

Conservation-restauration de peintures polluées par dépôt d'aérosols de plomb

Witold Nowik est docteur en chimie analytique. Il a travaillé à l'Institut d'études et de conservation des biens culturels de l'université Nicolas Copernic à Torun (Pologne), puis au Laboratoire de Recherche des Monuments Historiques en France (LRMH) ainsi qu'au Centre de Recherches et de Restauration des Musées de France (C2RMF). Depuis 2017, il est responsable du pôle « Peinture murale et polychromie » au Laboratoire de Recherche des Monuments Historiques. Actuellement, en supplément d'activités d'enseignement, il est membre du groupe « Décor » du chantier scientifique de Notre-Dame (CNRS et ministère de la Culture).

Marie Parant-Andaloro a été formée à l'école des Beaux-Arts de Toulouse, spécialité « Restauration de tableaux ». Elle a travaillé dans les années 1980/1990 dans une entreprise de restauration œuvrant exclusivement pour les Monuments Historiques. En 1991, elle crée son atelier dont l'essentiel de l'activité concerne les Monuments Historiques. Dans un souci de perfectionnement, elle obtient une licence en histoire de l'art (1989) et un Master en conservation restauration des biens culturels (2008) à l'université de Paris-I Panthéon- Sorbonne. Elle s'est spécialisée dans la restauration de grands décors.

1 **Élaboration du protocole de nettoyage des peintures polluées par dépôt d'aérosols de plomb**

Ce chapitre traite de la sélection de méthodologies pour le nettoyage de peintures murales. Plus précisément, il s'agit du nettoyage de la pollution par le plomb exogène

consécutif à l'incendie de la cathédrale. Une application à l'échelle d'une chapelle test, rédigée par Marie Parant-Andaloro sera également présentée, allant jusqu'au nettoyage du plomb de la chapelle Saint-Ferdinand du déambulatoire, pris comme opération pilote du grand chantier de restauration des peintures.

1.1. Contexte

L'incendie a détruit la toiture de Notre-Dame à 99 %. Une grande partie du plomb de sa couverture s'est répandue sur la voûte sous forme de fragments tombés en coulures, tandis qu'une autre partie s'est retrouvée dans l'atmosphère, sous forme d'aérosols. L'évaluation de cette dernière partie est incertaine : certains auteurs s'avancent sur une masse envolée d'environ 180 kg alors que d'autres l'estiment plutôt aux alentours d'une tonne. Dans tous les cas, la pollution superficielle post-incendie à l'intérieur de la cathédrale était très hétérogène. Une quantité importante de plomb sous forme d'aérosols s'est déposée sur les peintures murales des chapelles du chœur. Il s'est alors agi d'éliminer la pollution résultante.

À l'intérieur de la cathédrale, le niveau de pollution post-incendie était variable : de

11 mg/m² à 36 mg/m² de plomb au niveau des tribunes et de 0180 mg/m² à 19 mg/m² au niveau du rez-de-chaussée. La limite réglementaire liée à la toxicité du plomb surfacique est 1 mg/m². Les quantités de pollution au plomb sur les surfaces à l'intérieur de la cathédrale étaient donc globalement bien plus élevées.

Pourquoi nous sommes-nous préoccupés de l'élimination du plomb exogène ? La présence d'une pollution élevée de plomb à l'intérieur de la cathédrale impose un protocole plomb à toutes les équipes intervenantes. Ce dernier est très contraignant et nécessite des moyens de protection individuelle et collective lourds – des masques avec une assistance respiratoire par exemple – ainsi que des procédures de sortie de chantier qui impliquent une décontamination en plus du temps de présence sur le chantier.

1.2. Mise en place des essais

Pour mettre au point le protocole d'élimination du plomb exogène, nous avons réalisé des essais dans le passage de la sacristie qui se trouve au niveau du déambulatoire de la cathédrale (*figures 1 et 2*), situé non loin des zones d'effondrement de la structure de la voûte. Ces zones ont constitué un point d'entrée de la pollution par aérosols à l'intérieur de la cathédrale. Les décorations peintes des chapelles qui entourent le déambulatoire ont été exécutées à l'huile sur une préparation du mur adéquate. Elles ont été réalisées entre 1848 et 1868



Figure 1

Photographie du passage de la sacristie.

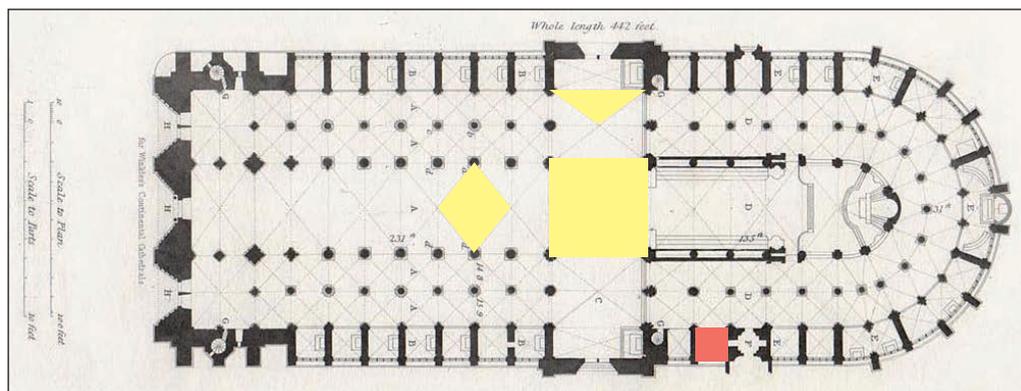


Figure 2

Plan de la cathédrale Notre-Dame de Paris avec en jaune les zones d'effondrement des voûtes et en rouge le passage de la sacristie.

par l'entreprise Courtin et Anzelme, pendant les travaux de restauration menés par Viollet-le-Duc.

La **figure 3** représente la chapelle Saint-Germain, restaurée en 2018 par l'équipe de Marie Parant-Andaloro. Comme nous pouvons le voir sur cet exemple, les chapelles étaient entièrement peintes – parois et voûtes. Les décors des autres chapelles sont aujourd'hui recouverts par les salissures qui se sont accumulées au long des années. Nous avons pu visualiser les peintures de la sacristie à l'état neuf grâce à un ouvrage édité en 1870 (à la fin des travaux de restauration du 19^{e} siècle) et qui montre les relevés de décors des chapelles (**figure 4**).

Les tests de protocoles de déplombage ont été menés sur deux registres différents du mur ouest du passage, en prenant en compte le fait que la répartition de plomb était non uniforme, comme cela a été mis en évidence par les

mesures de la pollution à différents niveaux de la cathédrale. Nous avons délimité un registre haut à peu près au niveau de la naissance de voûte, à 3,5 m du sol, et un autre plus bas à 1,5 m, qui correspondait à la hauteur d'une personne pouvant rentrer en

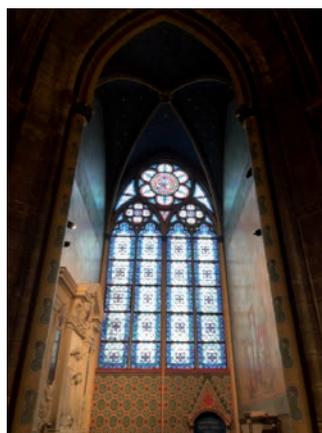


Figure 3

La chapelle Saint-Germain après restauration.

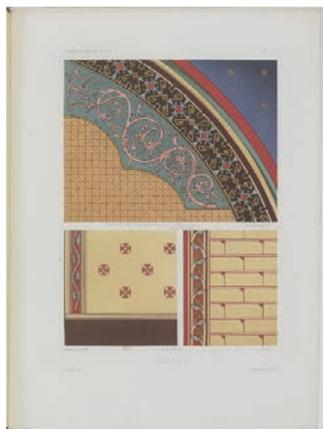


Figure 4

Planche LIX, M. Ouradou, E. Viollet-le-Duc, « Peintures murales des chapelles de Notre-Dame de Paris », éd. Morel, Paris 1870.



Figure 5

Décor du passage de la sacristie de Notre-Dame avant la réalisation des tests de dépollution.

contact direct avec les surfaces polluées. Sur ces deux registres, nous avons délimité des carrés de 40 cm x 40 cm (figure 5), pour pouvoir faire les tests sur des surfaces assez importantes et qui en même temps, permettait des évaluations de l'efficacité

d'élimination du plomb exogène selon diverses méthodes. Dans ces zones du registre haut et du registre bas, nous avons gardé un carré témoin ; les carrés restants ont été nettoyés préalablement par aspiration THE avec brossage (figure 6).



Figure 6

Brossage et aspiration d'un des carrés tests.

Par la suite, nous avons gardé un carré nettoyé par cette méthode et traité un autre par un essuyage avec un papier absorbant humidifié. Deux carrés restants ont été réservés à l'application de gels de nettoyage (*figure 7*). L'un d'eux a été utilisé pour l'application en un seul passage et l'autre a été réservé au nettoyage par plusieurs passages, dont le nombre restait à définir après un premier essai. Les essais ont eu lieu les 17 et 18 septembre 2019. Une remarque sur la composition du gel de nettoyage : les produits sont fabriqués sur le chantier à partir d'un solvant (l'eau dans notre cas), d'un produit gélifiant, qui pour nous est un copolymère d'acide acrylique et d'acrylate (*figure 8*). Ce produit en solution présente également des propriétés tensioactives et légèrement complexantes. Les solutions de ce type de copolymère sont

acides (pH d'environ 3) et ne présentent pas une viscosité élevée. Pour obtenir un gel, il est nécessaire de ramener le pH de la solution vers des valeurs plus importantes. Le diagramme (*figure 9*) montre la formation des gels pour différents produits gélifiants à base d'acrylates. Le domaine de leur gélification, caractérisée par augmentation de viscosité, se situe globalement entre pH 4 et pH 11. Pour y arriver, nous avons utilisé la solution du citrate d'ammonium tribasique (*figure 10*) qui a permis de tamponner la solution de ce copolymère autour de pH 7 et d'obtenir un gel. En même temps, il a donné la possibilité de la séquestration des différents cations métalliques, notamment du plomb, avec l'ion citrate.

Les essais ont été accompagnés de contrôles de l'efficacité d'élimination du plomb exogène, qui était réalisés avec quelques méthodes optiques



Figure 7

Application de gel de nettoyage sur un des carrés tests.

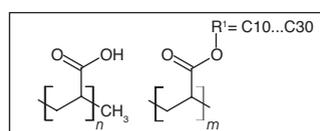


Figure 8

Copolymère d'acide acrylique et d'acrylate.

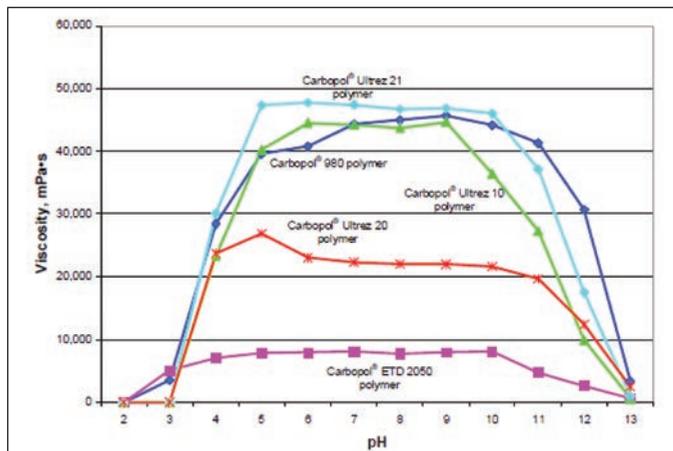


Figure 9

Viscosité des différents gels formés par quelques acrylates en fonction du pH.

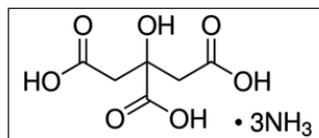


Figure 10

Molécule du citrate d'ammonium tribasique.

et physico-chimiques sélectionnées. Nous nous sommes tout d'abord appuyés sur l'observation comparative des surfaces non nettoyées puis nettoyées par microscopie de terrain (*figure 11*).

La méthode des tests au scotch (*figure 12*), généralement employés pour les contrôles de cohésion des différents matériaux, a été utilisée ici

simplement pour prélever superficiellement la salissure et la pollution au plomb. Nous avons aussi eu recours à l'évaluation de la quantité de pollution au plomb par la méthode de spectroscopie de fluorescence X (*figure 13*) et le test lingette. Ce dernier est un essai normé, qui permet d'évaluer la quantité de plomb surfacique acido-soluble.

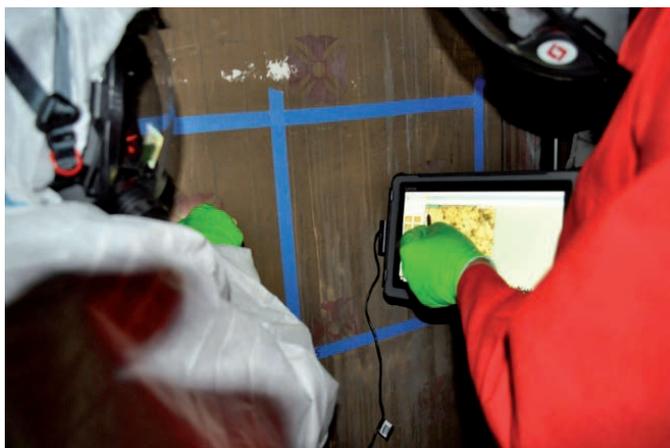


Figure 11

Microscopie digitale de terrain.

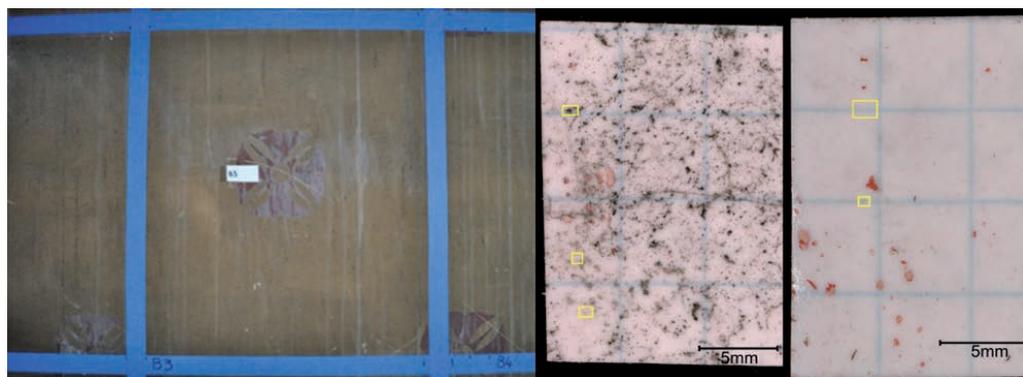


Figure 12

Tests au scotch. À gauche, un prélèvement avec la bandelette de scotch ; à droite, observation au microscope de la surface de scotch, appliquée sur les carrés avant application du gel et après application du gel.



Figure 13

Analyse par la spectroscopie de fluorescence X.

Les scotchs avec les prélèvements superficiels de salissure ont été amenés au laboratoire et observés en microscopie optique et au MEB (microscopie optique à balayage). Après la série d'essais, nous avons pu comparer les résultats obtenus (figure 14). À gauche, nous avons le carré témoin et le carré dépoussiéré se trouve en quatrième position. Le papier absorbant humidifié (appelé ici lingette humide) a

été testé sur le carré en position 2, puis le gel a été appliqué sur les carrés 3 et 5. Ces essais montrent qu'après le dépoussiérage, on élimine surtout une partie qui semble être un peu duveteuse, bien visible sur le prélèvement du carré témoin, mais on ne change pas l'état de nettoyage de la peinture – elle reste toujours très sombre. Avec un papier absorbant humidifié, on arrive déjà à nettoyer un peu plus la surface



Figure 14

Résultats macroscopiques obtenus après les différents tests. Dans l'ordre : le témoin, le résultat après passage à la lingette humide, le résultat après l'application d'une couche de gel, le résultat après dépoussiérage et le résultat après deux passages de gel.

et peut-être aussi à éliminer le plomb. Mais un résultat beaucoup plus évident est obtenu avec le gel. Même une seule application améliore grandement l'état de lisibilité de la peinture. Finalement, nous avons considéré l'application du gel en deux fois comme suffisante pour nettoyer ces surfaces, car elle améliore

encore l'état de nettoyage de la peinture, mais relativement peu par rapport à une seule application. L'observation des surfaces des carrés tests au microscope (figure 15) permet des comparaisons plus détaillées (par exemple : elles montrent la présence de fibres textiles dans la couche de salissures).

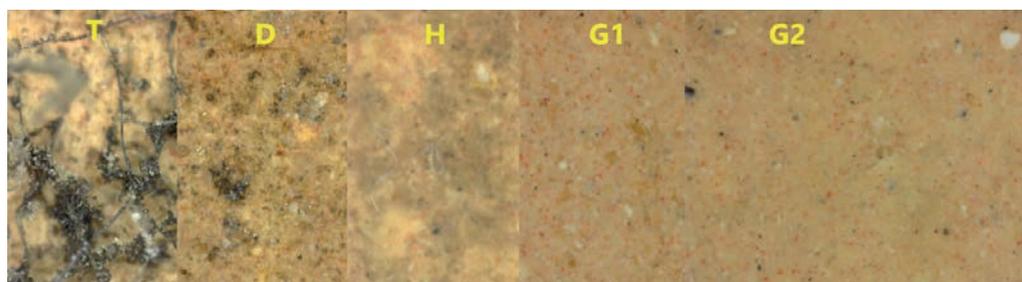


Figure 15

Résultats observés au microscope de terrain. T : témoin ; D : après dépoussiérage ; H : après nettoyage à la lingette humide ; G1 : après un passage de gel et G2 : après deux passages de gel.

1.3. Résultats obtenus après les essais

En réalité, la salissure présente à la surface de la peinture est très complexe et contient du plomb avec d'autres dépôts. Après le nettoyage par l'aspiration, la surface devient plus lisse. Il est possible d'observer encore quelques restes de petits amas de salissure non nettoyés, mais la situation est améliorée d'une manière importante. L'utilisation du papier absorbant humidifié donne l'impression d'étaler un peu les restes de salissures qui n'ont pas été aspirés. En revanche, les deux cas d'applications de gel, en un et deux passages, rendent la surface de peinture très nette. Les observations sur les tests faits avec du scotch (*figure 12*) après le nettoyage montrent dans la partie basse de la figure à gauche, la présence de particules colorées. Toutefois, il ne s'agit pas de salissures. Elles ont été identifiées comme des micro-fragments de la peinture originale qui ont été malheureusement décollés par le scotch.

L'efficacité d'élimination du plomb a été évaluée par la spectroscopie de fluorescence X, mais le fait que la peinture contient des pigments au plomb ne permet pas de noter de différences claires entre les résultats avant et après nettoyage. Les variabilités observées pour les différentes mesures correspondent probablement à la marge d'erreur de la méthode. En revanche, l'évaluation de la teneur en plomb superficiel par le test lingette, correspondant à une norme française, permet de prélever le plomb de la

surface puis, après solubilisation dans un acide, de l'analyser par spectroscopie d'émission atomique. Par cette méthode, nous avons pu démontrer que nous sommes arrivés à diminuer la quantité de plomb présent sur la peinture (*figures 16 et 17*). Pour le carré témoin, les valeurs de plomb acido-soluble d'ordre de 12 à 16 mg/m² sont très éloignées du 1 mg/m² fatidique. Le dépoussiérage diminue cette pollution d'un tiers. La lingette, ou plutôt le papier absorbant humidifié appliqué après le dépoussiérage, la diminue encore mais nous restons loin de cette limite. Ce qui permet d'éliminer la pollution de manière vraiment efficace, c'est l'application de gel en une ou deux fois, faisant tomber la quantité de plomb exogène à des valeurs inférieures à la limite. Une petite anomalie de valeurs observée sur le registre bas, avec augmentation de



Figure 16

Réalisation du test lingette.

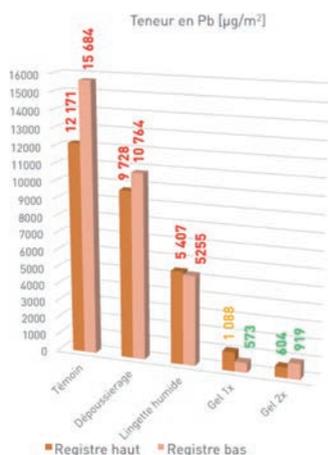


Figure 17

Évaluation de teneur en Pb superficiel acido-soluble (« test lingette »).

teneur en plomb après deux applications par rapport à une seule, suggère que la répétition d'application du gel remobilise peut-être le plomb de la couche de peinture. On atteindrait alors la limite d'élimination de la pollution.

Le protocole retenu a été l'utilisation de gels de nettoyage. Sa mise en œuvre sur un chantier test a été faite à la chapelle Saint-Ferdinand.

2 Mise en place du protocole

Pour la mise en œuvre du protocole de nettoyage de la pollution au plomb, nous avons travaillé dans la chapelle Saint-Ferdinand, située à l'opposé de la chapelle où les tests ont été faits et qui est toute proche des zones d'effondrement (figure 18).

La chapelle a été confinée pendant tout notre travail afin d'être complètement isolée du chantier de sécurisation de la cathédrale et du démontage de l'échafaudage. La figure 19

montre la chapelle Saint-Ferdinand sans échafaudage avant restauration ; la figure 20 une partie de l'équipe portant l'équipement de protection individuelle obligatoire.

La tenue classique de Notre-Dame est constituée de chaussures de sécurité et de casques. Nous avons par ailleurs des combinaisons à usage unique, des gants jetables et à la ceinture, un moteur qui amène de l'air filtré dans les cagoules avec visière. À l'arrivée dans la chapelle, la première préoccupation a été le dépoussiérage. La figure 21 montre la voûte et la figure 22 l'étage inférieur de la voûte.

Dans un premier temps, la poussière est éliminée à l'aide d'un pinceau doux (un spalter), puis aspirée avec un aspirateur très haute efficacité (THE), équipé d'un filtre adapté à la poussière de plomb. Nous reprenons le protocole exposé plus haut pour éliminer les particules de plomb, également efficace pour nettoyer la couche picturale. L'objectif

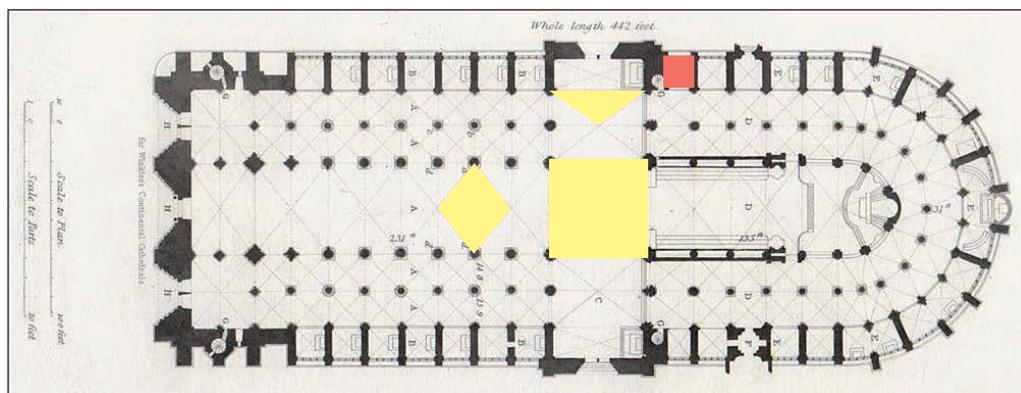


Figure 18

Plan de la cathédrale Notre-Dame de Paris avec en jaune les zones d'effondrement et en rouge la chapelle Saint-Ferdinand.



Figure 19

Photo de la chapelle Saint-Ferdinand sans échafaudage avant restauration.



Figure 20

Photo d'une partie de l'équipe.

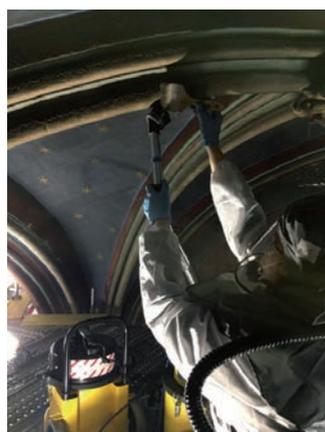


Figure 21

Photo de la voûte de la chapelle Saint-Ferdinand.



Figure 22

Photo de l'étage inférieur de la chapelle Saint-Ferdinand.

est un nettoyage homogène de l'ensemble du décor, de la voûte au rez-de-chaussée. La grande problématique de la peinture murale est l'homogénéité du nettoyage sur des surfaces très importantes. Après

avoir employé différents pourcentages de gel (**figure 23**), nous retenons le gel à 2 % de citrate d'ammonium.

Cette concentration a été utilisée tout le long du nettoyage. Le nombre de passages varie

en fonction des niveaux : pour la partie basse, la plus encrassée parce qu'à portée de mains, au moins quatre passages ont été nécessaires alors que deux ont suffi pour les autres niveaux. Les **figures 24** et **25** montrent les équipes préparant le mélange constituant le gel, ce dernier étant préparé par quantités d'environ 5 litres.

Les opérations de base sont les suivantes : passage du gel avec un pinceau, brosse de la surface avec une brosse dure, protection de la couche picturale inférieure au moyen d'une éponge. Ces opérations sont répétées trois ou quatre fois que l'on soit sur les chapiteaux ou sur les murs. La **figure 26** montre le



Figure 23

Résultats des tests réalisés.



Figure 24

Membres de l'équipe préparant le mélange.



Figure 25

Membre de l'équipe nettoyant un mur de la chapelle.



Figure 26

Même processus de nettoyage sur le chapiteau et les murs.

résultat obtenu. Le petit carré clair montre que l'on est passé d'un gris très foncé à un blanc cassé assez joli.

La **figure 27** montre les différents outils utilisés : le papier absorbant, les pinceaux et pour le rinçage, les pulvérisateurs et l'éponge.

La **figure 28** montre la voûte en cours de nettoyage. La

différence chromatique est frappante : le décor de Viollet-le-Duc est d'une qualité extraordinaire, avec des liants et des pigments de qualité exceptionnelle. La **figure 29** montre l'étoile réalisée à la feuille d'or.

Après le nettoyage au niveau de la voûte, nous passons au nettoyage au niveau du



Figure 27

Différents outils utilisés lors de la phase de nettoyage.



Figure 28

Voûte de la chapelle en cours de nettoyage.



Figure 29

Étoile du décor de Viollet-le-Duc réalisée à la feuille d'or.

deuxième registre (*figure 30*). La gamme colorée est beaucoup plus lumineuse et nous nous sommes contentés d'un simple nettoyage. Sauf altération par des dégâts des eaux ou des infiltrations d'eau, nous découvrons une peinture en très bon état de conservation qui ne réclame aucune intervention. Les motifs sont réalisés à la feuille d'or avec un filet noir qui souligne les aigles. Il s'agit là d'un travail d'une très grande qualité !

Les *figures 31* et *32* sont des photos prises au niveau de la voûte – avant et après notre intervention. Pour passer d'un état à l'autre, nous avons d'abord dépoussiéré. A également eu lieu la dépose des vitraux restaurés en atelier et le re-fixage de la couche picturale, la consolidation de la couche picturale et des enduits. Une fois la couche picturale sécurisée, nous

avons pu dépoussiérer la surface avec un aspirateur THE. Puis, nous avons nettoyé et repris les enduits pour faire la réintégration colorée. Dans ce cas précis, les vitraux ont été reposés d'abord et ce n'est qu'après que nous avons recoloré les joints pour arriver à un ensemble chromatique cohérent et homogène.

La restauration de cette chapelle a duré six mois. Elle a été effectuée par un groupement de neuf restaurateurs avec en moyenne quatre intervenants par jour ; ceci correspond à l'équivalent de quatre-vingts jours de travail pour une personne. La *figure 33* montre la chapelle Saint-Ferdinand après restauration et retrait des échafaudages.

Cette restauration s'est déroulée en co-activité avec les restaurateurs de vitraux – l'entreprise Vitrail France de l'entreprise de parement Pierre Noël et des restaurateurs de



Figure 30

Nettoyage du deuxième niveau de registre de la chapelle.



Figure 31

Photo de la voûte de la chapelle avant restauration.



Figure 32

Photo de la voûte après restauration.

sculptures, l'entreprise SOCRA². L'exemplarité de ce chantier réside dans le fait que tout a été restauré en même temps ce qui est assez rare puisque dans le domaine de la peinture murale, on s'occupe généralement de la peinture mais pas spéciale-

2. La SOCRA est une entreprise française spécialisée dans la conservation, la restauration, la reproduction et la production d'œuvres d'art et de monuments.

ment de la pierre. Nous avons un ensemble qui possède une gamme colorée exceptionnelle puisque le rouge et le bleu des vitraux font écho aux couleurs des registres supérieurs tandis que la couleur de la pierre nettoyée que l'on voit **figure 33** (image au centre ; les voûtes), se retrouve sur les colonnes et les arcs de la voûte. On assiste donc à un véritable jeu d'intérieur et d'extérieur.



Figure 33

Photos de la chapelle Saint-Ferdinand après restauration et retrait des échafaudages.

Conclusion

Les métiers d'art... ! Le concept paraît parfois démodé, semblant appartenir au passé ! Tous ces objets magnifiques, fruits de savoir-faire traditionnels ne sont-ils pas aujourd'hui fabriqués par des automates, des robots copieurs qui prospèrent loin de nos latitudes ?

Le travail présenté dans ce chapitre sur la restauration des peintures vieilles de nombreux siècles montre qu'il ne faut pas se laisser aller au pessimisme, à l'abandon. Oui, les grandes causes comme celle de la restauration de Notre-Dame réintroduisent nos métiers dans une actualité où les artisans soigneux, appliqués, revivifient les anciennes pratiques pour offrir de magnifiques restaurations, véritables re-crétions réalisées sous nos yeux. L'incendie a réveillé l'admiration pour les œuvres anciennes mais aussi la conscience de ces précieux savoir-faire et la fascination que leurs performances provoquent.

Il faut leur dire merci et leur exprimer l'importance du rôle qu'ils jouent au sein de notre société.

Remerciements

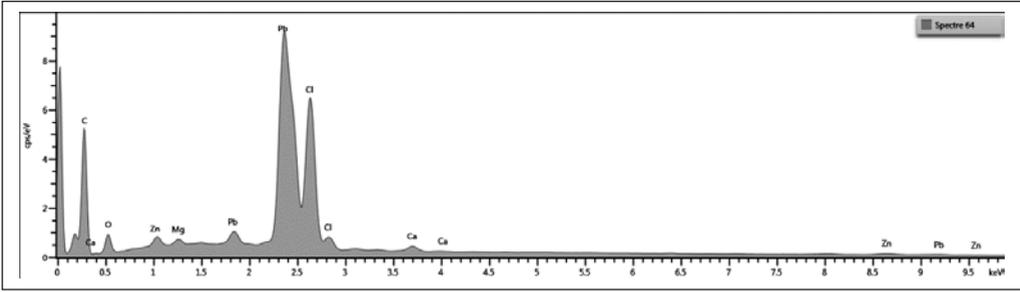
Les remerciements de Marie Parant-Andaloro vont naturellement à tous les membres du groupement³ qui ont participé à la restauration : Jessica Barré, Delphine Burgart, Anaïs Grousseau, Marie-Cécile Kfour, Felicja Lamprecht, Charlotte Phelouzat, Isabelle Stetten et Agnès Roze.

Witold Nowik remercie les collègues du pôle « Peinture murale et polychromie » du LRMH⁴ : Stéphanie Duchêne et Didier Brissaud qui ont participé à l'étude du protocole de déplombage.

3. Groupement GMPA : Groupement Marie Parant-Andarolo.

4. LRMH : Laboratoire de Recherche des Monuments Historiques.

Annexe



Annexe I

Mise en évidence de la pollution superficielle au plomb post-incendie dans la cathédrale avec la sonde EDX.

