

La conservation- restauration et la recherche sur les vitraux de la cathédrale Notre-Dame de Paris

Claudine Loisel et Barbara Trichereau

Claudine Loisel est coordinatrice du groupe de travail « Verre », ingénieure de recherche, responsable du pôle scientifique « Vitrail » du Laboratoire de Recherche des Monuments Historiques (LRMH), ministère de la Culture.

Barbara Trichereau est ingénieure d'études au pôle scientifique « Vitrail » au Laboratoire de Recherche des Monuments Historiques.

1 Introduction : état des vitraux après l'incendie du 15 avril 2019

Le 15 avril, tout le monde s'est posé la question : dans quel état seront les vitraux ? Dès le lendemain, la maîtrise d'œuvre¹ du chantier de restauration de Notre-Dame et Philippe Villeneuve, l'architecte en chef des monuments historiques, ont pu assurer que tous les

vitraux historiés² étaient globalement intacts à l'exception de quelques casses thermiques et de petites fragilités ponctuelles. En revanche, (*figure 1*) la vitrerie des combles, au niveau de la toiture, mise en place au XIX^e siècle par Viollet-le-Duc avait été complètement détruite.

2. Les vitraux historiés décrivent les scènes de l'Évangile et de l'Ancien Testament à l'attention des chrétiens analphabètes, également des scènes de la vie quotidienne ou encore, dans le cas des rosaces en bout de nef, sont des symboles théologiques.

1. La maîtrise d'œuvre, MOE architecture : ses missions vont des études préliminaires, à la conduite opérationnelle des travaux, jusqu'à la réception de chantier.



Figure 1

Après l'incendie, la vitrerie située dans les combles de Notre-Dame a subi d'importants dommages.

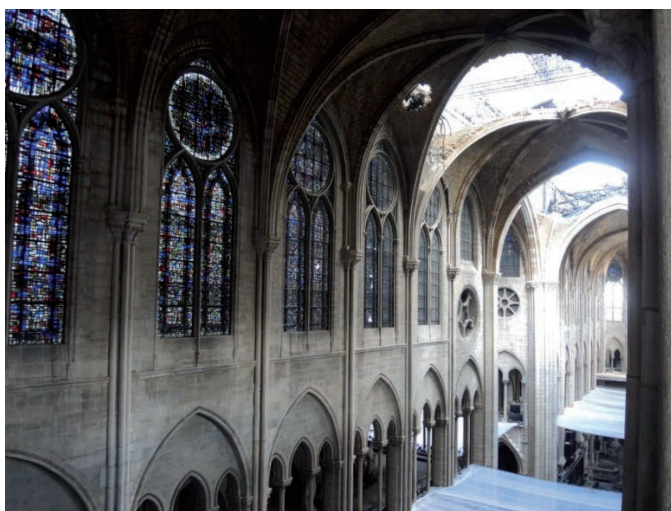


Figure 2

La chute de la flèche a provoqué quelques dégâts légèrement visibles, lacunes blanches, sur quatre panneaux de vitraux.

En bas de la photo de la **figure 1**, on voit que la rose du bras sud du transept est intacte. Sur la photo (**figure 2**) de la nef côté nord, seule une des baies a été éraflée par la chute de la flèche qui a effleuré les vitraux, mais légèrement.

Ce dessin réalisé par *National Geographic* (**figure 3**), montre la disposition des vitraux de Notre-Dame et donne une idée du nombre important de ces derniers.

Vous avez au rez-de-chaussée, ce que l'on appelle classiquement les chapelles basses avec trente-sept baies. Le niveau 1 est le niveau des tribunes avec quarante-trois baies. Le niveau 2 est le niveau des baies hautes avec un ensemble de quarante-quatre baies qui constitue les vitraux historiés. Puis, dans la vitrerie de la charpente, au niveau 4, se trouvaient les trois baies qui ont explosé qui étaient en vitrerie classique losangée de verre, incolore sans peinture, datant du *xix^e* siècle.

Si l'on s'intéresse aux époques de ces vitraux, elles vont du *xii^e* au *xx^e* siècle, et il est rare dans un édifice, d'avoir autant de vitraux d'époques différentes. Les vitraux du *xii^e* siècle se trouvent dans les deux roses du transept : la rose nord et la rose sud. Les vitraux du *xiii^e* siècle sont dans les trois autres roses. Les vitraux du *xvi^e* sont dans la rose occidentale, et les vitraux du *xviii^e* siècle sont dans deux chapelles basses. Avec l'arrivée de Viollet-le-Duc et de son grand projet au *xix^e* siècle, beaucoup de vitraux ont été installés afin de redonner toute sa splendeur à Notre-Dame. Au *xx^e* siècle, en 1960 et 1961, Jacques Le Chevallier a créé les vitraux des baies hautes de la nef.

Sur la **figure 3**, deux liens permettent de trouver des informations complémentaires et des données écrites par les historiens d'art du centre André Chastel sur tout le panel des vitraux de Notre-Dame.



Sites Internet

Pour les vitraux du Moyen Âge : <https://notre-dame-de-paris.culture.gouv.fr/fr/vitraux-moyen-age>

Pour les vitraux du XIX^e siècle : <https://notre-dame-de-paris.culture.gouv.fr/fr/vitraux-xixe-siecle>

Figure 3

Notre-Dame de Paris et les sites d'accès à l'histoire des vitraux du XIX^e siècle et du Moyen Âge.

2 Réparation et restauration des vitraux de Notre-Dame

Dès le 16 avril 2019, l'organisation des travaux est lancée par Philippe Villeneuve qui s'est très vite entouré de Pascal Prunet et de Rémi Fromont (cf. **chapitre 3**, Matériaux et reconstruction). Compte tenu des trous dans la voûte, il fallait entamer les travaux sur cette maçonnerie haute pour libérer l'espace et travailler aussi sur le renforcement des contreforts. Pour mettre en place ces opérations, il fallait libérer l'espace et déposer notamment les vitraux pour faciliter l'accès : vingt-cinq verrières ont été déposées en neuf jours, du 25 avril au 3 mai, 1^{er} mai compris grâce au regroupement d'ateliers qui a réalisé un travail exceptionnel. Il fallait faire vite : sept groupements d'ateliers avec cinquante-et-une personnes ont œuvré ensemble (les ateliers Babet, Baudoin, Duchemin,

Insingrini-Groult, Loire, Parot, Vitrail France, la manufacture Vincent-Petiet) et ce fut une très belle aventure humaine malgré la catastrophe (**figure 4**).

Très rapidement, deux phases de protocole sont définies et mises en œuvre. La phase 1 est le protocole de décontamination et de restauration mis en



Figure 4

Les équipes de différents ateliers ont déposé les baies hautes pour faciliter les travaux.

place par le LRMH³ pour les différents matériaux. La phase 2, extrêmement importante, permettra de valider les protocoles à l'échelle de l'entreprise, et sera réalisée sur des chapelles tests afin d'évaluer les coûts et les délais pour bien définir les cahiers des charges et lancer les appels d'offres nécessaires à la restauration.

Revenons à la première étape de dépose des vitraux des verrières hautes. Les historiens d'art du centre André Chastel ont été essentiels, aux côtés des restaurateurs et des scientifiques de la conservation que nous sommes, pour soutenir la maîtrise d'œuvre et la maîtrise d'ouvrage dans ce drame. Un très gros travail de

3. Le Laboratoire de Recherche des Monuments Historiques (LRMH), est un service à compétence nationale du ministère de la Culture, rattaché au service chargé du patrimoine au sein de la direction générale des patrimoines.

numérotation des baies dans l'édifice (*figure 5*) et de documentation sur l'historique et l'iconographie de ces verrières a été réalisé et rassemblé dans des fiches techniques avec numérotation des panneaux (*figure 6*), ce afin de faciliter la dépose des vitraux.

Il ne faut pas oublier qu'un vitrail, ou une verrière, est composé d'un ensemble de panneaux posés sur une serrurerie, constituant en quelque sorte un puzzle géant ; il est donc important de savoir dans quel sens ont été mis les panneaux pour s'y retrouver. Cette documentation très précieuse a notamment été réalisée par Karine Boulanger, historienne d'art du vitrail au centre André Chastel qui s'est mise au travail dès le 16 avril au matin, de façon à fournir les documents au plus vite aux restaurateurs afin qu'ils puissent faire le travail de dépose. La *figure 7* illustre ce travail de dépose.

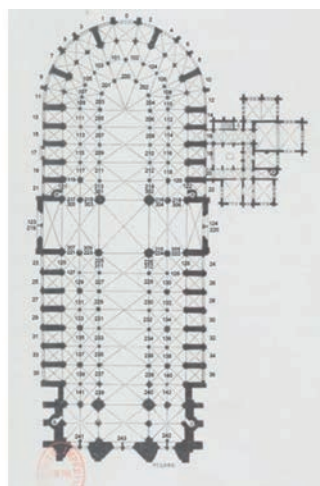


Figure 5

Avant de commencer les travaux, un gros travail de numérotation et de documentation est réalisé.

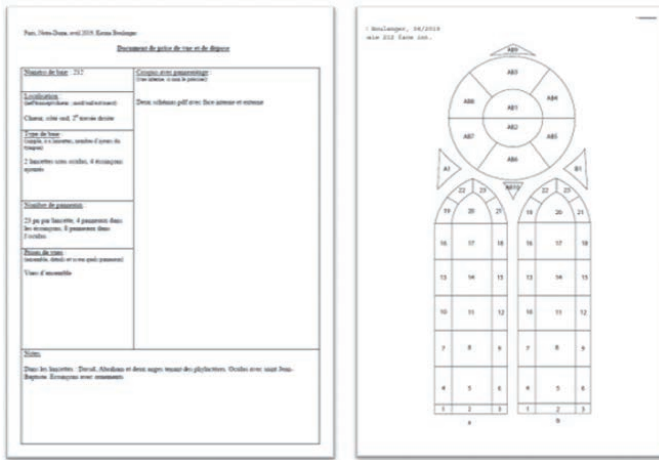


Figure 6

Les panneaux sont soigneusement numérotés et fichés pour faciliter les travaux et éviter de les mélanger.



Figure 7

Clichés des vitraux à déposer après l'incendie. On peut constater l'ampleur des travaux à réaliser.

Quand on dépose des vitraux, il faut commencer par démonter ceux du bas et pour monter progressivement. Pour les remettre, il s'agit en fait de faire l'inverse pour éviter les casses. Les panneaux déposés sont mis en caisse et stockés dans des conditions sécurisées en attendant leur future restauration. Il en a été de même dans la

nef avec les vitraux de Jacques Le Chevallier (figure 8).

Les échafaudages nécessaires pour réaliser la dépose ont été aussi montés en urgence mais avec toutes les sécurités qui s'imposaient (figure 9).

Quand le chantier a commencé le 25 avril, nous n'étions pas encore sûrs que l'édifice allait

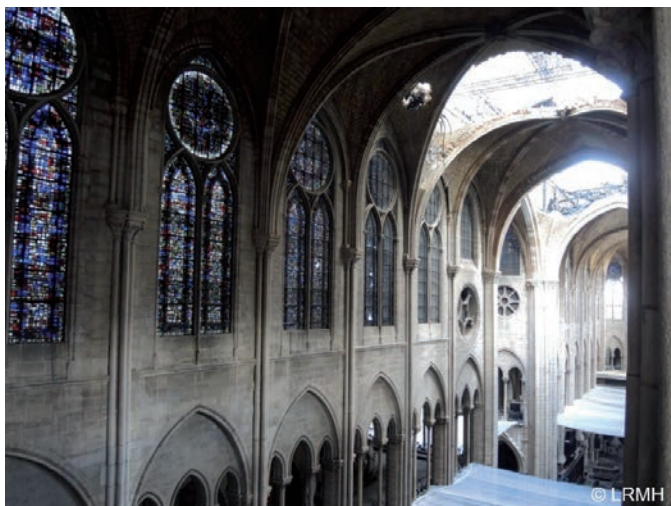


Figure 8

Vitraux de Jacques Le Chevallier, situés du côté nord de la nef.



Figure 9

Les échafaudages nécessaires à la dépose des vitraux ont été construits très rapidement pour permettre un travail en toute sécurité.

tenir ; il fallait donc agir au plus vite. Douze baies, avec soixante-dix-neuf panneaux par baie, donc plus de neuf cent quarante-huit panneaux, devaient être démontés et tout cela dans une grande tension. Il fallait aussi trouver des solutions pour descendre les panneaux de la partie haute. Au niveau du chevet, nous avions

un monte-charge mais pour la nef, que ce soit du côté sud ou du côté nord, il nous fallait trouver une solution efficace, rapide et sûre pour les hommes et pour les œuvres ; c'est l'idée du conteneur qui a été suggérée et validée de façon à être les plus opérationnels possible (*figure 10*).

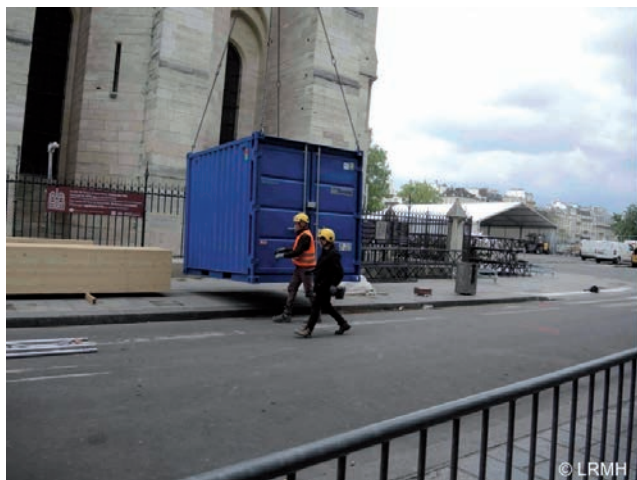


Figure 10

Les panneaux situés des deux côtés de la nef ont été descendus à l'aide d'un conteneur, solution originale et efficace trouvée pour pallier le manque de monte-charge.

De plus, très vite, un nuage de fumée jaunâtre, riche en plomb de la toiture, et évidemment riche en particules, s'est déposé sur tout l'édifice.

2.1. Phase 1 : mise au point du protocole de décontamination

Le laboratoire LRMH a réalisé la mise au point du protocole de décontamination dans deux chapelles figurant en rouge sur la **figure 11** : la chapelle Saint-Éloi et l'entrée de la sacristie des messes. Tous les matériaux étaient concernés – les pôles scientifiques « Vitrail », « Pierre », « Métal », « Bois », « Peinture murale » – puisqu'évidemment, nous avons le même dépôt de surface sur une petite épaisseur. Il a donc été intéressant de croiser nos regards et nos données pour mieux comprendre et caractériser la nature chimique du dépôt. Chacun des pôles devait ensuite optimiser ses méthodes d'élimination tout en préservant les matériaux.

2.2. Phase 2 : validation des protocoles de décontamination auprès des entreprises

Cette première phase terminée, la phase 2 s'est tout de suite enclenchée sur les chapelles de la Guadalupe et de Saint-Ferdinand en haut de la **figure 11**, côté nord.

Pour la chapelle de la Guadalupe, l'idée a été de faire une intervention de décontamination *in situ* pour abaisser le niveau de plomb. Pour cette étape, les restaurateurs ont dû travailler avec les équipements de protection individuelle (EPI) très contraignants mais indispensables à la sécurité des personnes.

Dans la chapelle Saint-Ferdinand, choix a été fait de procéder à la décontamination mais aussi à une restauration. L'exemple resplendissant des peintures murales est présenté dans le chapitre de Marie Parent-Andaloro. Sur les vitraux, le résultat s'est révélé aussi de très bonne qualité puisque la restauration a pu

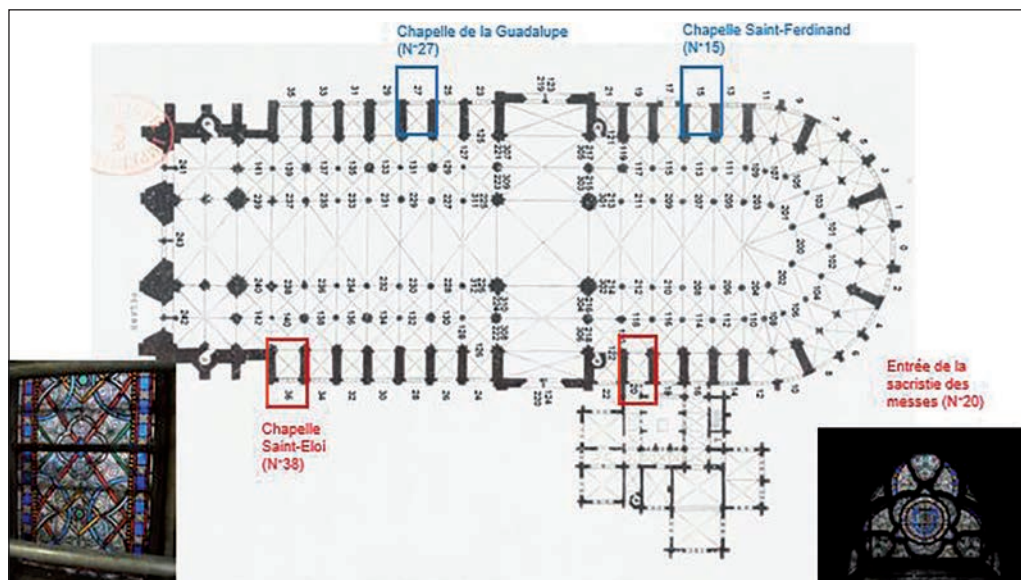


Figure 11

Les différents lieux qui ont permis la mise en place du protocole de décontamination et de restauration, et le cahier des charges pour les entreprises.

être faite sur panneaux déposés dans les ateliers.

Riche de toutes ces données et de tous ces résultats, la maîtrise d'œuvre – donc les architectes – a pu élaborer le cahier des charges et lancer les appels d'offres aux entreprises.

2.3. Protocole de décontamination des vitraux

Pour mettre au point le protocole de décontamination des peintures et des vitraux, le LRMH est intervenu directement sur le terrain comme on le voit sur la *figure 12* afin d'établir un premier diagnostic.

Puis, très vite, des prélèvements ont été effectués pour analyser les dépôts, leur consistance, leur composition chimique pour adopter un traitement de décontamination adapté.

Un grand nombre de techniques, dont quelques-unes sont expliquées dans d'autres chapitres de cet ouvrage, sont utilisées ; ici, nous insisterons davantage sur la méthodologie.

Par exemple, dans les techniques de prélèvement sur les vitraux, nous avons utilisé une procédure de « scotch test » pour caractériser ces dépôts, évidemment associée à toute une méthodologie de localisation et de numérotation. Le scotch est appliqué sur les vitraux, dans des zones bien identifiées, en appuyant de façon uniforme. Il faut que tout soit réalisé par la même personne pour que les prélèvements soient comparables. Après mise en sachet et référencement de ce dernier, les analyses sont menées en laboratoire (*figure 13*).



Figure 12

Le LRMH est intervenu directement sur le terrain pour mener des observations et des caractérisations et faire des prélèvements.

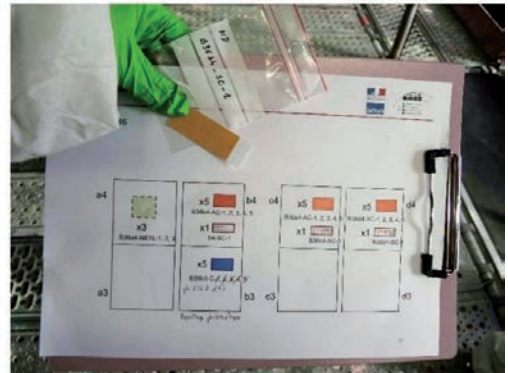


Figure 13

Les quatre étapes de la réalisation d'un « scotch test » pour permettre la caractérisation des dépôts sur les vitraux et les peintures.

La même méthodologie a été utilisée pour la pierre, pour la peinture murale, et nous avons pu ainsi comparer nos données. Les observations à l'œil nu ont été très vite complétées

par des observations au microscope 3D (figure 14) ; ces dernières ont permis d'élaborer des cartographies comme celles de la figure 15 sur l'ampleur de la baie.

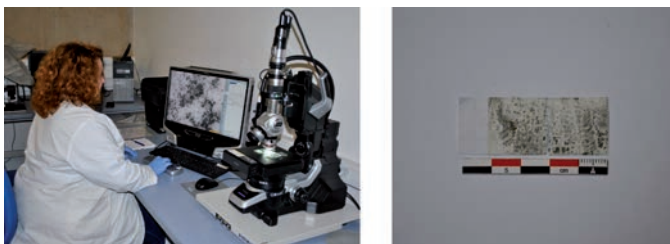


Figure 14

Le microscope 3D permet d'étudier les dépôts.

Mais il faut garder à l'esprit que ces vitraux datent de 1960, et qu'ils n'avaient jamais été touchés. On y retrouve donc un cumul de dépôt de particules atmosphériques datant de 1960, archive du temps assez intéressante.

Au laboratoire, ces analyses sont complétées par l'analyse au microscope électronique à balayage⁴ associé à une microsonde. Le procédé permet d'obtenir une information complémentaire sur la morphologie ainsi qu'une composition chimique qualitative et donc, de savoir quels éléments chimiques sont présents sans avoir toutefois vraiment la composition chimique quantitative.

Les résultats d'analyse ont mis en évidence la présence de beaucoup de gypse, de sulfate de calcium provenant de l'altération des mastics. Les verres, que ce soit ceux du XIX^e ou du XX^e siècle, étaient en parfait

état de conservation : pas de formation de produits d'altération, gypse ou syngénite⁵.

Les résidus de mastics proviennent de l'étape de masticage, réalisée lors de la fabrication du vitrail : on découpe les pièces de verre, on les peint, on les cuit, et on les insère dans une résille de plomb ; puis on applique du mastic, qui est un carbonate de calcium avec de l'huile de lin, de façon à rendre étanche la zone entre le plomb et le verre. Évidemment, sur la surface des vitraux, il reste toujours des petits résidus de mastic qui s'altèrent avec le temps et ce sont ces carbonates de calcium qui par des phénomènes de sulfatation⁶ vont se transformer en sulfate de calcium.

Sur les clichés de microscopie à balayage (figure 16), on peut voir des petites billes bien rondes et bien brillantes qui ont aussi été retrouvées sur les pierres et qui ont été identifiées comme du plomb provenant de la toiture, ainsi

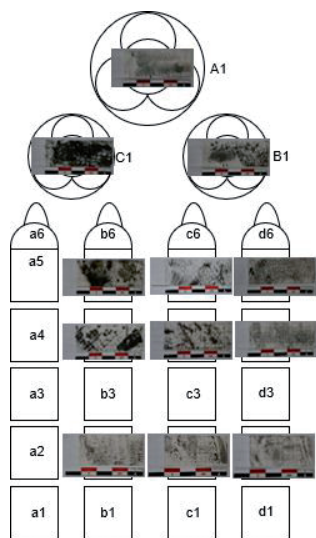


Figure 15

L'utilisation d'un outil tel que le microscope 3D permet de cartographier l'état du vitrail.

4. La microscopie électronique à balayage ou *Scanning Electron Microscopy* en anglais est une technique de microscopie électronique capable de produire des images en haute résolution de la surface d'un échantillon en utilisant le principe des interactions électrons-matière.

5. La syngénite est un minéral rare de sulfate de potassium et de calcium de formule $K_2Ca(SO_4)_2 \cdot H_2O$.

6. La sulfatation est le transfert d'un sulfate SO_4^{2-} ou groupe de sulfates à un accepteur.

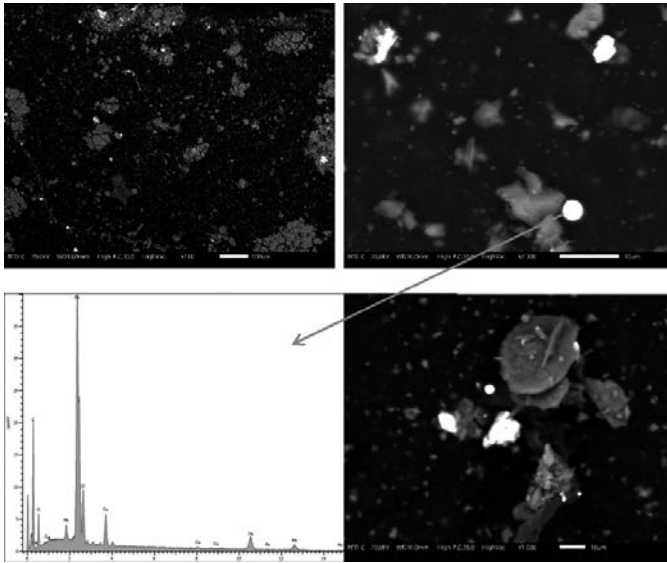


Figure 16

Le microscope électronique à balayage permet d'identifier les composants présents, notamment le plomb issu de la toiture.

que d'autres particules atmosphériques très petites.

La présence de plomb est plus importante du côté façade occidentale que du côté chevet car le nuage d'incendie s'est déplacé vers l'ouest. Toutes les données ont été croisées pour mieux comprendre les trajectoires du plomb. Mais il ne faut pas oublier que le vitrail contient intrinsèquement du plomb puisque les peintures brunes opaques (appelées grisaille), majoritairement présentes sur les verres, sont composées de silicate de plomb avec des oxydes de fer ou parfois de cuivre, et que les pièces de verre sont insérées dans un réseau de plomb. Donc, quand on parle de plomb dans le domaine du vitrail, il faut bien faire la part des choses. Les comparaisons avec les résultats des collègues des pôles

scientifiques « Pierre » et « Peinture murale », ont permis d'identifier la présence de particules de plomb provenant de l'incendie de la toiture.

Pour le vitrail, quelles sont les conclusions des analyses ? Une décontamination est possible sur les vitraux du XIX^e siècle qui ont des peintures de bonne adhérence. Il nous est possible de procéder à un nettoyage à l'aide d'un pinceau doux, couplé d'une aspiration contrôlée à l'aide d'un aspirateur équipé de filtres spécifique (filtres HEPA⁷, *figure 17*). Par la suite, la restauration sera réalisée sur panneaux déposés dans un atelier spécialisé de restauration de vitraux.

Ce protocole a été appliqué à l'échelle de l'entreprise dans

7. Filtre HEPA (*High Efficiency Particulate Air*) : filtre à particules aériennes à haute efficacité.

les deux chapelles côté nord pour évaluer les coûts et les délais. La **figure 18** montre l'espace de confinement créé autour des chapelles afin de procéder à un essai de décontamination en isolant cet espace propre du reste de la cathédrale contaminée.

À l'intérieur de cet espace de confinement, les vitraux ont été déposés pour être restaurés dans l'atelier Vitrail France à Neuville-sur-Sarthe (**figure 19**). Le résultat de la restauration est présenté sur la **figure 20** où l'on retrouve l'harmonie des couleurs

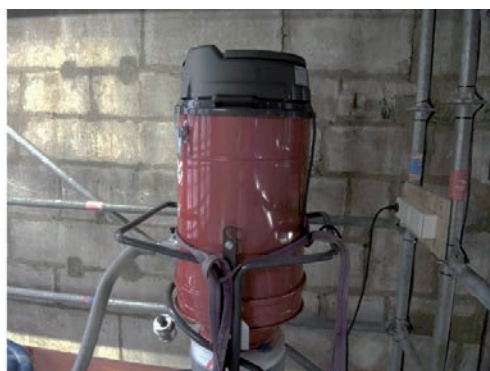


Figure 17

Pinceau et aspirateur à filtre HEPA qui permettent de retirer la couche de dépôt en douceur et de laisser ensuite le champ libre pour la restauration.



Figure 18

Un système de confinement créé à l'aide de bâches permet d'isoler les parties décontaminées de la cathédrale.



Figure 19

Les vitraux déposés dans l'atelier Vitrail France où ils vont être restaurés.



Figure 20

Les vitraux de la chapelle Saint-Ferdinand après décontamination et restauration.

des peintures murales et de l'ensemble de ces très beaux vitraux du ^{xix}^e siècle.

3 Le groupe de travail « Verre »

Depuis l'incendie de Notre-Dame, il a été décidé de créer des groupes de travail spécialisés, et notamment un groupe de travail « Verre » dont l'objectif est de réaliser un état des lieux des recherches dans ce domaine. De leur côté, les historiens souhaitent actualiser l'inventaire des vitraux d'Île-de-France datant de 1959, dans lequel sont décrits les vitraux de Notre-Dame. Réaliser un état des lieux des recherches, mettre en place des programmes de recherche scientifique autour de la cathédrale... une belle mouvance se met alors en place avec ces groupes de travail et ce chantier scientifique CNRS-ministère de la

Culture. L'objectif est de soutenir les actions de restauration pour Notre-Dame mais aussi de dépasser ce cadre en visant un élargissement vers les autres monuments. Un an après l'incendie de Notre-Dame, le 18 juillet 2020, nous avons eu à faire face à un autre incendie, celui de la cathédrale Saint-Pierre-et-Saint-Paul de Nantes où la façade occidentale, un joyau constitué de magnifiques vitraux datant du début du ^{xvi}^e siècle, a explosé et a été malheureusement très endommagé. L'expérience acquise sur le Chantier de Notre-Dame nous a permis d'utiliser la méthodologie mise au point pour arriver en renfort et répondre à la demande du terrain sur cette nouvelle catastrophe – et ce, même si chaque catastrophe détient ses propres particularités.

Dans ce groupe de travail « Verre », nous avons identifié

deux thématiques très importantes : la première se situe dans la continuité de ce qui a été présenté dans la mise au point des protocoles, c'est-à-dire caractériser les dépôts de surface sur les vitraux et comprendre leurs interactions avec les matériaux. La seconde concerne la recherche sur la connaissance des vitraux du ^{XII}^e au ^{XX}^e siècle, domaine particulièrement riche pour Notre-Dame.

Pour la première thématique, trois projets ont été mis en place : un premier sur la conservation/restauration des vitraux soumis à des catastrophes. Un deuxième qui concerne l'interaction du plomb sur les matériaux à Notre-Dame et le troisième qui porte sur le développement d'un nouvel outil pour la caractérisation stratigraphique des dépôts sur les vitraux de Notre-Dame.

La thématique 2 est traitée sur les vitraux qui sont dans les ateliers. Il s'agit de caractériser des verres et des peintures au cours et après la restauration et de mettre à jour le recensement des vitraux parisiens publié en 1978 par Louis Grodecki, Françoise Perrot et Jean Taralon et qui constitue le premier volume du recensement des vitraux de France.

3.1. Conservation/ restauration des vitraux soumis à des catastrophes

Un travail a été réalisé dans le cadre d'un mémoire de Master 2 en conservation/restauration des biens culturels pour diagnostiquer la nature des dépôts, les états des surfaces des œuvres, et comment

optimiser les protocoles d'urgence face à une catastrophe en croisant les deux cas de Notre-Dame de Paris et de la cathédrale Saint-Pierre-et-Saint-Paul de Nantes.

La caractérisation des dépôts et des états de surface est réalisée par des techniques de microscopie. Les méthodes et traitements de restauration chimiques ou mécaniques sont par la suite optimisés.

Sans lumière, un vitrail ne ressemble pas à grand-chose comme on peut le constater sur le panneau noir de la **figure 22a** qui correspond à la face interne d'un des panneaux du ^{XIX}^e siècle du Maréchal de Metz.

En revanche, lorsque la lumière vient jouer sur le vitrail, une force de luminosité extrêmement intéressante (**figure 22b**) transforme son aspect.

Le second projet « PlombND », financé par la région Île-de-France dans le cadre du Domaine d'Intérêt Majeur (DIM), matériaux anciens et patrimoniaux, toujours en cours de réalisation, regroupe trois partenaires : le LRMH, l'IMPMC⁸ et le LISA⁹. Il a pour objectif de caractériser les dépôts plombifères à l'échelle macro et nano en utilisant des microscopies avancées sur les différents matériaux : le verre, la pierre et le métal.

Le but est de comprendre les mécanismes de formation des dépôts de surface, les conséquences sur leur interaction avec le verre et d'élaborer des

8. L'Institut de Minéralogie, de Physique des Matériaux et de Cosmochimie.

9. Laboratoire Interuniversitaire des Systèmes Atmosphériques.

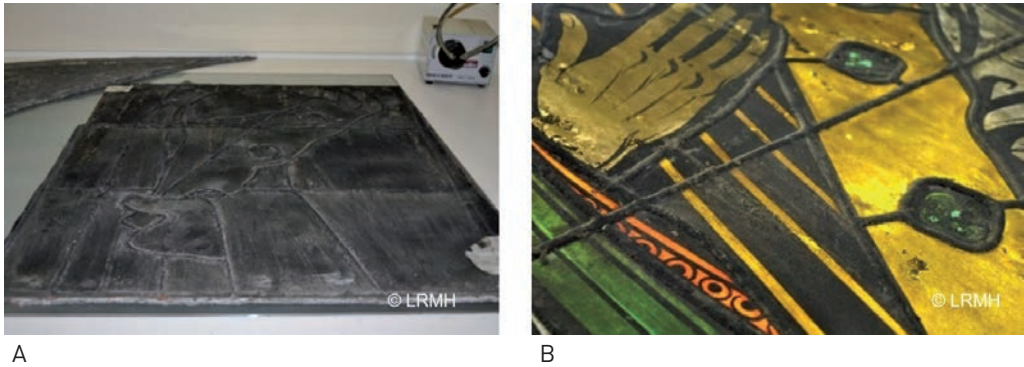


Figure 22

a) Face interne d'un panneau datant du XIX^e siècle, non éclairé, sans lumière transmise. b) Même vitrail cette fois avec la lumière transmise.

protocoles de décontamination adaptés pour chaque matériau support.

Le troisième projet se déroule dans le cadre d'une thèse financée par la Fondation EDF et en partenariat avec le C2RMF (Centre de Recherche et de Restauration des Musées de France), qui possède dans son sous-sol ce magnifique outil qu'est l'accélérateur Grand Louvre d'Analyse Élémentaire¹⁰ (AGLAE) (figure 23). Il s'agit de se concentrer sur l'observation et l'analyse de la couche stratigraphique du dépôt pour obtenir une information sur la caractérisation du plomb à la surface et en profondeur.

3.2. La pluralité des approches dans les études de vitraux en ateliers

La thématique 2 précédemment évoquée regroupe les

historiens de l'art du vitrail et les scientifiques de tout l'univers de la conservation : les chimistes, les physiciens, les géologues, les restaurateurs avec les architectes et les conservateurs. Les principaux enjeux scientifiques sont listés figure 24. Le degré

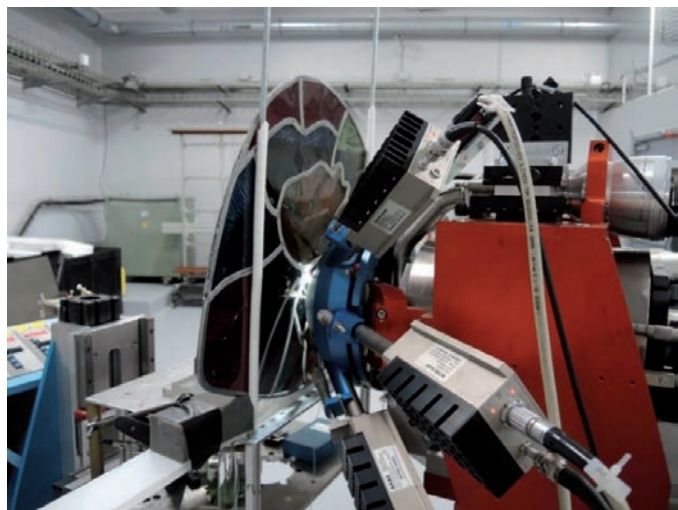


Figure 23

AGLAE, l'accélérateur pour l'analyse élémentaire des œuvres d'art et d'archéologie du Grand Louvre.

10. AGLAE, l'Accélérateur Grand Louvre d'Analyse Élémentaire est un appareil d'analyse destiné à l'étude des Œuvres d'art et d'archéologie.

Enjeux scientifiques :	Méthodologie
<ul style="list-style-type: none"> • S'interroger sur le degré d'authenticité des vitraux • Définir et quantifier la palette de couleurs des verres employés • Déterminer les compositions chimiques (matrice vitreuse et éléments colorants) pour remonter aux matières premières • Discuter des conditions de fabrication des verres • Compréhension des processus d'altération des verres • Distinguer les provenances temporelles et géographiques des verres 	<ul style="list-style-type: none"> • Archives, bibliographie, étude en atelier des matériaux et de leur mise en œuvre, étude de la peinture : historien de l'art • Analyses des matériaux : scientifique de la conservation, chimiste, physicien... • Observation des états de surface et de la morphologie • Comparaison de verres provenant de plusieurs sites

Figure 24

Les différents enjeux scientifiques et la méthodologie mis en œuvre pour les vitraux étudiés dans les ateliers.

d'authenticité des vitraux est intéressant lorsqu'on est face à eux pendant une restauration. Définir et quantifier la palette de couleurs, déterminer la composition chimique de la matrice vitreuse et identifier les éléments colorants pour remonter aux matières premières sont des objectifs difficiles que nous essayons d'atteindre. Discuter des conditions de fabrication d'un verre, savoir s'il a été fabriqué en cive¹¹ ou en manchon¹², ouvre encore d'autres voies. Comprendre les processus d'altération des verres reste toujours une base du métier

11. Technique de soufflage à la canne permettant la fabrication d'un verre plat. Synonyme de soufflage en plateau, les feuilles obtenues présentent une forme circulaire que l'on appelle « cive ». La cive ou plateau est une pièce de verre circulaire et plate avec une boudine en son centre, zone d'attache de la canne du souffleur de verre.

12. Technique de soufflage à la canne permettant la fabrication d'un verre plat grâce à l'obtention d'un manchon ou cylindre. Celui-ci est ensuite réchauffé puis étendu pour former une feuille rectangulaire.

de chimiste mais il est aussi important de distinguer les provenances temporelles et géographiques des différents ensembles.

Dans la méthodologie présentée (figure 24), on utilise évidemment les archives, la bibliographie et les historiens de l'art jouent un rôle essentiel. L'analyse des matériaux peut être faite par les scientifiques de la conservation : les chimistes, les physiciens. L'observation des états de surface, de leur morphologie, peut raconter beaucoup aussi de l'histoire d'un verre et puis évidemment, il faut comparer les résultats provenant de plusieurs sites.

Les méthodes non invasives et non destructives sont favorisées pour préserver ces œuvres d'art que sont les vitraux. En cela, l'Accélérateur Grand Louvre d'Analyse Élémentaire (AGLAE) est intéressant mais bien entendu, il ne peut pas analyser tous les panneaux. Il faut donc compléter avec d'autres techniques d'analyse comme les techniques de spectrométrie de fluorescence X qui, bien que qualitatives, sont extrêmement

utiles. Les spectroscopies Raman, la spectroscopie optique, l'imagerie hyper-spectrale¹³, toutes ces technologies sont utilisées par les équipes pour mieux comprendre et caractériser l'ensemble des vitraux de Notre-Dame.

La **figure 25** montre les différents acteurs du recensement des vitraux parisiens à l'œuvre. Issus de différentes disciplines, ils sont des historiens d'art, des experts des vitraux capables d'analyser l'authenticité des œuvres suivant un

13. L'imagerie hyper-spectrale ou spectro-imagerie est une technologie permettant d'obtenir l'image d'une scène dans un grand nombre de bandes spectrales à la fois étroites et contiguës.

ensemble de caractéristiques (morphologie, coloration, vibration du verre) suivant les nervures du verre.

Par exemple, pour l'analyse d'authenticité sur les trois roses, il faut prendre chaque panneau, identifier les pièces d'origine, les pièces de restauration et dans ces dernières, identifier celles des différentes restaurations. Pour ce panneau (**figure 26**) – indiqué en jaune sur la **figure 27** – qui reste assez simple, sur la figure de droite les zones non colorées indiquent les verres d'origine, les pièces de restauration sont de couleur orange ; les bouche-trous, en violet, sont des pièces anciennes de réemploi. Le verre n'est jamais



Figure 25

Les différents acteurs du recensement des vitraux à l'œuvre sur les chantiers.



Figure 26

Exemple d'une critique d'authenticité et des conclusions tirées.

Figure 27

Baie nord du transept, le panneau signalé en jaune a été soumis à une critique d'authenticité.



perdu, il est soit réutilisé ou refondu. On trouve donc déjà à l'époque, cette notion de recyclage et de conservation.

Plus de quatre-vingt-onze panneaux ont été étudiés depuis plus d'un an sur les trois roses ; les trois roses ne sont pas déposées car il faut compter deux ans par baie pour une restauration

respectueuse et de qualité. De plus, alors que les peintures des vitraux du XIX^e siècle ont une bonne adhérence, sur ces roses, les peintures du XII^e et du XIII^e siècle sont très fragiles. Dans le cadre de la réalisation de ce travail, les échafaudages mis en place pour accéder aux voûtes ont été très utiles, permettant de mener la critique d'authenticité des vitraux pour mieux les caractériser, mieux les documenter et anticiper la restauration à venir dans les prochaines années.

Cette cartographie des pièces anciennes sera ensuite un outil de travail fort utile pour les architectes. Les critiques d'authenticité ont été faites pour la rose sud, la rose nord et la rose occidentale et tous les membres et partenaires de ce groupe de travail sont représentés sur la **figure 28**, autour de la photo, au centre de la rose nord.

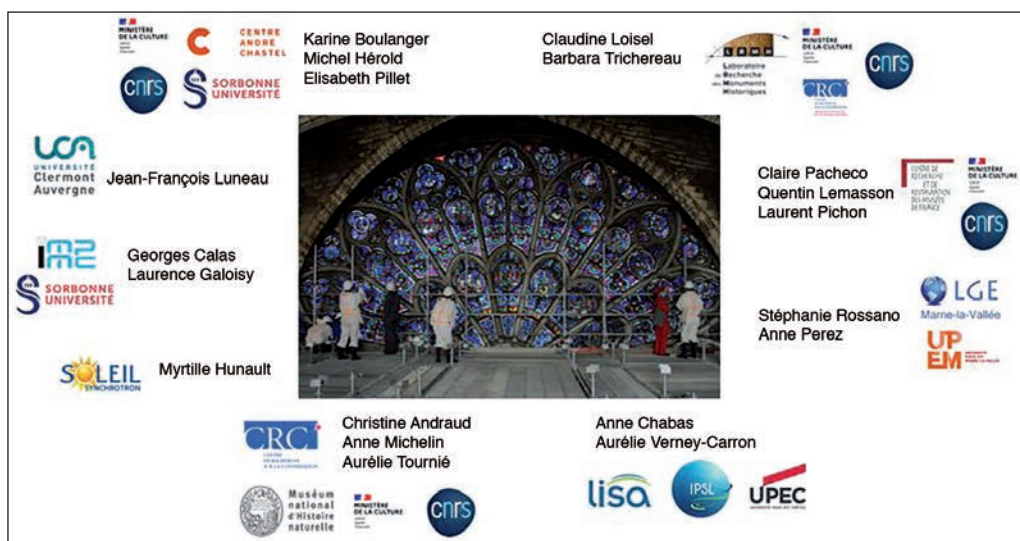


Figure 28

Tous les membres et partenaires du groupe de travail « Verre » sans qui rien ne serait possible.

Conclusion

Pour en savoir plus sur l'évolution de tous ces programmes liés à la restauration de Notre-Dame, n'hésitez pas à consulter le site internet du LRMH : vous y trouverez une revue de presse et de nombreuses informations régulièrement mises à jour.

Nous vous suggérons également le dossier « Notre-Dame » paru dans la revue semestrielle *Monumental* (2021) (figure 29).

Le *National Geographic* a quant à lui publié un article complet (figure 30).

Enfin, un très beau documentaire intitulé « La face cachée de Notre-Dame » est sorti à l'automne 2022 (figure 31).



Figure 29

Édition spéciale Notre-Dame de Paris, *Monumental*, 2021.

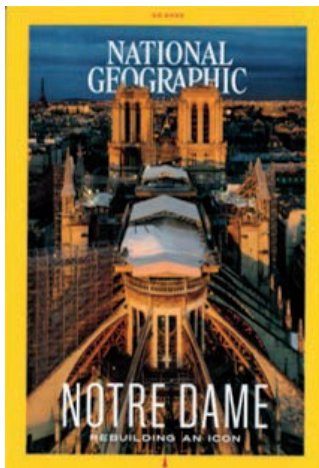


Figure 30

Le National Geographic, dossier détaillé sur Notre-Dame, 2022.



Figure 31

Le documentaire « La face cachée de Notre-Dame » met en lumière tout le travail réalisé par les scientifiques et les équipes de restauration.

