

Conservation des maçonneries endommagées par les sels solubles à la suite de l'incendie de Notre-Dame de Paris en 2019

Responsable du pôle scientifique « Pierre » du Laboratoire de Recherche des Monuments Historiques.

Elle est enseignante à l'école de Chaillot, à l'Institut National du Patrimoine et collabore à diverses formations post-universitaires en France et à l'étranger.

1 Introduction

1.1. Les sels et l'altération des matériaux inorganiques poreux

Ce chapitre traite de l'endommagement de la pierre par les changements de phase des sels solubles. Il évoque également quelques pistes de remédiation à cette importante problématique de notre patrimoine bâti.

Les sels sont responsables de dégradations dans l'environnement naturel, mais aussi sur le bâti. Pour illustrer ce point, j'ai choisi le cas de l'halite¹,

1. Espèce minérale solide composée de chlorure de sodium de formule brute NaCl.

un sel bien connu. Voici trois cas d'altérations liées à la cristallisation de ce sel : (i) celui de l'ancien grenier à sel de Honfleur, édifié en 1670 en vue du stockage du sel pour la gabelle (**figure 1**) ; (ii) le cas d'un muret (**figure 2**) en brique, matériau inorganique poreux qui, comme la pierre, est susceptible d'absorber de l'eau par succion capillaire. Le chlorure de sodium dispersé au sol comme sel de déverglaçage a pénétré dans cette maçonnerie sous forme dissoute, puis est venu précipiter en surface sous forme d'efflorescences ; (iii) le troisième cas est la cathédrale de Nikorshminda en Géorgie (**figure 3**), dont le

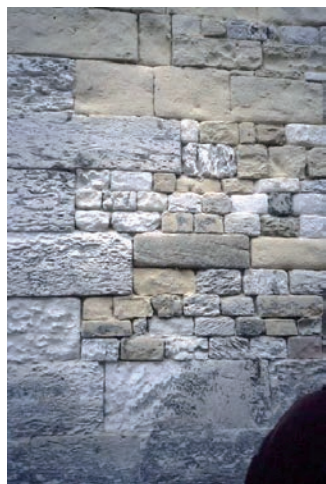


Figure 1

Parement du grenier à sel de Honfleur (France) : l'halite (NaCl) qui contamine cette maçonnerie induit d'importantes pertes de pierre et de mortier.

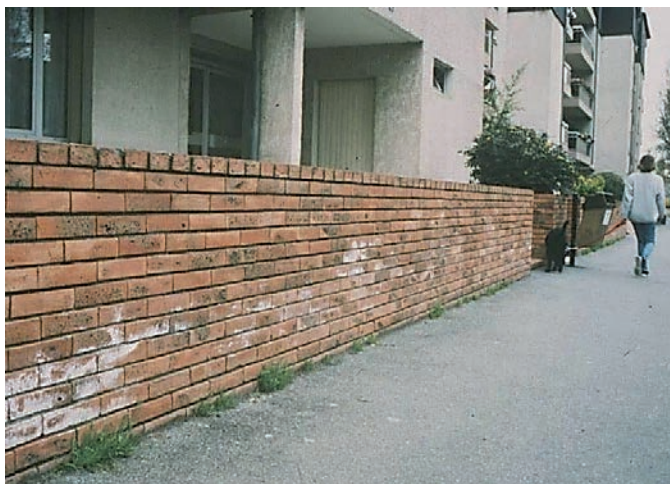


Figure 2

Muret en brique à Nogent-sur-Marne (France), cas de dégradation par du sel de déverglaçage.



Figure 3

Cathédrale de Nikorshminda (Géorgie), cas de dégradation causée par un produit de traitement (hypochlorite de sodium utilisé comme biocide).

parement extérieur a malheureusement été traité avec de l'hypochlorite de sodium² pour éliminer les contaminations biologiques. Cet oxydant très puissant est un excellent biocide, mais il est formellement déconseillé de l'utiliser sur la pierre car il contient beaucoup de chlorure de sodium.

1.2. L'humidité relative d'équilibre

L'une des propriétés importantes des sels est « humidité relative d'équilibre », dont l'acronyme est HRE.

Pour définir cette propriété, nous considérerons une saumure³

2. Composé de formule brute NaClO . Ce solide très instable est couramment utilisé en solution aqueuse comme agent désinfectant et blanchissant (ex. : eau de Javel).

3. Solution aqueuse d'un sel, saturée ou en forte concentration.

saturée⁴ en un sel, située en milieu clos et à une température donnée. On appelle humidité relative l'équilibre de ce sel, l'humidité relative qu'atteindra à l'équilibre l'air situé au-dessus de cette saumure (figure 4). Par exemple, dans le cas de l'halite (NaCl), l'HRE a pour valeur 75 % à 20 °C. Dans le cas de la nitronatrite $[\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}]$, l'HRE est égale à 53 % à la même température.

Si l'humidité ambiante change, par exemple en plaçant les saumures saturées au contact d'un grand volume d'air dont l'humidité relative est abaissée jusqu'à 30 %, c'est-à-dire au-dessous de l'HRE des deux sels, les deux solutions vont s'évaporer et les sels cristalliseront (figure 5).

4. Relatif à une solution qui ne peut plus dissoudre une quantité supplémentaire de substance.

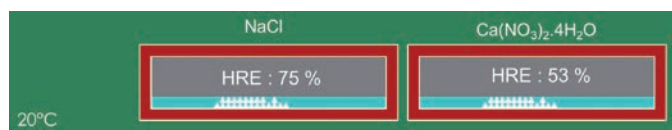


Figure 4

L'air, situé au-dessus d'une saumure saturée de chlorure de sodium (à gauche), et de nitrocalcite (à droite) atteint une humidité relative constante à une température de 20 °C : respectivement 75 % et 53 %. Ces valeurs correspondent à l'humidité relative d'équilibre (HRE) de ces sels.

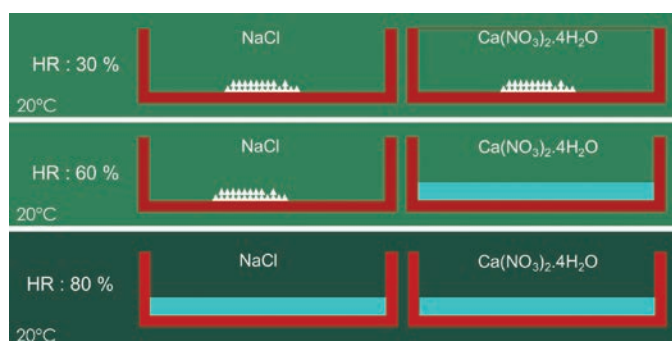


Figure 5

Effet de l'humidité relative (HR) ambiante sur deux sels à température constante (20 °C) : le chlorure de sodium (HRE : 75 %) et la nitrocalcite (HRE : 53 %).

Dans un deuxième temps, si ces saumures saturées sont placées dans un environnement atmosphérique ayant une humidité relative de 60 %, le chlorure de sodium restera à l'état cristallisé car l'HR est inférieure à son HRE. En revanche, la nitrocalcite, dont l'HRE est plus basse que l'humidité ambiante, va capter des molécules d'eau dans l'atmosphère puis se dissoudra dans l'eau captée. Ce sel sera devenu déliquescents⁵.

Enfin, dans un troisième temps, si l'humidité ambiante

est amenée jusqu'à 80 %, le chlorure de sodium tout comme la nitrocalcite précédemment, captera des molécules d'eau dans l'atmosphère puis se dissoudra dans l'eau captée car l'humidité ambiante sera devenue supérieure à l'HRE du NaCl. À son tour, ce sel sera devenu déliquescents. Cette propriété joue directement sur l'interaction entre les solutions salines et les matériaux inorganiques poreux des monuments : mortiers d'enduits, de réparation et de joints, pierres, terres cuites, briques. Si des sculptures ou maçonneries sont contaminées par

5. Qui absorbe tant l'humidité qu'il se délite, qu'il se dissout.

du chlorure de sodium, elles subiront des dégradations par cristallisation saline à chaque fois que l'humidité ambiante passera au-dessous de l'HRE de ce sel, qui rappelons-le, est égale à 75 % à 20 °C.

La dangerosité de ce sel dans un lieu donné dépendra ainsi du nombre annuel de passages du sel de l'état déliquescents ($HR > HRE$) à l'état cristallisé ($HR < HRE$).

Dans l'exemple analysé **figure 6**, est représentée la variation de l'humidité relative entre le 15 novembre 2019 et le 2 février 2020 dans la chapelle Saint-Éloi située au début de la nef de Notre-Dame (**figure 7**). Pour le chlorure de sodium, il y a eu en un mois et demi, 7 événements potentiels de cristallisation, mais seulement 6 événements pour la nitrocalcite. Ces sels ont eu sur ce site – et dans ce laps de temps – un potentiel destructeur très différent.

2 La pollution saline, source de dégradation sur les voûtes en place et les éléments tombés au sol

2.1. Description des différentes parties de Notre-Dame

Pour mieux appréhender l'exposé qui va suivre, il est important de rappeler la nomenclature des grandes parties de l'édifice. La **figure 7** indique où se trouvent la nef, le transept, le chœur et la chapelle Saint-Éloi. L'élévation du bras sud du transept est bien visible sur le modèle 3D.

2.2. Pollution saline des pierres tombées au sol

Les sels solubles pénètrent dans les matériaux poreux à l'état dissout, par succion capillaire. L'endommagement par les sels à Notre-Dame provient de ce que la cathédrale,

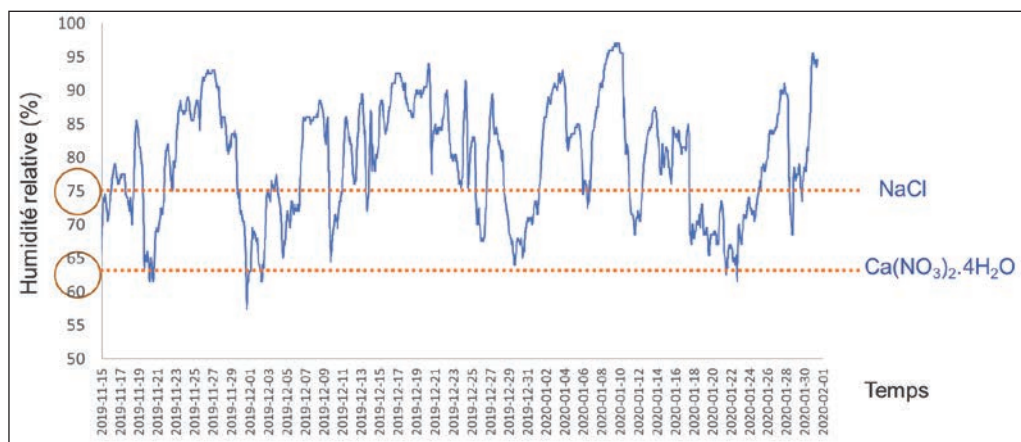


Figure 6

Évolution de l'humidité relative de l'air dans la chapelle Saint-Éloi de Notre-Dame entre le 15 novembre 2019 et le 2 février 2020. Les traits en pointillés rouges correspondent respectivement aux humidités relatives d'équilibre du chlorure de sodium (NaCl) et de la nitrocalcite [Ca(NO₃)₂·4H₂O].

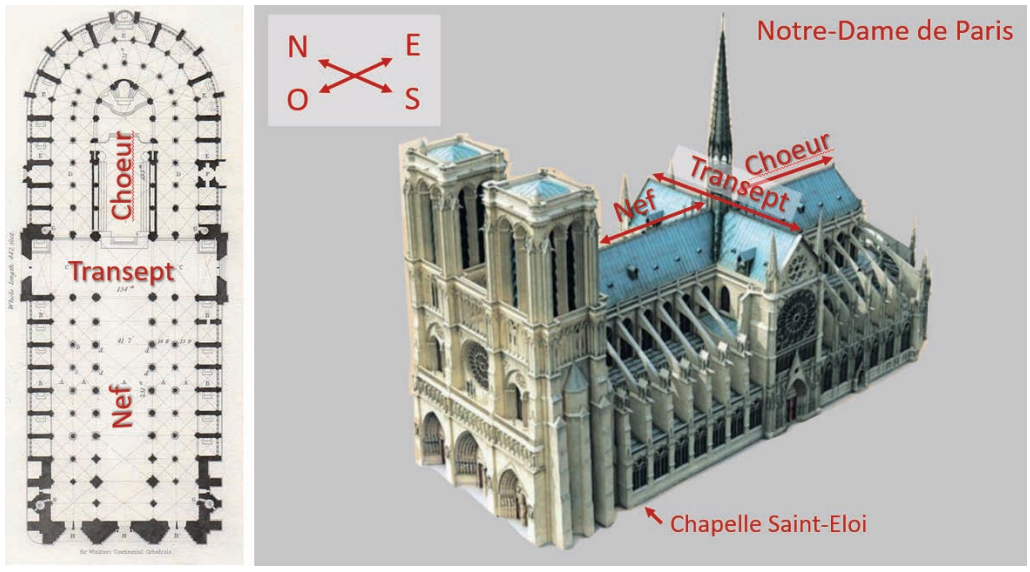


Figure 7

Plan et image extérieure de Notre-Dame situant la nef, le transept, le chœur et la chapelle Saint-Éloi.

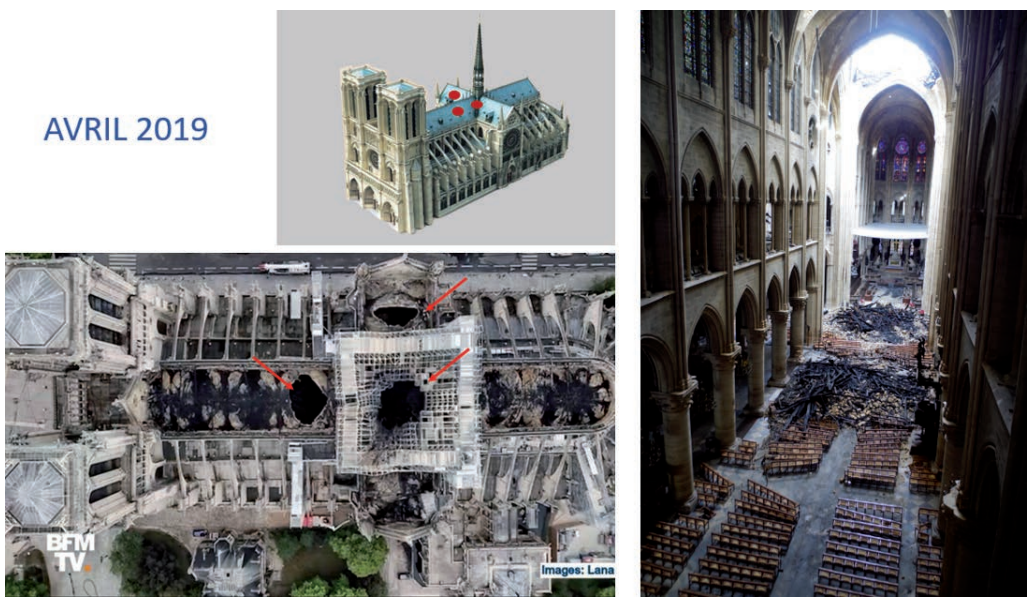


Figure 8

État de la cathédrale juste après l'incendie ; en haut à gauche : image représentant par des points rouges les endroits où les voûtes se sont effondrées ; en bas à gauche : photographie extérieure zénithale ; à droite : photo montrant la nef, la croisée et le chœur, avec les monticules de débris au droit de deux des voûtes crevées.

en perdant sa toiture, a vu son réseau d'évacuation d'eau de pluie devenir en grande partie inefficace. De plus, pendant l'incendie, lorsque les voûtes se sont effondrées, leurs pierres et mortiers sont tombés au sol, entraînant tout ce qui s'était accumulé dessus : poutres enflammées, plomb fondu et oxydé, chapes d'extrados, armatures de crêtes de faîtage, débris de l'échafaudage au niveau de la croisée (**figure 8**).

L'incendie s'est propagé très localement à l'intérieur de la cathédrale et a été vite éteint par les pompiers. Dans certains endroits, notamment dans le bras nord du transept, le sol dallé a été inondé jusqu'à 10 cm de haut, comme en témoigne la trace horizontale noire sur les pierres jonchant le sol (**figure 9**). Cette trace correspond à la limite supérieure atteinte par l'eau de l'inondation où flottaient les débris de charbon. Tout ce que pouvait contenir l'eau

comme espèces solubles, en particulier des sels, a pénétré par capillarité dans les pierres.

Au fur et à mesure du tri des vestiges (**figure 10**), notre collègue géologue du laboratoire, Lise Leroux, a veillé à récolter des pierres représentatives de la variété des types de pierres existants. D'autres pierres ont été prélevées par notre équipe : celles présentant un encrassement, des éclaboussures de plomb, des fissures, épaufrures et altérations chromatiques liées à l'élévation de température. Toutes ces altérations nécessitaient un diagnostic précis et des tests nous permettant de conseiller les architectes sur les mesures à prendre.

Avant marquage et nettoyage, une quantification des sels (chlorures, nitrates, sulfates, pour les ions négatifs) a été réalisée sur treize d'entre elles, issues des voûtes crevées du bras nord et de la croisée du transept (**figure 11**). On considère que c'est à partir



Figure 9

À gauche, haut et bas : extinction du brasier après l'effondrement de la voûte de la nef. À droite : pierres issues la voûte effondrée, jonchant le sol du bras nord du transept. La trace horizontale noire à 10 cm au-dessus du sol indique le niveau de l'eau au plus haut de l'inondation liée à l'extinction du feu.



Figure 10

Tri, récolte et marquage de pierres mises de côté pour identification des lithotypes et diverses caractérisations, dont la quantification des sels solubles.

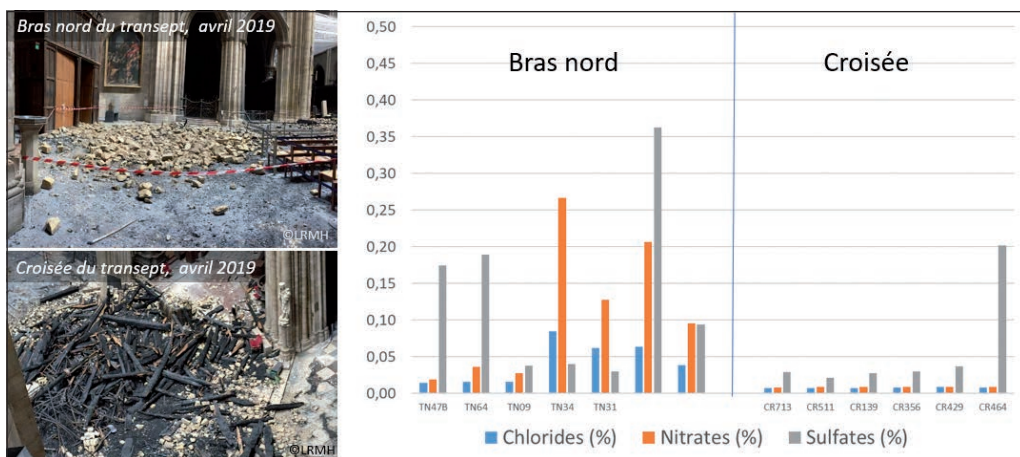


Figure 11

À gauche, vues des éléments de voûtes et charpente, issus des effondrements des voûtes du bras nord et de la croisée du transept. À droite : taux de chlorures, nitrates et sulfates mesurés dans une sélection de treize pierres récoltées dans ces deux zones.

de 0,1 % que les quantités deviennent anormales pour les chlorures. Dans le cas présent, aucune pierre issue de la voûte effondrée du bras nord ne présentait un taux de chlorures supérieur au seuil. Il n'en était pas de même pour les sulfates et les nitrates qui, sans présenter des teneurs considérables, montraient une pollution saline évidente. Au sein des pierres issues de la voûte de la croisée, il n'y avait en revanche aucune pollution saline, à l'exception d'un taux de sulfates moyennement élevé dans une pierre.

Cette importante différence de contamination entre des pierres récoltées à ces deux endroits proches l'un de l'autre est probablement multi-causale. On sait que lorsque les pierres des voûtes de la croisée du transept sont tombées, leur nombre important compte tenu de la grande surface effondrée a induit la formation d'un monticule de presque 6 m de haut. Les pierres situées en hauteur dans le tas n'ont ainsi pas été impactées par l'inondation et ce, d'autant moins

– on le sait maintenant – que l'eau a pu s'échapper au moins localement à travers le dallage et la voûte effondrée de certains carreaux, ces larges conduits d'air situés sous le sol et destinés au chauffage de l'édifice. Dans le transept nord, un seul voûtain (zone entre deux arcs) s'est effondré, peu de pierres sont tombées, ce qui fait que l'impact mécanique des pierres a été moins important, le dallage ne s'est pas fragmenté et l'inondation a pu envahir l'espace. La durée du contact avec l'eau polluée par des sels a été bien plus longue à ce niveau.

2.3. Pollution saline des voûtes

Le texte reproduit en *figure 12* provient du *Dictionnaire raisonné de l'architecture française du XI^e au XVI^e siècle* de Viollet-le-Duc. Il explique qu'au-dessus des voûtes, on avait l'habitude d'appliquer une chape de protection contre les incendies. Dans un certain nombre d'édifices dont Notre-Dame, cette chape était en



« Aujourd'hui on entend par chape l'enduit que l'on pose sur l'extrados d'une voûte pour le protéger. Toutes les voûtes ogivales étaient couvertes d'une chape en mortier ou en plâtre. En cas d'incendie, cette précaution suffit pour empêcher la braise de calciner l'extrados de voûtes surtout si la chape est de plâtre. »

Viollet-le-Duc : *Dictionnaire raisonné de l'architecture française du XI^e au XVI^e siècle*, 1854-1868, tome 2

Figure 12

Extrados d'une succession de voûtains dans la partie nord de la nef. Une chape de plâtre recouvre l'appareil de pierres. Sa couleur blanche à l'origine était devenue grisâtre, mais les oxydes de plomb déposés pendant l'incendie ont coloré sa surface en vert olive. Cette photo a été prise un mois après l'incendie.

plâtre⁶. Ce matériau est constitué pour l'essentiel de sulfate de calcium bihydraté⁷, un sel passablement soluble⁸ dans l'eau (2g/L à 20 °C). Bien évidemment, les débris jonchant le sol sous les voûtes effondrées contenaient également des fragments de cette chape, lesquels ont pu se dissoudre dans l'eau et venir polluer les pierres.

La photo de la **figure 13** est prise depuis un plateau d'échafaudage, situé au bord du trou de la croisée. Trois arcs sont visibles, formant la limite entre la croisée et, à gauche, le bras nord du transept, en face, le chœur et, à droite, le bras sud du transept. L'échafaudage

6. Matériau de construction isolant et ignifuge (non combustible) fabriqué à partir de matières premières rocheuses telles que le gypse (sulfate de calcium bihydraté).

7. Dont la formule brute contient deux molécules d'eau.

8. Qui peut se dissoudre dans un liquide, un solvant.

construit avant l'incendie pour restaurer la flèche au-dessus de la croisée du transept a incroyablement bien résisté malgré le stress intense de l'incendie. Cependant, ses éléments étaient soudés et il a fallu le découper pièce par pièce, après des travaux préparatoires considérables pour le sécuriser. Le processus de dépose s'est achevé durant l'hiver 2020-2021. Ainsi, ce n'est que plus de deux ans après l'effondrement de sa voûte que la croisée du transept a pu être entièrement mise hors d'eau (**figure 14**).

Considérant la moyenne de pluviosité en région parisienne et la superficie du trou de la croisée du transept (environ 200 m²) on peut estimer qu'environ 200 000 litres d'eau sont tombés en cumulé au sol et sur les voûtes, jouxtant le trou de la croisée entre avril 2019 et mai 2021. Ceci nous amène à évoquer la pollution saline des voûtes restées en place.



Figure 13

Trois des quatre arcs délimitant l'espace autrefois occupé par la voûte de la croisée. Les voûtes attenantes ainsi que le sol de la croisée ont été impactés par la pluie pendant deux ans avant que le toit provisoire visible ici ne puisse être posé.

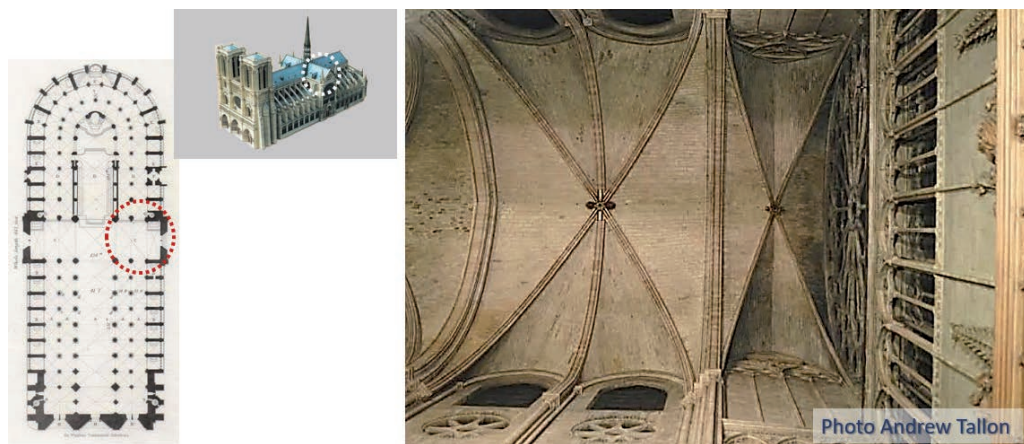


Figure 14

Voûtes du bras sud du transept photographées par Andrew Tallon en 2012. De gauche à droite : (i) un des voûtains de la croisée, (ii) voûte sexpartite (iii) voûte quadripartite (à droite). Le plan de la cathédrale situe l'emplacement de ces voûtes.

La photo de voûtes montrée en figure 14 a été prise en 2012 par Andrew Tallon, historien de l'art belge, qui a créé bien avant l'incendie un relevé 3D précis de Notre-Dame de Paris. On y voit les voûtes sexpartite et quadripartite du bras sud du transept. La voûte de la croisée est toujours en place, à gauche.

Dans la même partie de l'édifice, l'état des deux voûtes fin 2020-2021 est présenté en **figure 15**. Les surfaces sont largement impactées par des cristallisations salines nommées efflorescences⁹. Dans la zone proche du trou de la croisée, de très graves altérations se manifestant par des desquamations¹⁰ et de la

désagrégation granulaire¹¹. Ces phénomènes sont extrêmement préoccupants car les pierres des voûtains n'ont que 20 cm d'épaisseur : lorsque 5 cm sont perdus, il y a lieu de s'inquiéter. La contamination saline est ici principalement du gypse, ce minéral mentionné plus haut à propos de la chape de plâtre. C'est la dissolution de ce minéral par l'eau de pluie et sans doute celle de l'incendie, puis sa cristallisation, qui a provoqué les dégradations de la voûte du transept sud.

2.4. Les remèdes à la pollution saline

Le meilleur remède pour traiter une pollution saline est de plonger l'objet dans un bain pour dissoudre les sels et les

9. Migration d'éléments minéraux à la surface d'un matériau poreux en formant un dépôt.

10. Écaillage superficiel des roches, qui détache des plaques d'épaisseur millimétrique ou centimétrique.

11. Fait que les différents grains composant la roche se séparent les uns des autres, se désagrègent.



Figure 15

Voûtes du bras sud du transept moins de deux ans après l'incendie, montrant de larges zones blanches correspondant à des efflorescences de gypse, ainsi que des pertes de pierre par desquamation et désagrégation granulaire.

éliminer par diffusion¹² des ions. Dans le cas de Notre-Dame, c'était évidemment impossible. C'est donc un autre principe lié aux propriétés capillaires des matériaux poreux – l'advection – qui a été mis en œuvre.

Pour que l'advection soit possible, il faut que l'objet à traiter soit un solide poreux et capillaire. Un cataplasme lui-même poreux et capillaire, imbibé d'eau, est appliqué sur l'objet. Le réseau poreux du cataplasme doit être capable à la fois de fournir de l'eau au support pour dissoudre les sels, mais aussi dans un deuxième temps, d'exercer une succion de l'eau préalablement apportée au support et transformée en une solution saline. Ainsi, le

réseau poreux du cataplasme doit pouvoir d'abord développer une pression capillaire plus faible que celle du support, puis dans un deuxième temps, être capable de développer une pression capillaire plus forte que celle du support. Pour remplir ces conditions les formulations sont souvent composées de matériaux très fins comme des argiles ou des poudres de cellulose, auxquels sont adjoints des granulats. Pour assurer une taille de pores adéquate, on compte à la fois sur la taille des grains et sur le retrait de séchage. Mais l'advection n'est possible que si le contact capillaire entre l'objet et le cataplasme est maintenu pendant tout le processus de dessalement ; autrement dit, le cataplasme ne doit pas se détacher en rétrécissant trop au séchage.

12. Transport des éléments dû à une différence de concentration.

Pour étudier le réseau poreux d'un cataplasme, deux techniques analytiques sont utilisées : la microscopie électronique à balayage (MEB) pour examiner l'agencement, la taille et la forme de ses composants (*figure 16*), et la porosimétrie par intrusion de mercure (MIP) pour mesurer sa distribution porale (*figure 17*).

En *figure 16*, deux types de cataplasmes sont comparés au MEB : l'un est en poudre de cellulose (CEL), et l'autre est un mélange de kaolin (une argile composée de kaolinite pour l'essentiel) et de sable.

On constate aisément que les pores du cataplasme CEL sont très proches en taille, et que le constituant est un matériau fibreux très poreux (Nt : 80 %) et dont la porosité interstitielle est relativement grande (diamètre : 0,05 μm). L'autre cataplasme montre de gros pores, un grain de sable partiellement dénudé et un matériau particulaire de texture très fine, la kaolinite, qui développe une porosité interstitielle extrêmement petite (diamètre : 10 μm).

L'analyse par MIP de ces mêmes cataplasmes complète leur caractérisation. Les

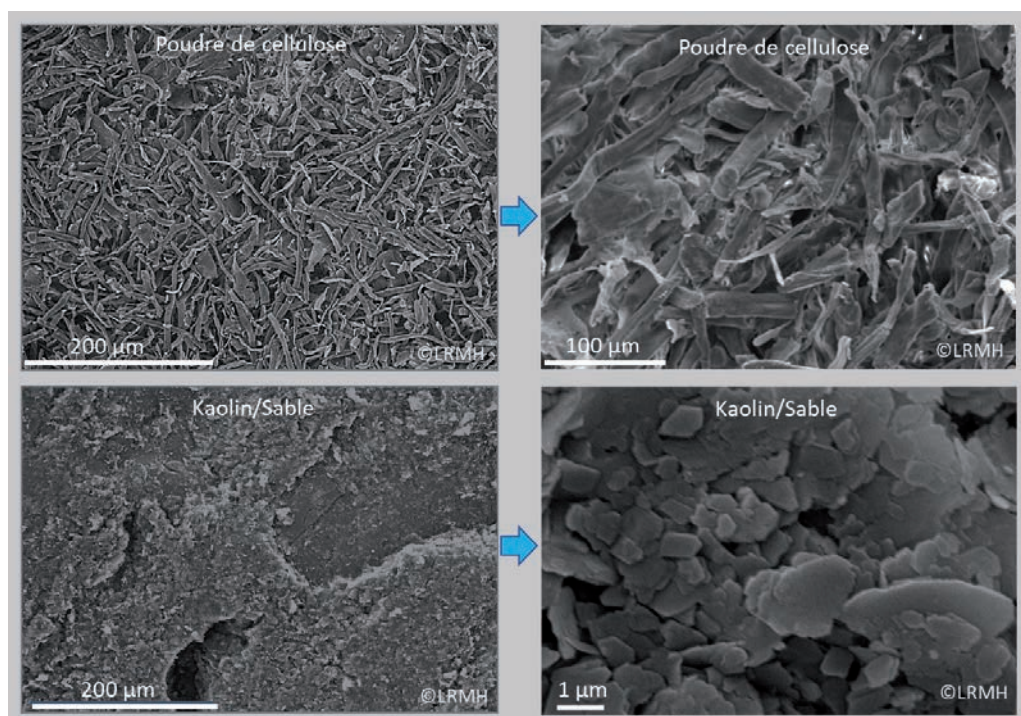


Figure 16

Images en microscopie électronique à balayage de deux cataplasmes de dessalement : en haut de la poudre de cellulose, se présentant sous forme de fibres, en bas un mélange kaolin-sable, dont la fraction argileuse est composée de plaquettes de kaolinite extrêmement petites.

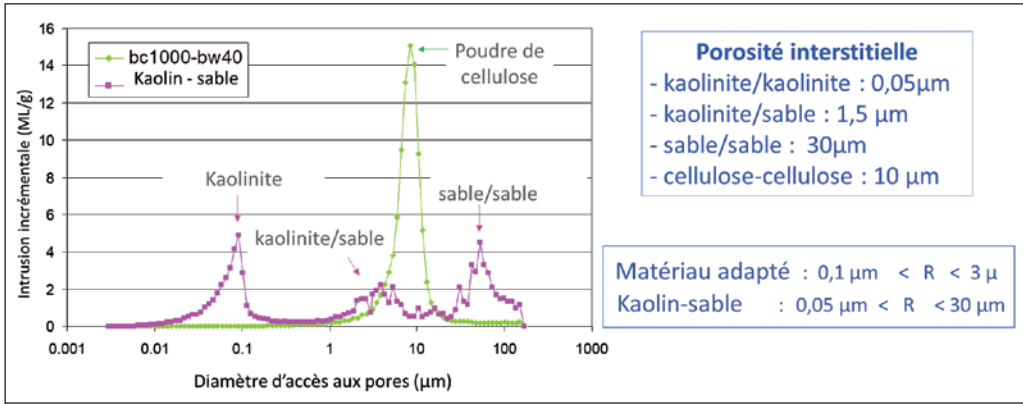


Figure 17

Distribution porale par intrusion de mercure (MIP) de deux cataplasmes candidats : kaolin Imerys/sable 0,5-1 mm et poudre de cellulose.

courbes de la **figure 17** permettent de visualiser leur distribution porale : le mélange Kaolin-sable est en rose, la poudre de cellulose en vert. L'analyse MIP des pierres des voûtes de Notre-Dame a permis de conclure que c'est le mélange kaolin-sable qui remplit les conditions requises pour les opérations de dessalement : celui-ci présente en effet deux gammes de pores majoritaires qui encadrent les gammes de pores des pierres des voûtes de Notre-Dame, les plus affectés par les désordres dus aux sels. C'est cette formulation-là que notre laboratoire a proposée aux architectes de Notre-Dame.

Les photos de la **figure 18** ont été prises en 2022, au cours des opérations de dessalement des voûtes. Après une aspiration de toutes ces surfaces, non illustrée ici, sont indiquées les différentes étapes du processus :

(i) ouverture des joints qui seront restitués après dessalement ; (ii) application d'un cataplasme de kaolin-sable – préalablement humecté – à l'aide d'un pistolet pneumatique à crépir ; (iii) talochage, destiné à lisser la surface et à réduire l'épaisseur à 5-10 mm (hors joints), pour que la compresse adhère bien et n'ait pas de retrait de séchage ; (iv) une fois appliqué, le cataplasme va sécher à un rythme dépendant de l'humidité du support. Le cataplasme ressemble tout à fait à un enduit : il reste adhérent sur des parties horizontales en surplomb, ce qui n'était pas du tout évident au départ et a beaucoup facilité les opérations. Il est censé rester le plus longtemps possible pour pouvoir absorber les sels jusqu'au séchage complet de la voûte. La tâche à accomplir est considérable, les compagnons font preuve d'un dévouement et d'un professionnalisme exceptionnels.



Figure 18

Chantier de conservation-restauration des voûtes du bras sud du transept.

3 Les impacts indirects de l'incendie sur Notre-Dame

3.1. Les problèmes de sels liés au nettoyage des maçonneries intérieures

Alors que les chapelles du chœur de la cathédrale ont gardé leurs décors peints au ^{xix}^e siècle sous la direction de Viollet-le-Duc, les maçonneries des quatorze chapelles de la nef en sont aujourd'hui dépourvues. Ces décors ont été éliminés dans les années 1960. Les maçonneries de pierre appareillée se sont encrassées et ont été polluées par le plomb micro-particulaire de l'incendie. Mais une partie non négligeable de la pollution au plomb dans ces chapelles provient des infimes traces du décor ^{xix}^e siècle, réalisé avec de la peinture au plomb.

L'une des chapelles de la nef, Saint-Éloi, a été échafaudée fin 2019 pour réaliser des tests de déplombage et de nettoyage sur tous les matériaux, y compris sur la pierre. Pour répondre aux exigences des autorités sanitaires, l'utilisation des cataplasmes en général, et des agents complexants en particulier, a considérablement augmenté ces dix dernières années en France : il y a encore peu de temps, il était devenu obligatoire que la teneur en plomb en surface atteigne des valeurs inférieures à $1000\mu\text{g}/\text{m}^2$ après nettoyage. Ceci a conduit les entreprises à introduire de plus en plus d'agents complexants dans les formules de nettoyage, ceux-ci permettant de réduire drastiquement le taux de plomb résiduel en surface après nettoyage.

La note d'alerte¹³ produite récemment par notre laboratoire en collaboration avec le CICRP et le laboratoire ERM explique simplement le problème : « *Les agents complexants (séquestrants ou chélateurs) sont des substances chimiques qui possèdent la propriété de fixer des ions positifs pour former un complexe soluble stable. Le plus connu est l'EDTA ; les sels di- et tétra-sodiques d'EDTA sont très utilisés pour extraire sous forme de complexes les ions métalliques indésirables comme le fer ou le plomb mais aussi d'autres ions positifs comme le calcium des oxalates ou des sulfates, en particulier le gypse dont les cristallisations sont le liant majeur de nombreuses salissures. Lorsqu'ils captent ces ions indésirables, les agents complexants libèrent en échange des ions sodium. Ce sodium (Na⁺) en excès s'associe naturellement avec les ions négatifs présents en solution, notamment les sulfates abondants sur les supports calcaires ou les liants à base de plâtre. Les sels qui se forment alors, fréquemment des sulfates de sodium (thénardite ou mirabilite), sont identifiés comme des espèces solubles hygroscopiques particulièrement nocives pour les supports contaminés. Des phénomènes de dégradation (efflorescences, désagrégation, desquamation) peuvent se développer rapidement sur les surfaces traitées* ». L'usage de ces composés a entraîné

l'apparition de problèmes importants sur des chantiers de restauration ces dernières années.

Conscients de ces difficultés, nous avons voulu comparer à Notre-Dame des cataplasmes à base de latex ou d'argile, en veillant à évaluer les formules comportant ou non des agents complexants. La **figure 19** résume la procédure en deux étapes suivies pour la campagne de tests.

Il s'est trouvé que l'une des formules à base d'argile contenant des agents complexants s'est très facilement éliminée en étape 1 mais guère en étape 2, entraînant un retard incompatible avec les conditions du futur chantier (**figure 20**).

Soupçonnant une influence des conditions thermohydriques de l'air ambiant sur le comportement déconcertant des cataplasmes, nous avons reporté les différentes étapes du traitement sur le diagramme d'évolution de l'humidité relative et de la température de l'air, que nous avons pris soin d'enregistrer au niveau de la chapelle Saint-Éloi pendant toute la durée des tests (**figure 21**) Nous en avons conclu que ce cataplasme contenait une substance hygroscopique ou qu'une substance hygroscopique s'était formée par interaction entre l'un de ses composants et une ou plusieurs substances présentes sur le support traité. Comme ce même cataplasme, dans sa formulation sans agent complexant, s'est montré satisfaisant en phases 1 comme en phase 2, nous en avons conclu que le composant à incriminer était probablement l'agent

13. Source : <https://www.lrmh.fr/Default/doc/SYRACUSE/233613/note-d-alerte-compresses-et-cataplasmes-susceptibles-de-contenir-des-agents-complexants-mise-en-gard>



Figure 19

Tests de nettoyage des maçonneries polluées par le plomb dans la chapelle Saint-Éloi.

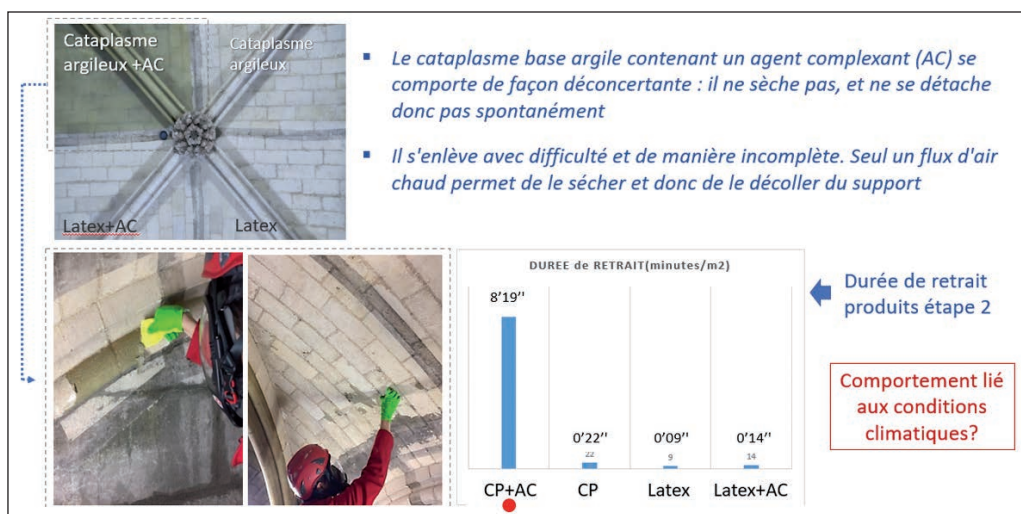


Figure 20

Comparaison des cataplasmes avec et sans complexants. CP : cataplasme ; AC : agent complexant.

ou les agents complexants du cataplasme défectueux.

À l'issue de ces tests, notre laboratoire a proposé aux architectes de n'utiliser aucun produit contenant des agents complexants sur le chantier de nettoyage – déplombage des parements dépourvus de

décors peints à l'intérieur de la cathédrale. Les deux formules sélectionnées par notre laboratoire ont ensuite été testées avec succès dans le cadre d'un chantier expérimental concernant l'intégralité des surfaces d'une chapelle de la nef, et du bas-côté attendant (figure 22).

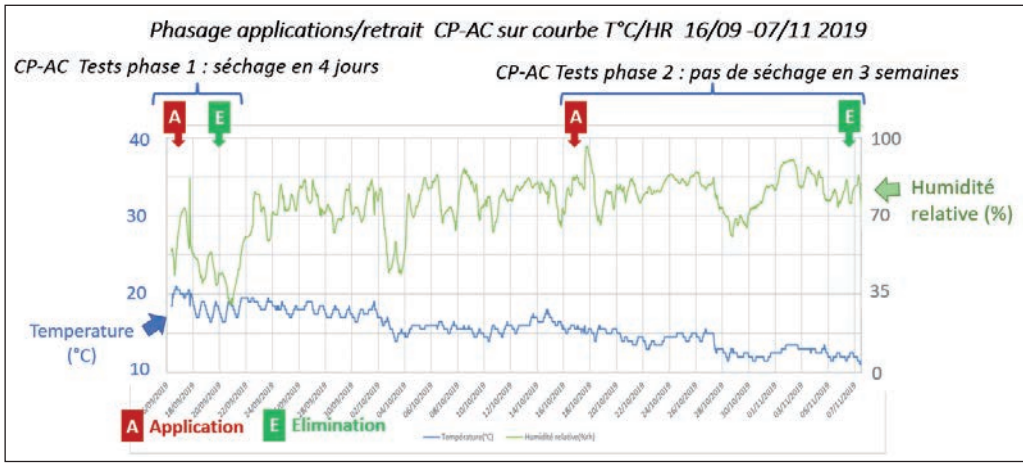


Figure 21

Report des différentes étapes du traitement avec le cataplasme déféctueux sur le diagramme d'évolution de l'humidité relative et de la température dans la chapelle ayant fait l'objet de tests de nettoyage.



Tests de nettoyage-déplombage
Résultat étapes 1 et 2

Prélèvement lingette pour mesure
pollution plomb surfacique

Figure 22

Tests de nettoyage-déplombage dans la chapelle Saint-Éloi. À gauche, zone de tests de phase 1 en « code-barres », sur d'étroites bandes de 10 x 200 cm (application manuelle, 11 méthodes) et zone de tests de phase 2 sur des zones de plusieurs m² (4 méthodes parmi les 11 testées en phase 1). À droite : prélèvement par lingette sur une zone nettoyée, pour mesurer la pollution surfacique en plomb acido-soluble.

3.2. Contaminations salines apparues lors de tests de déplombage-nettoyage sur maçonnerie extérieure

Pour finir, nous allons évoquer une opération menée non pas à l'intérieur mais à l'extérieur de la cathédrale, au

niveau d'un parement exposé au nord. Six formulations de cataplasmes du marché ont été appliquées selon la procédure « code-barres » déjà mise en œuvre à l'intérieur de l'édifice. Tous les produits testés étaient proposés comme étant susceptibles de nettoyer

- ❖ Efflorescences de sulfate de sodium
- ❖ Augmentation significative de la teneur en sodium à 0-1cm de profondeur*

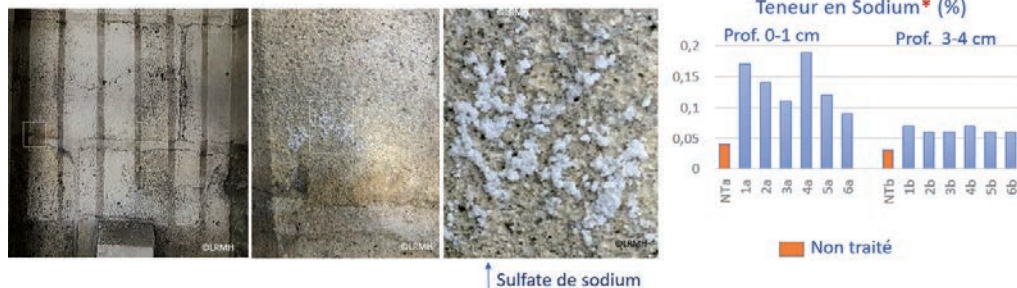


Figure 23

Contamination saline apparue sur maçonnerie extérieure dans les zones d'essais de 6 cataplasmes du marché vendus comme efficaces pour le nettoyage et le déplombage de la pierre. À droite, les diagrammes montrent des teneurs en sodium très importantes par rapport au témoin non traité et ce, surtout à faible profondeur. Source : ERM 2021.

les surfaces extérieures tout en réduisant la contamination par le plomb (*figure 23*). Les termes « cataplasmes » ou « compresses » de nettoyage sont utilisés pour désigner divers mélanges du commerce se présentant sous forme de pâte ou de gel hydraté, constitués le plus souvent d'argiles, de fibres de cellulose mais aussi d'autres charges comme des sables par exemple. Ces matériaux peuvent contenir aussi des ajouts de composés chimiques actifs, en faibles concentrations, constitués par des agents complexants,

des tensio-actifs ou des sels d'ammonium. Ces ajouts ont pour but de favoriser l'extraction des substances indésirables présentes dans les encrassements superficiels d'une maçonnerie ou d'une sculpture.

Pour éviter d'utiliser des cataplasmes ou des compresses susceptibles de conduire à la formation de ces sels nocifs, il est très important de réaliser des tests de nettoyage en suivant l'évolution de la contamination saline des supports et particulièrement, celle du sodium.

Conclusion : un « grand chantier » comme « laboratoire »

La pollution par les sels est l'une des plus redoutables par sa fréquence, son étendue et sa diversité. Elle affecte toutes les circonstances de l'existence : de la vie quotidienne aux réalisations urbaines et industrielles, aux installations récentes si elles manquent de soin aux objets anciens voire, archéologiques. Tout chantier

de restauration rencontre donc ces questions dans ses priorités. Mais la pollution saline est aussi très sensible aux conditions chimiques ou physiques ; c'est dire qu'un incendie comme celui de Notre-Dame place les ingénieurs dans des conditions souvent inédites qui demandent la mise au point de procédures nouvelles.

Ceci donne à la lutte contre la pollution saline à Notre-Dame une originalité particulière. Les procédés connus doivent être adaptés et les facteurs d'échelle obligent parfois à les re-fonder. Les prévisions sont bien délicates et pourtant, le résultat doit absolument être obtenu, d'où la recherche de méthodes et de tests variés qui donnent confiance. Nous pourrions parler d'une approche aussi exigeante que celle des laboratoires de recherche mais conduite à des dimensions géantes. Ce chapitre montre bien ces compétences pragmatiques et intelligentes que les équipes d'opérateurs ont su mettre en œuvre et les progrès qu'elles apporteront bien au-delà du chantier de Notre-Dame.

Remerciements

Les travaux résumés dans cet article sont le fruit de recherches et essais menés en collaboration avec de nombreux collègues que je souhaite ici remercier : Jérémy Hénin et Lise Leroux, respectivement ingénieurs d'étude et de recherche au LRMH ; François Rassinoux, directeur du laboratoire ERM ; Brittany Branche restauratrice de sculptures et Anne Bourgès ingénieur de recherche au C2RMF. Notre intervention à Notre-Dame a été grandement facilitée par la bienveillance et la confiance de Philippe Villeneuve et Pascal Prunet, architectes en chef des Monuments Historiques, ainsi que leurs collaborateurs, en particulier Alexis Giroud, architecte du patrimoine.

