels ou des contaminations biologiques préjudiciables à la conservation (la lumière artificielle nécessaire à la vision des visiteurs favorise la synthèse chlorophyllienne et par là la croissance d'algues qui forment des revêtements disgracieux). L'un des exemples les plus notoires est celui de la grotte de Lascaux qui a été définitivement fermée au public dans les années soixante à la suite d'une forte poussée de microorganismes. On a parlé à l'époque de la maladie verte de Lascaux.

L'installation de moyens de chauffage et/ou de climatisation à l'intérieur des bâtiments peut provoquer une augmentation de l'évaporation et intensifier l'effet de mèche dans les zones de remontées capillaires. De plus, un fonctionnement intermittent risque de multiplier et d'intensifier les variations thermohydriques et donc de favoriser l'action des sels hygroscopiques.

4.3. Le manque d'entretien, les traitements inadaptés, la fréquentation excessive et le vandalisme

Une toiture ou des joints défectueux, des gouttières bouchées ou percées, une végétation envahissante traduisent un manque d'entretien régulier. Le cheminement des eaux est perturbé et des infiltrations à l'intérieur de la maçonnerie vont inmanquablement se produire. Les eaux attaquent les matériaux et se chargent en sels. Des zones humides plus propices au développement de moisissures, d'algues peuvent apparaître. Des sels peuvent aussi cristalliser sous forme d'efflorescences ou à l'intérieur des pierres en provoquant des desquamations et des désagréations d'épiderme de la pierre.

Nombreux sont les édifices en pierre ayant fait l'objet d'interventions malheureuses. La préconisation de méthodes de restauration inadaptées comme des nettoyages avec des poudres trop abrasives (sablage) ou l'utilisation de produits chimiques très agressifs et susceptibles de produire des sels résiduels peuvent provoquer de graves dommages.

Les réparations avec des matériaux incompatibles, par exemple l'utilisation d'un mortier de ciment rigide et compact au contact d'une pierre tendre et très capillaire, les interventions avec des produits avec des effets secondaires néfastes comme du ciment riche en sels solubles, sont des sources fréquentes d'altération. L'accumulation d'eau à l'intérieur de la maçonnerie derrière des surfaces de pierres rendues étanches et imperméabilisées par application de produits hydrofuges de surface ou d'enduits étanches peut également engendrer des désordres importants.

De nos jours, la prolifération de graffitis ou de tags au moyen de peintures variées, est un problème majeur de dégradations des édifices en pierre. Le développement d'une nouvelle gamme de produits de protection (anti-graффitis) est en cours, néanmoins leurs effets à long terme sur la pierre sont mal connus et demandent à être sérieusement évalués.

Enfin, certaines constructions ont subi des agressions sévères. Les guerres de religion puis les révolutions ont été des périodes de destruction importante. Les statues ont été mutilées, les édifices religieux, les châteaux, les palais incendiés et parfois entièrement détruits. On retrouve des marques de ces dégâts sous la forme de pierres rubéfiées et fissurées, ou de statues plus ou moins heureusement réparées. Dans certaines régions, on observe encore sur les façades des impacts d'obus ou de balles datant des deux guerres mondiales et préservés comme témoignage des combats livrés.



Impacts de balle datant de la libération de Marseille conservés lors de la récente restauration de la basilique de Notre Dame de la Garde.

CONCLUSIONS

Les altérations de la pierre liées à son environnement sont multiples et dépendent de nombreux facteurs liés entre eux. Elles peuvent être classées selon leurs morphologies, les facteurs ou les mécanismes mis en jeu. Elles varient aussi en fonction des propriétés même de la pierre.

Une altération avec une morphologie donnée peut avoir plusieurs origines et peut résulter de différents mécanismes. En conséquence, les diagnostics ne sont jamais faciles. La recherche des causes d'une altération peut nécessiter de nombreuses investigations pour caractériser les matériaux sains et altérés, identifier les produits de l'altération (sels...), analyser l'environnement actuel (atmosphère, hydrogéologie, climatologie, cheminement des eaux) et passé de l'édifice et souvent même retracer son histoire et celle de ses altérations et restaurations anciennes.

Le diagnostic est primordial dans le cadre de la restauration des monuments historiques. Il permet d'une part d'intervenir de manière appropriée pour stopper et stabiliser les altérations en cours en éliminant les agents responsables ou en réduisant leur action, et d'autre part, si nécessaire, d'appliquer des traitements de protection efficaces.

BIBLIOGRAPHIE

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.

Stone in architecture, properties, durability (WINKLER E.M.), Ed. Springer-Verlag, 1994, 313 p.

Pollution de l'environnement et impact sur les biens culturels (LORUSSO S., MARABELLI M., VIVIANO G.), EREC, 1999, 254 p.

Tendre comme la pierre, ouvrage collectif sous la direction de Michel RAUTUREAU, Région Centre et Université d'Orléans, 2000, 116 p.

Altération des pierres mises en oeuvre (VERONIQUE VERGES-BELMIN), Paris : Hermès Science Publications, 2001, 45 p. In : Géomécanique environnementale, risques naturels et patrimoine sous la dir. de Bernard Schrefler, Pierre Delage, p. 191-235.

L'impact de l'environnement sur l'altération des pierres en oeuvre BROMBLET P., LEROUX L. et G. ORIAL, Pierre Actual, 790, juin 2002, p 58-69.

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



Association MEDISTONE
www.asso-medistone.org

