

La conservation de la pierre en milieu salin

Philippe Bromblet est géologue, il a soutenu une thèse de doctorat en géologie appliquée et est spécialiste de la conservation de la pierre et du bâti ancien. Il mène actuellement des recherches sur les matériaux pierreux au Centre interdisciplinaire de conservation et restauration du patrimoine (CICRP¹).

Alexandrie est située en bord de mer et beaucoup de pierres en ont été retirées de l'eau salée par les plongeurs. Elles viennent en particulier des constructions du célèbre phare antique d'Alexandrie. Pour assurer la conservation de ces blocs exposés à des risques d'altération saline, il a fallu les soumettre à des traitements appropriés qui sont décrits dans ce chapitre, qui porte plus généralement sur la conservation des pierres en milieu salin.

1 La solubilité des sels et des espèces chimiques liées à l'altération saline

1.1. Le phénomène de solubilité dans l'eau

La conservation de la pierre en milieu salin pose un problème car ce milieu est très agressif vis-à-vis de la pierre. On parle d'altération saline parce que dans ce milieu se trouvent des sels solubles comme celui qu'on utilise pour la cuisine, le chlorure de sodium

1. <https://cicrp.info>



Figure 1

Le sel de table de la formule chimique NaCl est un exemple de sel responsable d'altération de pierre de construction.

(**Figure 1**), qu'on appelle la halite en minéralogie quand il est sous sa forme cristallisée. Ces sels passent facilement en solution : la halite a une solubilité de 365 g/L à 20 °C (365 g sel de cuisine dans un litre d'eau). Comme ils sont solubles dans l'eau, ces sels vont être transportés par les eaux diluées, les pluies par exemple. Ils pourront se reconcentrer à la surface des pierres quand cette eau diluée aura traversé la pierre pour s'évaporer à sa surface, elle atteindra des concentrations en sel saturantes² et le sel reprécipitera³ à la surface de la pierre. On a ainsi des contaminations en sel qui peuvent devenir très importantes au fur et à mesure que l'eau s'évapore et que la pierre sèche. La solubilité élevée des sels solubles leur confère donc une grande mobilité et le pouvoir

de se concentrer là où l'eau s'évapore, c'est-à-dire vers la surface de la pierre. Selon la porosité de la pierre, ces sels vont cristalliser (**Figure 2**) soit à la surface (on va parler d'efflorescence saline⁴), soit en profondeur à quelques centimètres ou quelques millimètres sous la surface de la pierre dans sa porosité.

1.2. Caractéristiques des sels liés à l'altération saline

Ce qui vient d'être décrit pour le chlorure de sodium s'applique à beaucoup d'autres sels. Tous les sels solubles auxquels on a affaire sont à base de quatre cations et quatre anions : les sulfates, les chlorures, les carbonates et les nitrates pour les anions ; calcium, magnésium, sodium, potassium pour les cations. La chimie fait que ces ions se combinent entre eux en

2. Une solution aqueuse est dite saturée quand elle n'est plus capable de solubiliser le sel.

3. Reprécipiter : le sel passe d'une forme dissoute dans le liquide à sa forme solide.

4. Efflorescence saline : désigne le dépôt formé par un composé ayant migré jusqu'à la surface d'un matériau.

Figure 2

Les colonnes du temple d'Aménophis III en Égypte à Louxor sont recouvertes d'efflorescences salines blanches formant par endroits une véritable croûte de sel.



Principaux sels solubles (une cinquantaine d'espèces)	
ANIONS	
• Sulfates SO_4^{2-}	
• Chlorures Cl^-	
• Carbonates CO_3^{2-}	
• Nitrates NO_3^-	
CATIONS	
• Calcium Ca^{++}	
• Magnésium Mg^{++}	
• Sodium Na^+	
• Potassium K^+	
	Chlorures [Sylvite KCl Halite NaCl Bischofite $MgCl_2 \cdot 6H_2O$ Antarctite $CaCl_2$ Carnallite K_2MgCl_4]
	Nitrates [Nitrate $NaNO_3$ Nitre KNO_3 Nitrocalcite $Ca(NO_3)_2$]
	Sulfates [Kieserite/Hexahydrate/Epsomite $MgSO_4$ Arcanite K_2SO_4 Gypse $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ Thénardite/Mirabilite Na_2SO_4 Aphthilalite $K_2Na(SO_4)_2$ Glaubérite $Na_2Ca(SO_4)_2$ Syngénite $K_2Ca(SO_4)_2$]
	Carbonates [Natron/Thermonatrite $Na_2CO_3 \cdot H_2O/10H_2O$ Trona $Na_3H(CO_3)_2 \cdot 2H_2O$ Hydromagnésite $Mg_5(OH)(CO_3)_2 \cdot 4H_2O$]
	Sels complexes Darapskite $Na_3SO_4NO_3 \cdot 4H_2O$

Figure 3

Tous les principaux sels responsables de l'altération des pierres sont des combinaisons de quatre cations et quatre anions.

formant des sels neutres. La **Figure 3** cite une vingtaine des sels les plus courants rencontrés dans les pierres du patrimoine ; il y en existe aussi une cinquantaine de moins fréquents. On peut les classer par familles. Dans les chlorures, on trouve la halite NaCl, mais aussi des chlorures de potassium, des chlorures doubles de potassium magnésium, des chlorures de calcium, etc. Dans les nitrates, le plus connu est le salpêtre (le nitre), qui est le nitrate de potassium. Il y a aussi une variété de sulfates, ainsi que des carbonates dont le natron, des carbonates de sodium, des carbonates alcalins, qui sont aussi très solubles et qu'on va retrouver très souvent sur les pierres,

et encore des sels complexes avec des anions doubles, par exemple la darapskite, un nitrosulfate de sodium assez fréquent.

La **Figure 4** présente la solubilité de ces sels sur une échelle logarithmique. On voit apparaître les familles, carbonates, sulfates, nitrates et chlorures. La calcite, qui est le matériau constitutif des roches calcaire, est très peu soluble, avec une solubilité de l'ordre de 0,02 g/L ; la halite (NaCl) apparaît à 365 g/L, à proximité de la sylvite (KCl). On note aussi des sels peu solubles tel que le gypse à 2,4 g/L. Les sulfates ont des solubilités de plusieurs centaines de grammes par litre, les chlorures et les nitrates

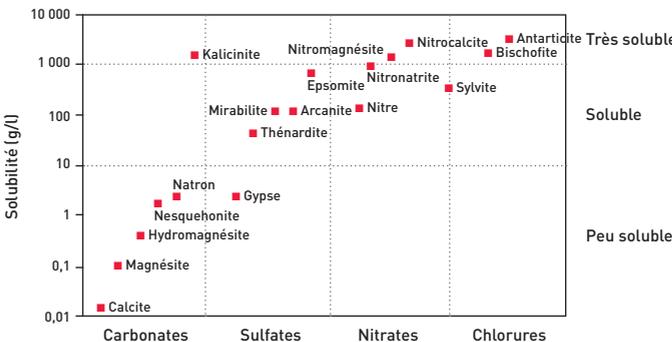


Figure 4

Le diagramme de solubilité des sels montre une corrélation entre les familles anioniques et leur ordre de grandeur de solubilité.



Figure 5

Maison dont les fondations sont au bord d'un canal à Venise, induisant une remontée des espèces salines causant l'altération de ses enduits et maçonneries de brique.

sont les sels les plus solubles. Et quand on a des remontées capillaires à la base des murs, on a généralement une chromatographie, une distribution verticale des sels avec depuis le sol les carbonates, puis les sulfates, les nitrates et enfin les chlorures, qui sont tout en haut de la frange capillaire.

2 Origines et propagation des sels dans la structure de la pierre

2.1. Origine des sels

L'origine des sels présents dans la pierre des bâtiments est souvent l'eau de mer. C'est le cas pour Alexandrie comme pour Venise. La **Figure 5** montre des dégradations à la base d'une façade qui borde l'un des canaux de Venise, ville bâtie au milieu d'une lagune marine. C'est l'effet de l'eau de mer qui contient du chlore et du sodium (environ 30 g/L), que l'on extrait dans des salines pour produire le sel de cuisine, mais aussi des sulfates, du magnésium et d'autres ions encore susceptibles de se combiner sous forme de

sels solubles variés (gypse, epsomite...).

D'autres origines, très variées, expliquent la présence de sels dans les pierres. La **Figure 6** montre l'église Saint Sauveur à Figeac. On a du chlorure de sodium sur la porte principale de cette église cathédrale. Ce sel a été apporté par l'homme comme sel de déverglaçage épandu par les services municipaux tous les hivers pour éviter que du verglas ne se forme à l'entrée de l'église et que les paroissiens ou les visiteurs ne risquent de glisser et se faire mal en chutant. Ce sel se dissout au printemps dans les eaux de pluie, remonte par capillarité à la base des murs et se retrouve en efflorescences à la surface ou dans la pierre sous forme cristallisée. Il produit naturellement des altérations qui vont dégrader la pierre du bâtiment.

De nombreux produits contiennent des sels et doivent donc être évités pour le travail de restauration. Par exemple, l'eau de Javel a très souvent malheureusement été utilisée pour nettoyer des pierres couvertes d'algues ou de lichens parce c'est un très

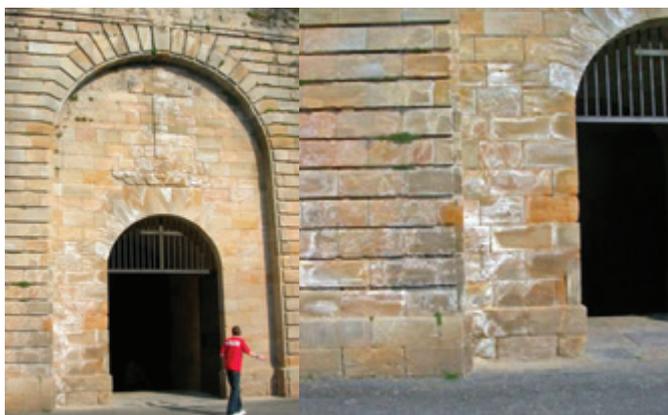


Figure 6

Église Saint Sauveur de Figeac contaminée par l'utilisation de sel déverglaçage épandu l'hiver au sol.

bon biocide. Mais cet hypochlorite de sodium (NaOCl) se décompose naturellement en chlorure de sodium et alimente donc la pierre en halite indésirable. Certaines lessives contiennent beaucoup de sels solubles, notamment les sulfates ; les ciments et bétons contiennent des carbonates alcalins. Le plâtre, c'est du gypse, du sulfate de calcium soluble ; s'il est utilisé en extérieur et exposé aux pluies battantes ou à des ruissellements, il « fond », se dissout et va contaminer la pierre qui est à son contact et va progressivement se dégrader du fait de la cristallisation de nouveaux cristaux de sulfate de calcium dans son réseau poreux.

Il existe aussi des remontées capillaires qui drainent et concentrent les sels présents dans le sol souvent très riche en nitrates issus de la décomposition de matière organique. La pollution atmosphérique est une autre source de pollution par les sels. On a tous entendu parler du dioxyde de soufre (SO_2) émanant des pots d'échappement de nos véhicules ; par une série de réactions chimiques complexes, ce dioxyde gazeux se retrouve sur les pierres sous forme de sulfates, puis de cristaux de gypse (sulfate de calcium dihydraté $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$).

La mobilité et l'action des sels solubles dans la pierre sont gouvernées d'une part par leur solubilité et d'autre part par leur hygroscopicité⁵.

5. Hygroscopicité : absorption de l'eau par un élément, ici le sel, donnant lieu à la formation d'agregat.

2.2. Premier mode de propagation du sel : la solubilité

La solubilité élevée des sels solubles leur confère donc une grande mobilité et le pouvoir de se concentrer là où l'eau s'évapore, c'est-à-dire vers la surface de la pierre. Les sels sont transférés en solution diluée. La **Figure 7** présente une colonne d'un temple en Égypte près du Nil située au-dessus de la nappe d'eau souterraine liée au fleuve. Le climat égyptien est très sec et très chaud ; il crée donc une forte tendance à l'évaporation et cause des remontées capillaires à travers le sol. La nappe est très peu profonde, à deux mètres de profondeur, et l'eau douce du Nil remonte dans la base de la colonne et s'évapore. Il n'y a pas beaucoup de sels dans l'eau douce du Nil mais suffisamment pour qu'une croûte saline se forme sur la base de cette colonne. Au-dessus on observe des altérations dues à des sels qui cristallisent à l'intérieur de la pierre qui constitue le fût de cette colonne papyriforme.

La **Figure 8** montre ces sels vus en microscopie électronique à balayage⁶. La colonne et les échantillons sont en grès. On en observe les grains de sable, et dans la porosité intergranulaire les cristaux des sels (sulfates et chlorures) résultant de l'évaporation de l'eau du Nil et de la cristallisation des sulfates et des chlorures.

6. Microscopie électronique à balayage (MEB) : alors qu'un microscope classique envoie de la lumière sur un échantillon, un MEB utilise des électrons dont la réflexion est analysée pour reconstituer une image.



Figure 7

Les remontées capillaires ont permis aux ions présents dans les eaux de la nappe phréatique de remonter et de se combiner sous forme de sels solubles cristallisés sur la colonne de temple égyptien située au-dessus.

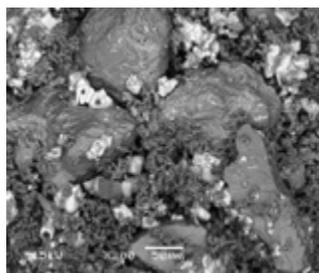


Figure 8

La microscopie à balayage électronique permet de visualiser la présence de microcristaux salins dans les pores de la pierre altérée.

Figure 9

La poudre de pierre observée sur cette statue illustre un phénomène de désagrégation granulaire qui est due aux cycles répétés de dissolution, migration et recristallisation des sels hygroscopiques à la surface de la pierre en fonction des variations de température et d'humidité ambiantes.

HR
100 %



Lorsqu'ils cristallisent au moment du séchage, ces sels développent des « pressions de cristallisation ». La notion de « pression de cristallisation » a été mise en évidence par le physicien S. Taber en 1916 et précisée par C. W. Correns et W. Steinborn en 1939. La validité de la notion de pression de cristallisation est encore discutée, mais un article de J. Désarnaud en 2016 a rendu compte de mesures à l'échelle microscopique réalisées avec un dispositif très complexe ; les pressions de disjonction atteignent et dépassent des centaines de mégapascals (1 mégapascal = 10 atmosphères). Ces pressions très élevées sont au-delà de la résistance mécanique des roches ; s'y ajoute le fait que ces sels qui cristallisent dans les milieux poreux exercent des contraintes de traction alors que les pierres rigides résistent très mal à la traction. Ces sels et leur cristallisation sont donc extrêmement efficaces pour rompre la pierre dans sa porosité.

2.3. Second mode de propagation des sels : l'hygroscopie

Le comportement hygroscopique des sels est d'expérience

courante. On a tous observé que le sel de cuisine parfois s'écoule mal ou ne s'écoule plus de la salière. C'est qu'il n'est plus sous forme de grains solides individuels parce que ceux-ci sont devenus coalescents entre eux ; le sel a commencé à se dissoudre et les grains sont liés entre eux par une solution saline qui résulte de l'absorption de la vapeur d'eau atmosphérique et de la dissolution périphérique de chaque grain de sel. En fait les cristaux de sel ne sont pas stables à toutes les humidités relatives de l'air. Quand l'air est sec, le sel est sous forme de grains, il est cristallisé. Quand l'air est très humide (pour NaCl, c'est au-delà d'une humidité relative de 75 %) : les grains commencent à fondre sur leur pourtour et à se coller les uns aux autres. Au-delà, ce sel va petit à petit se transformer en solution saline. Vers 90, 95 % d'humidité relative, on a un liquide salé dans la salière au lieu de grains de sels. Si on rebascule vers des humidités basses, le sel va à nouveau cristalliser et perdre son eau pour redevenir le sel de cuisine cristallisé qu'on utilise habituellement.

L'hygroscopie induit une nouvelle mobilité : le sel qui est dans la pierre est cristallisé mais si la température et l'humidité relative de l'air changent, il peut passer en solution, voyager par les capillaires selon les lois de la capillarité, et si l'humidité rebaisse, recristalliser ailleurs. On peut avoir sans aucun apport d'eau une statue comme le montre la **Figure 9**, sans venue d'eau liquide apparente, mais où l'on a sans cesse de la « poudre de pierre » qui se forme tous les jours aux pieds

de cette statue sous l'effet de cristallisations salines.

Grâce à une sonde de mesure de l'humidité et de la température de l'air ambiant placée dans la chapelle (sans chauffage, ni climatisation) où se trouve la statue, on se rend compte que l'humidité relative fluctue entre les alternances jour-nuit. Or cette statue est contaminée en chlorure de sodium. Le sel cristallise de manière stable le jour quand la température s'élève et l'humidité baisse, et la nuit, parce que l'humidité remonte et que la température baisse, il passe en solution, migre et recristallise le lendemain quand la température remonte et l'humidité relative baisse à nouveau au-dessous du seuil de 75 %. C'est ce comportement hygroscopique de la halite qui fait que le sel reste mobile et actif bien qu'il n'y ait ni apport d'eau liquide, ni apport de sel nouveau dans cette œuvre en pierre.

3 Impact de la salinité sur la pierre

Les formes d'altérations salines les plus courantes sont : les efflorescences salines constituées de cristaux de sel blanchâtre que l'on voit sur la **Figure 10**, des désagrégations

granulaires, illustrées par la **Figure 11** qui présente une plaque épigraphiée romaine située dans une réserve de musée : la poudre de pierre déposée au pied de la plaque indique qu'il y a une action saline sur la pierre, l'épiderme de la pierre se désagrège en grains qui tombent et s'accumulent petit à petit.

On peut aussi observer des formations d'alvéoles (alvéolisation). Ce sont des formes que l'on voit fréquemment sur les monuments et qui sont souvent attribués par le commun des mortels et à tort à l'effet du vent (lequel n'a pas de pouvoir abrasif sur la pierre). Ce sont les sels qui sont dans la pierre qui, par désagrégation granulaire, creusent l'alvéole et permettent une érosion différentielle. Cette désagrégation peut être homogène ou peut être hétérogène et former des cavités ainsi qu'il est montré sur la **Figure 12**, photos d'une construction en basalte et d'une église à Caen.

On observe aussi des desquamations⁷. La **Figure 13** montre un sphinx en granite d'Assouan, granite rose provenant

7. Desquamation : correspond à une perte de couche par écaillage en surface d'un élément.



Figure 10

Apparition d'efflorescences salines sur une façade.



Figure 11

La poudre de pierre au pied de cette plaque graphiée romaine témoigne que l'objet subit une altération saline par désagrégation granulaire.

Figure 12

Les alvéoles présentes sur les pierres des monuments sont dues à une désagrégation granulaire non uniforme produite par les cristallisations de sels à la surface du matériau.



d'Alexandrie, et l'on voit qu'il est desquamé. Des écailles de pierre se sont formées et se sont détachées sur les flancs de ce sphinx. Cette altération est due aussi à des cristallisations de sels solubles qui ont été éliminés depuis.

4 Traitement pour la préservation de la pierre salinisée

4.1. Diagnostic salin et stabilisation de la salinité de la pierre

Pour lutter contre l'altération saline, la première étape consiste en un diagnostic, pour vérifier que l'altération est bien due à des sels. Un petit prélèvement est réalisé et mis en solution selon un processus normalisé à l'échelle européenne (norme NF EN16455 de 2014 : « Extraction et détermination des sels solubles dans la pierre naturelle et les matériaux associés utilisés dans le patrimoine culturel ») afin que le résultat puisse être comparé à une référence et que l'on puisse en déduire les teneurs en sels solubles. Les mesures

permettent de savoir si réellement on a des sels au-delà d'un seuil de concentration qui peut expliquer l'altération constatée sur l'objet. On effectue un petit percement à la base de l'œuvre ou sur un plan de cassure, on met la poudre de pierre récoltée dans une solution d'eau distillée, avec agitation pendant au moins 48 h. On filtre ensuite la solution, dans laquelle on dose les cations et les anions pour vérifier si on a du sulfate, des chlorures, des nitrates ou des carbonates en quantités suffisantes pour expliquer l'altération.

Le diagnostic étant établi, on a deux voies d'action pour préserver l'objet : soit la stabilisation de l'environnement, soit des dessalements.

4.1.1. La stabilisation de l'environnement

Il s'agit d'abord de stopper les venues d'eau et de nouveaux sels. Il faut identifier les sels actifs soit par la norme et le dosage de sels solubles soit par une étude minéralogique avec la diffraction des rayons X. Ensuite on stabilise le climat autour de l'œuvre,



Figure 13

La pierre de ce sphinx est creusée en raison de desquamations liées aux cristallisations de sels.

par exemple en imposant une humidité relative basse. Pour une petite œuvre on peut la mettre dans une vitrine en présence de silicagel⁸ ou placer un climatiseur dans une enceinte (Figure 14) pour avoir toujours une humidité très basse. Le sel est présent dans l'œuvre, mais il ne peut plus bouger, son hygroscopie ne lui sert à rien, il va rester stable, cristallisé en permanence. Donc plus de pression de cristallisation, plus d'altération.

4.1.2. Maintien d'une humidité relative haute

Maintenir une humidité relative haute, c'est ce qu'on fait par exemple pour l'église de Mimizan à la fin des années 1990 (Figure 15). C'est un clocher-porche sculpté où l'on a tout fermé : l'architecte a refait la toiture qui était en mauvais

8. Silicagel : gel d'hydroxyde de silice de formule $\text{Si}(\text{OH})_4$ utilisé en chimie et en industrie pour sa capacité à absorber l'eau



Figure 14

Autel en marbre et verres colorés, abbaye de St Guilhem le Désert, salinisé, mis dans une enceinte climatisée provisoire pour limiter les cycles de dissolution/cristallisation des sels solubles, dans l'attente d'une intervention de dessalement.

état depuis des dizaines d'années, comme en témoignent les photos anciennes, il a bâti un contremur sur le mur Ouest qui était le plus perméable à l'eau de pluie, on a réalisé des injections de produits hydrofuges à la base des murs car l'eau phréatique remontait



Figure 15

L'isolation de l'église de Mimizan et le maintien d'une humidité relative élevée et stable a permis de stabiliser son altération.



Figure 16

Les pièces à conserver sont placées dans des bains d'eau déminéralisée pour extraire le sel par diffusion.

par la base, toutes les baies ont été refermées (les trois baies avaient été malencontreusement réouvertes pour « ventiler » l'espace intérieur du porche, trois entrées dans le porche). En fait on maintient désormais une humidité relative très élevée de l'ordre de 75-80 % dans cet édifice, ainsi l'altération est complètement stabilisée. On surveille bien sûr cet édifice et aucune reprise d'altération n'est observée pour le moment. Un sas a été ajouté contre la baie Nord par laquelle les visiteurs entrent pour maintenir une atmosphère la plus stable possible dans l'édifice accessible aux visites.

4.2. Dessalement de la pierre à l'aide de bains

Quand il est impossible de maintenir la pierre dans un environnement stable, l'alternative consiste à éliminer les sels. Deux techniques sont utilisées pour extraire les sels de l'objet et conduire ce qu'on

appelle une opération de dessalement :

- le dessalement par bain : on plonge l'objet, mobile, démontable, de petite taille, dans un bain ;

- le dessalement par presses, quand on a affaire par exemple à une maçonnerie contaminée par les sels. On applique sur l'objet des presses (dont on verra la composition plus loin) pour le dessaler.

Les teneurs seuils à atteindre par dessalement sont de moins de 0,1 % de chlorure, moins de 0,1 % de sulfate, sauf pour le gypse qui est tolérable à quelques pourcents – moins de 0,5 % – de nitrate.

La **Figure 16** donne quelques illustrations de dessalement par bains. On immerge l'objet dans un bain d'eau déminéralisée, plutôt que d'eau distillée trop agressive et qui attaquerait la pierre. L'eau pénètre dans l'objet, dissout les sels qui peu à peu vont migrer sous forme de cations et d'anions dans le milieu aqueux et vont saturer petit à petit le bain. Le dessalement par bains fonctionne par un mécanisme de diffusion décrit par les lois de Fick⁹. C'est un processus

9. Lois de Fick : elles décrivent la diffusion de la matière dans un milieu et ressemblent à l'équation de la diffusion de la chaleur.

Figure 17

L'évolution de l'encre dans l'eau illustre le mécanisme de diffusion libérant l'objet à conserver de son sel.





Figure 18

La cellule à conductivité électrique permet de suivre la teneur en sel de l'eau dans laquelle est plongé l'objet à dessaler.

d'extraction très lent qui dépend du gradient de concentration¹⁰ entre l'eau, qui est dans la porosité de la pierre très salée, et l'eau du bain très peu salée (déméralisée au départ) (Figure 17). Plus ce gradient s'amenuise, quand les ions passent dans l'eau du bain, moins ce dessalement est effectif. Donc à un moment, on est obligé de renouveler entièrement l'eau du bain pour réactiver le dessalement.

Les objets présentés sur la Figure 16 proviennent d'une partie de chapelle démontée. Tous les claveaux, tous les éléments, sont dans des bacs, couverts de bâches pour ne pas favoriser les développements biologiques, d'algues notamment, car lorsqu'on met de la pierre dans l'eau, on a généralement des poussées rapides de croissance d'algues, de champignons, de bactéries qui vont gélifier le bain, colorer

l'eau, et qui gênent le dessalement ; on agite l'eau pour favoriser la bonne uniformité du dessalement et éviter la formation d'une saumure plus lourde et concentrée, à faible capacité de dessalement, au fond du bain.

Le dessalement est suivi par une mesure très simple, celle de la conductivité de l'eau. L'appareil de la Figure 18 est un conductimètre qui mesure la conductivité électrique¹¹ de l'eau en microsiemens par centimètre et fournit des courbes comme celle de la Figure 19. La conductivité de l'eau minéralisée du bain est très faible au départ. Elle augmente au fur et à mesure que les sels diffusent dans l'eau du bain puis atteint un palier. L'opérateur (le restaurateur) décide alors de renouveler le bain et de réaliser un second bain, puis un troisième, un quatrième,

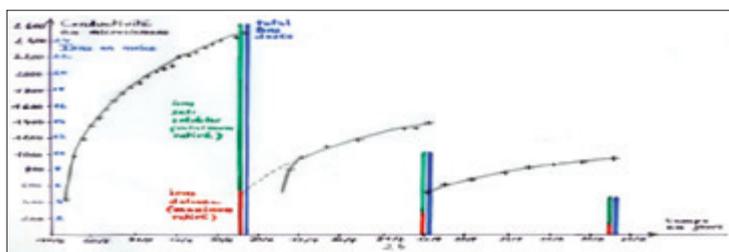
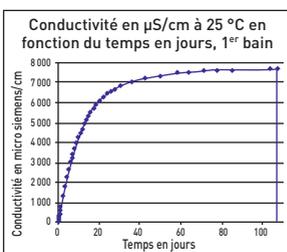
10. Gradient de concentration : différence de concentration en un élément entre deux zones d'un même espace.

11. Conductivité électrique : capacité à laisser passer le courant. Plus une eau est salée, plus elle est conductrice car contient des ions, qui ont une forte conductivité.

Figure 19

Grâce aux courbes de conductivité, on repère un palier, signe de l'avancement maximal du dessalement pour le bain.

Source : Olivier Rolland, conservateur/restaurateur de sculptures.



tant qu'on observe toujours une forte augmentation de la conductivité au départ. On contrôle ainsi à la fois la durée du bain et le nombre de bains nécessaires pour atteindre les 0,1 % de chlorure, 0,1 % de sulfate, etc., dans la pierre. Ces teneurs sont trop faibles pour provoquer la reprise de l'altération saline.

4.3. Dessalement de la pierre à l'aide de compresses

Pour les dessalements par compresses, il s'agit d'appliquer une compresse imbibée d'eau déminéralisée sur la pierre salée. L'eau migre vers la pierre et dissout les sels qui y sont contenus. Au séchage, cette eau va repasser dans la compresse avec les sels et l'on aura donc éliminé une partie des sels à la surface de

la pierre. La quantité de sel éliminé dans la compresse est évaluée par une mesure de conductivité : on prend une quantité donnée de compresse et on mesure sa conductivité. On vérifie qu'elle baisse à chaque nouvelle application de compresse et on répète ainsi l'opération jusqu'à qu'il n'y ait plus qu'une conductivité très basse. On considère alors qu'on ne peut plus extraire de sel. La **Figure 20** montre la projection d'une compresse au pistolet sur des grandes surfaces de maçonneries et sur des statues. L'application se fait traditionnellement à la spatule.

Le dessalement par compresses fonctionne selon le principe de l'advection¹², situa-

12. Advection : transport du sel grâce au mouvement de l'eau contenue dans la compresse.



Figure 20

Les compresses sont parfois appliquées par pistolet directement sur les monuments, ce qui permet de traiter de grandes surfaces.

tion où l'on gère des mouvements d'eau et des sels qui y sont contenus et que l'on fait migrer. Un impératif important doit être respecté : il faut une bonne adaptation de la taille des pores de la compresse à la taille des pores de la pierre (Figure 21). La compresse doit avoir des pores de grand diamètre pour que l'eau, par différence de pression capillaire, pénètre dans la pierre et dissolve les sels, mais elle doit aussi contenir des pores de petit diamètre pour qu'une fois que cette eau s'est chargée en sel, elle soit réabsorbée et que par advection les sels reviennent dans la compresse : il faut donc dans la compresse des pores plus petits que ceux de la pierre pour que l'eau chargée en sels dissouts puisse revenir dans la compresse par absorption capillaire. Faute de cette précaution, le dessalement peut s'avérer totalement inopérant car l'eau absorbée par la pierre, si elle dissout les sels, ne pourra les extraire vers la compresse et risque même de les pousser plus en profondeur dans le matériau. On travaille donc maintenant sur la compréhension des

mécanismes physiques en jeu pour optimiser les actions de dessalement.

Les compresses sont des mélanges bien choisis de matériaux poreux qui doivent répondre à plusieurs critères ; par exemple, il faut veiller à ce qu'ils tiennent bien sur la pierre et ne se décrochent pas en séchant. La Figure 22 résume des investigations qui ont consisté à mesurer la distribution des tailles de pores de nombreux matériaux à sélectionner pour réaliser nos compresses. Les mélanges que l'on utilise maintenant sont à base de sable, de kaolin, de cellulose ; le sable donne des porosités de grand diamètre (> 100 microns), les celluloses des porosités de diamètre assez important encore de l'ordre de 10 à 30 microns, et le kaolin est une argile qui donne des porosités très fines de l'ordre d'un quart de micron. Quand on mélange ces trois composés on couvre toute la gamme des porosités de la pierre. On a alors toutes les chances à la fois d'amener de l'eau dans la pierre et de pouvoir repomper cette eau salée une fois qu'elle a agi.

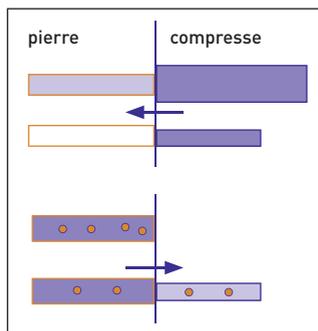


Figure 21

Le dessalement par compresse nécessite un mixte de petits et grands pores dans le matériau de la compresse pour que l'eau de la compresse soit d'abord absorbée par la pierre, puis réabsorbée avec les sels dissouts (par advection) dans la compresse.

Matière	Taille moyenne des pores*
Silice micronisée :	0,005-0,05 µm
Bentonite :	< 0,1 µm
Kaolin :	0,25 µm
Diatomite :	0,4-0,5 µm
Cellulose en poudre :	10-30 µm
Sable 0,08-0,5 mm :	80 µm
Sable 0,5-1 mm :	180 µm
Sépiolite :	< 0,1 µm
Attapulgite :	< 0,1 µm (10 µm)

(* Lubelli and Van Hees 2009, J. Cultural Heritage)

Mélange optimal pour la plupart des pierres → **sable + kaolin + cellulose**

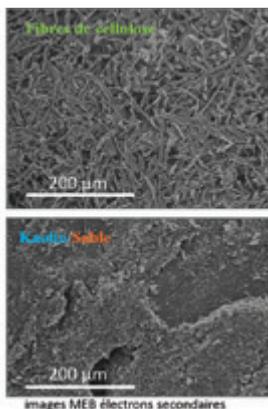


Figure 22

La microscopie permet de visualiser les différentes grandeurs de pores offertes par un mélange kaolin/sable et par la cellulose résultant en une compresse efficace pour dessaler les monuments.

Source : Ann Bourgès, LRMH, programme désaliénation.

Pas de conservation sans expertise !

Les sels solubles se classent avec l'eau parmi les principaux agents de dégradation de la pierre. Ces sels ont des origines innombrables et contaminent fréquemment les pierres de notre patrimoine. Aucune roche, aussi résistante mécaniquement soit-elle, marbre, basalte, granite..., ne peut échapper à l'altération saline. Celle-ci s'exerce selon des processus variés et s'exprime sous des formes diverses. Une fois diagnostiquée, cette altération nécessite des interventions appropriées, sans lesquelles l'action des sels solubles aboutit à la disparition inexorable de la pierre (**Figure 23**). La conservation en milieu salin est toujours délicate. Elle nécessite une expertise et des interventions décisives, que ce soit sur l'environnement à stabiliser ou sur la pierre elle-même qu'il faudra dessaler. Il est clair qu'architectes, conservateurs, restaurateurs et scientifiques de la conservation doivent unir leurs efforts pour établir le diagnostic puis mener à bien ces opérations de conservation sans lesquelles il n'y a pas de conservation de la pierre en milieu salin.

Figure 23

Altération saline en cours sur des blocs de calcaires soumis à une contamination saline au contact du sol dans un dépôt lapidaire.

