

LA CHIMIE PEUT-ELLE CONTRIBUER À LA CONSERVATION DU PATRIMOINE ?

Éric Bausson

Le lundi 15 Avril 2019, alors qu'elle était en plein travaux de restauration, la cathédrale Notre-Dame de Paris, vieille de plus de 850 ans, a pris feu au niveau de sa charpente, engendrant la perte de celle-ci, de sa toiture, de son horloge et d'une partie de sa voûte. Pendant l'incendie, une course contre la montre a permis de sauver le maximum d'œuvres d'art présentes.



15 avril 2019, Notre-Dame en feu! © Juanito

Dès le lendemain, bon nombre d'architectes, d'entreprises spécialisées dans la restauration du patrimoine et d'experts scientifiques se sont portés à son chevet pour prendre les décisions qui s'imposaient au plus vite pour limiter les risques d'écroulement des murs et des voûtes restantes.

De cet élan volontaire est née une alchimie entre toutes ces personnes avec la ferme volonté de réaliser, en un temps record, le « chantier du siècle », celui de reconstruire quasi à l'identique les éléments perdus de Notre-Dame.

En parallèle à ce chantier de restauration, s'est ouvert un chantier scientifique regroupant cinquante laboratoires répartis dans toute la France, impliquant 175 personnes. Ces activités de recherche vont renouveler les connaissances sur cet édifice, son histoire et son environnement, avec la création de huit groupes de travail sur les thèmes suivants : numérique, structure, bois/charpente, métal, pierre, verre, émotions patrimoniales et acoustique. Les chimistes y prennent part comme vous pourrez le voir dans ce dossier...

Comment la chimie peut-elle contribuer à la conservation du patrimoine ?

PLAN ET RESSOURCES POUR TRAITER CETTE QUESTION DU GRAND ORAL

La chimie intervenant dans beaucoup de domaines de la conservation du patrimoine, **nous allons prendre un fil conducteur, celui du plomb**, pour montrer quelques facettes de la chimie, liée intimement à la physique, dans la conservation du patrimoine. Il vous est bien entendu possible de vous appuyer sur un autre fil conducteur (le bois, le verre, etc.) pour votre présentation du Grand oral.

En suivant le questionnement ci-après et en vous appuyant sur les ressources proposées parmi toutes celles de Mediachimie, la médiathèque de la Fondation de la Maison de la Chimie, il est possible de répondre à cette problématique.

- Du plomb, mais lequel ?
- Comment éliminer le plomb déposé sur les peintures décoratives ?
- Comment nettoyer et déplomber les pierres murales ?



Notre-Dame de Paris avant l'incendie © VivreParis

• Du plomb, mais lequel ?

Lors de l'incendie de la charpente, le plomb présent dans la toiture et dans la flèche est parti en poussières dans les fumées de l'incendie ou a coulé, après fusion, le long de l'édifice. De là est née une vive polémique sur les risques liés au plomb pour la santé des riverains de Notre-Dame.

Une analyse approfondie du plomb, menée sous l'égide de l'A.R.S. d'Île de France, a permis de suivre à la trace ce plomb, ou plutôt « ces plombs ».

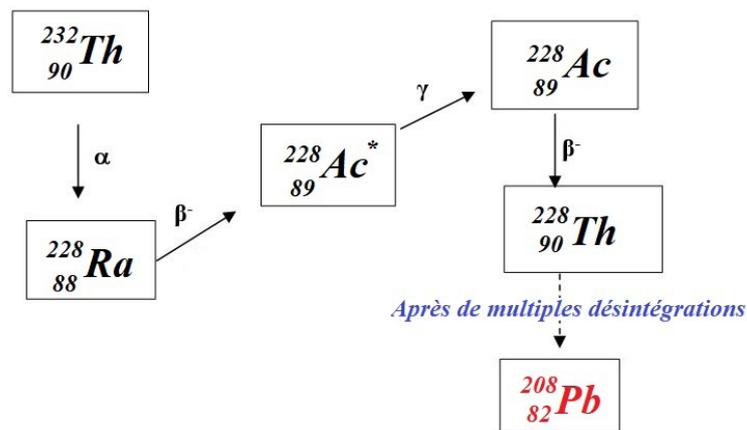
La ville de Paris, comme toute ancienne métropole, a beaucoup de plomb en son sein, surtout depuis la période haussmannienne avec les peintures intérieures, l'étanchéité des toitures et des balcons. Le système d'évacuation des eaux usées est constitué de fonte et de plomb. Les sculptures et fontaines sont elles aussi plombées. Sans oublier les carburants utilisés jusqu'en l'an 2000, qui en raison des additifs plombés, rejetèrent beaucoup de plomb dans l'air.

Le plomb, de symbole chimique Pb, est l'élément chimique de numéro atomique 82. Il a quatre isotopes, tous non radioactifs et stables, qui diffèrent donc par leurs nombres de neutrons.

Le premier d'entre eux, le 204, était initialement le seul isotope présent sur Terre. Aujourd'hui, il ne correspond plus qu'à 1,4 % de la totalité du plomb présent.

Les trois autres isotopes, sont issus de trois éléments radioactifs, le thorium 232, l'uranium 238 et l'uranium 235, qui après des désintégrations radioactives successives ont formé respectivement les isotopes stables (non radioactifs) 208, 206 et 207 du plomb.

Voici la chaîne radioactive du thorium 232 aboutissant au plomb 208 :



La durée d'obtention des isotopes 206, 207 et 208 est donc différente et dépend de la **demi-vie** des noyaux radioactifs, ou radionucléides, de la chaîne radioactive ($^{232}_{90}\text{Th}$, $^{228}_{88}\text{Th}$... pour la chaîne radioactive du thorium 232).

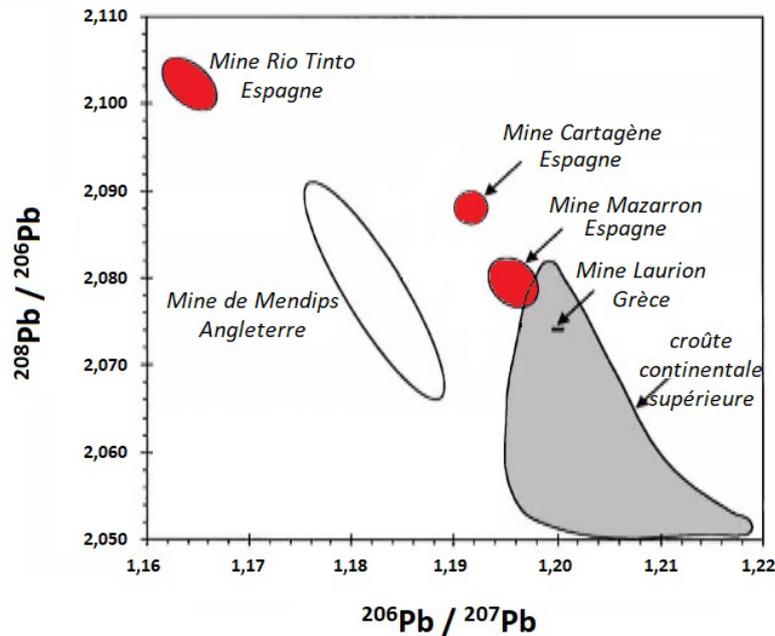
Notion de demi-vie

La demi-vie, notée T, est le temps au bout duquel la quantité d'un même radionucléide est divisée par deux. Elle varie d'un radionucléide à un autre.

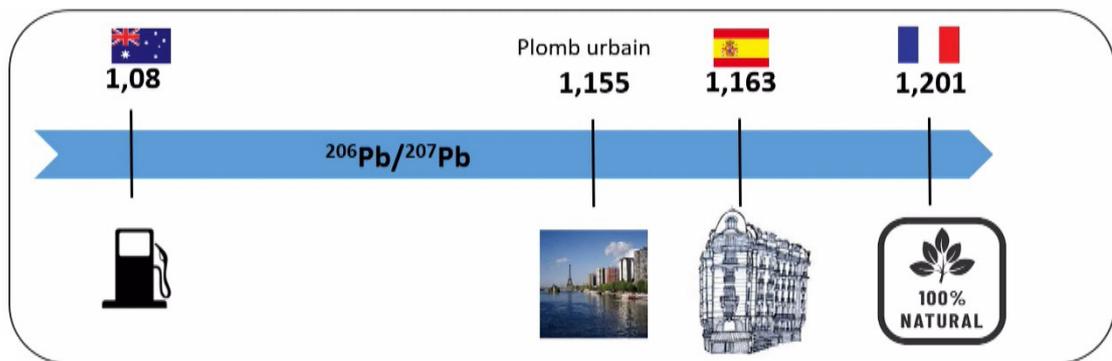
$$T(^{235}\text{U}) = 0,7 \text{ Ga} ; T(^{238}\text{U}) = 4,5 \text{ Ga} ; T(^{232}\text{Th}) = 14 \text{ Ga}$$

avec 1 Ga correspondant à un milliard d'années.

Cela a pour effet que le filon plombifère d'une mine a des taux légèrement différents pour les quatre isotopes du plomb suivant l'âge de formation de ce filon. Donc chaque mine de plomb a sa propre signature isotopique en plomb comme illustré ci-dessous :



Avant l'incendie de Notre-Dame, le rapport isotopique $^{206}\text{Pb} / ^{207}\text{Pb}$ du plomb parisien était connu suivant l'origine de ce dernier :



Source : After L. Lestel (CNRS Paris), Ayrault et al. (2012,2014)

- 1,08 pour le plomb présent dans les anciens carburants, provenant d'une mine australienne ;
- 1,155 pour le plomb présent dans les poussières parisiennes ;
- 1,163 pour le plomb utilisé pour les constructions haussmanniennes provenant de mines espagnoles ;
- 1,201 pour le plomb présent naturellement dans le bassin de la Seine.

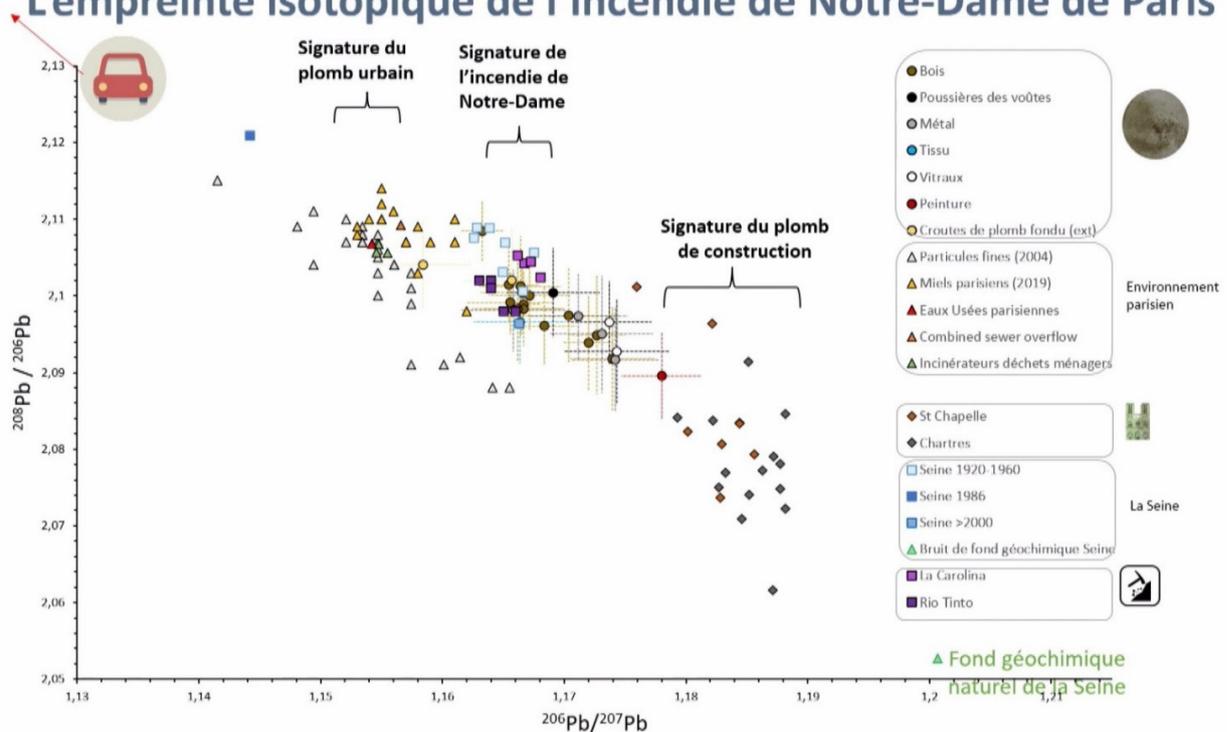
Après l'incendie de Notre-Dame de Paris, 19 prélèvements ont été effectués concernant des poussières ou fibres diverses :

- un échantillon sur le banc de l'organiste, ne contenant que des poussières post-incendie ;
- d'autres échantillons contenant des poussières antérieures et postérieures à l'incendie.

En utilisant des solutions acides très concentrées (acide chlorhydrique, acide nitrique, acide fluorhydrique et acide perchlorique), à chaud et sous pression, les diverses traces métalliques passent sous forme ionique (Pb^{2+} , Ag^+ , etc.) dans une solution limpide. Des mesures physiques effectuées avec un spectromètre de masse, séparant en phase gazeuse les ions présents dans cette solution, en fonction de leurs rapports respectifs masse / charge électrique, permettent de remonter pour une trentaine d'éléments chimiques à la signature isotopique de chaque prélèvement.

À partir de tous ces résultats, il est possible de les croiser avec ceux connus de Paris (miel issu des ruches intra-muros, eaux usées, etc.) et nous remarquons sur l'illustration ci-dessous que le plomb de Notre-Dame a sa propre signature, comprise entre celles du plomb urbain (1,155 en moyenne) et du plomb de construction (1,183 en moyenne) utilisé lors de la construction de Notre-Dame au XII^e siècle.

L'empreinte isotopique de l'incendie de Notre-Dame de Paris



Rapports isotopiques $^{208}Pb / ^{206}Pb$ et $^{206}Pb / ^{207}Pb$ pour des prélèvements effectués à divers endroits :

- dix-neufs prélèvements dans Notre-Dame ;
- ailleurs dans Paris (ruches, eaux usées, etc.) ;
- dans La Sainte Chapelle et dans la cathédrale de Chartres, deux bâtiments contemporains (XII-XIII^{es} siècles) de Notre-Dame ;
- dans deux mines plombifères espagnoles (La Carolina et Rio Tinto).

Donc parmi tout le plomb présent dans Paris, il nous est maintenant possible de déterminer s'il peut provenir ou non de l'incendie de Notre-Dame.

Il est bien issu des mines espagnoles de rapport isotopique moyen pour $^{206}Pb / ^{207}Pb$ valant 1,163 et 2,10 pour $^{208}Pb / ^{206}Pb$. Ce plomb a été utilisé pendant la période haussmannienne pour restaurer Notre-Dame sous la direction de l'architecte Eugène Viollet-le-Duc au XIX^e siècle.

Sources : [Tracer les plombs de Notre Dame de Paris par leurs signatures isotopique et élémentaire](#) – Sophie Ayrault – Colloque Chimie et Notre-Dame – 09/02/2022 - Fondation Maison de la Chimie
[Incendie de Notre Dame : toutes les données](#) – A.R.S. de l'Île-de-France

• Comment éliminer le plomb déposé sur les peintures décoratives ?

La masse de plomb partie en fumées serait comprise entre 180 kg et 1 t selon les spécialistes. Une partie de ces aérosols a pollué Notre-Dame, faisant largement dépasser le seuil de plomb surfacique fixé à 1000 $\mu\text{g} / \text{m}^2$.

La mise en place du « protocole plomb » était rendu obligatoire, avec des équipements de protection individuelle adaptés à la situation.

En parallèle à la mise en sécurité de Notre-Dame, un chantier de dépollution au plomb a été mis en route dans une des zones polluées pour effectuer des tests, plus particulièrement sur des peintures décoratives à l'huile et à la cire.

Un protocole expérimental rigoureux a été mis en place sur plusieurs zones de 40 cm de côté, sur deux parties distinctes (haute, dénommée « registre haut », et basse, dénommée « registre bas ») :

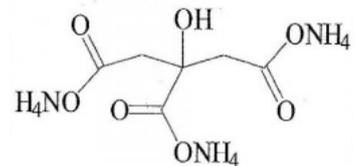
- la zone 1, le « témoin », n'a subi aucun traitement ;
- la surface des zones 2 à 5 ont été aspirées et brossées ;
- uniquement sur la zone 2 a été appliquée une lingette humide ;
- sur les zones 3 et 5, un gel nettoyant a été appliqué une fois sur la troisième et deux fois sur la cinquième, avec des rinçages effectués à l'eau.



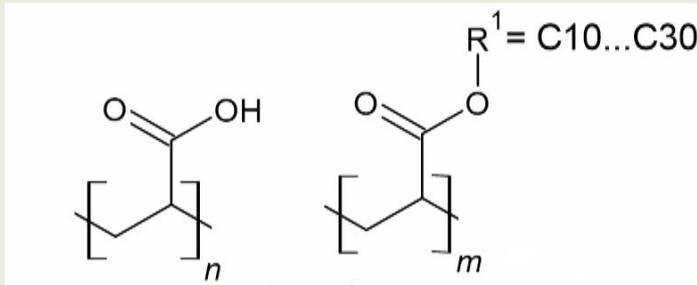
Tests de nettoyage des peintures.

Le gel nettoyant a été préparé directement sur place en utilisant :

- de l'eau comme solvant ;
- un gélifiant dont la viscosité est optimale pour un pH compris entre 4 et 11 ;
- pour atteindre un pH satisfaisant, le milieu est tamponné (pH constant proche de 7) avec du citrate de triammonium, de formule ci-contre, qui a pour propriété importante de pouvoir complexer des cations, dont les ions plomb Pb^{2+} .

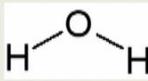


L'illustration ci-après indique les formules chimiques des composants de ce gel de nettoyage :



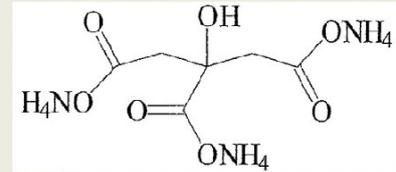
Copolymère acide acrylique-acrylate

Gélifiant, *tensioactif*,
légèrement complexant



Eau

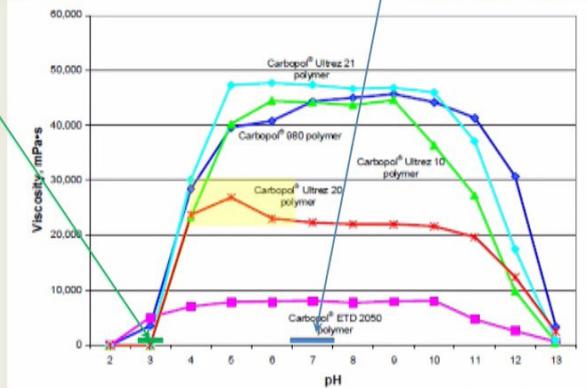
Solvant



Citrate de triammonium

Complexant :

Fe^{3+} , Al^{3+} , Pb^{2+} , Cu^{2+}



Ici, la réaction de complexation met en jeu un cation central (Pb^{2+} , Fe^{3+} , etc.) lié à plusieurs groupements $-COO^-$ du citrate de triammonium, dénommés « ligands ». Après rinçages à l'eau, cela permet donc d'enlever ces cations de la surface de ces tableaux et donc de dépolluer et de rendre un aspect propre à ces peintures.

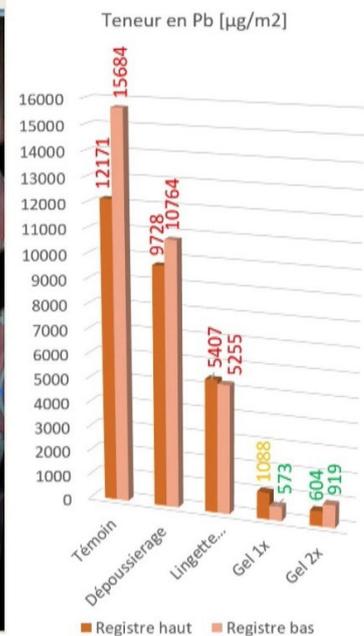
Voici les résultats obtenus sur les parties testées sur le registre haut, observables à l'œil nu à gauche et les mesures d'efficacité après la mesure de la teneur en plomb surfacique sur chaque zone :

RÉSULTATS MACROSCOPIQUES

EFFICACITÉ



Résultats visibles sur le registre haut



La clarté de la peinture paraît suffisante avec la double application du gel de nettoyage, suivie de rinçages à l'eau. De plus, les mesures de la teneur en plomb surfacique montrent que la double application du gel permet d'avoir une teneur inférieure à 1000 µg / m², seuil fixé par les normes sanitaires.

La dépollution au plomb avec ce gel de nettoyage est donc validée et pour sa mise en œuvre à plus grande échelle une solution à 2 % de citrate de triammonium est utilisée. Le nombre de passages est de deux sauf pour le registre bas, à portée de mains, où quatre passages sont effectués pour rendre les surfaces propres.

Sources : [Conservation-restauration de peintures polluées par dépôt d'aérosols de plomb \(I\)](#)

Witold Nowik (chimiste, ingénieur de recherche, responsable du pôle peinture murale et polychromie au Laboratoire de Recherche des Monuments Historiques)

[Conservation-restauration de peintures polluées par dépôt d'aérosols de plomb \(II\)](#)

Marie Parant (restauratrice de peintures murales)

● Comment nettoyer et déplomber les pierres murales ?

Nous venons de voir comment on peut nettoyer et déplomber la surface d'une peinture décorative en utilisant un gel contenant un agent complexant les cations, et ici plus précisément les ions Pb²⁺.

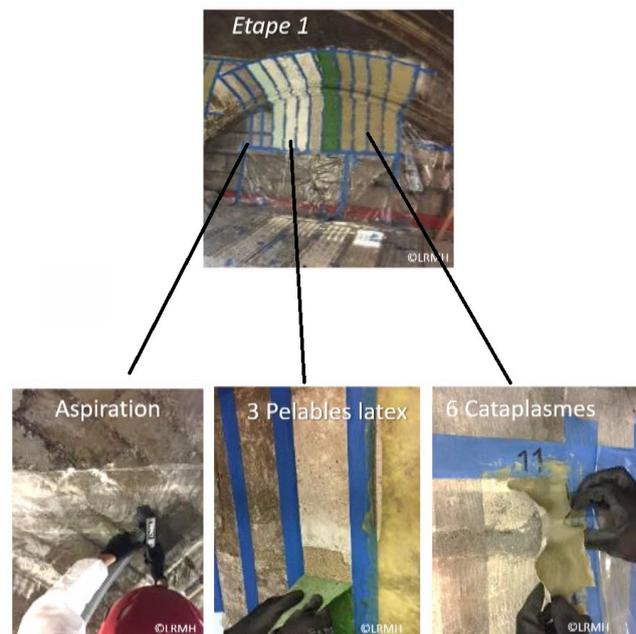
Le même problème se pose pour les pierres murales. Des tests sur de petites surfaces s'imposent donc pour rechercher la meilleure solution.

Sur les pierres murales, on peut appliquer soit des latex pelables soit des cataplasmes argileux (ou compresses de nettoyage).

Le latex pelable est un matériau élastique détachable d'une surface, sans rupture après séchage. Les cataplasmes argileux se présentent sous forme de pâte ou de gel hydraté, constitués le plus souvent d'argiles, de fibres de cellulose et des sables par exemple. Suivant le fournisseur, le latex et le cataplasme argileux diffèrent quelque peu.

Voici les résultats d'une première série de tests avec onze zones testées dont la première est le témoin, la deuxième est uniquement aspirée. Sur les trois zones suivantes sont appliqués trois latex pelables différents et sur les six dernières, six cataplasmes argileux différents. Après application et séchage, le fait de retirer les latex pelables ou les cataplasmes argileux de la surface de la pierre rend celle-ci plus nette et abaisse la pollution liée au plomb.

Après essais, seul un latex pelable et un cataplasme argileux sont retenus pour les essais suivants.



Étape 1 : Premières séries de tests.

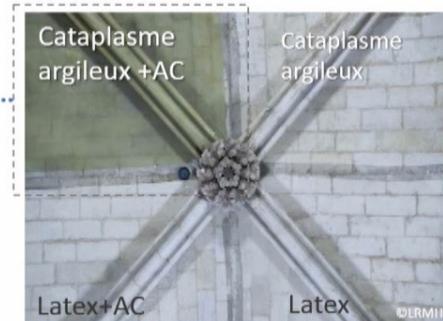
Ensuite, il s'agit de vérifier si l'utilisation d'un agent complexant pourrait encore plus diminuer la pollution liée au plomb.

Une seconde série de tests a donc eu lieu avec ces pelable en latex et cataplasme argileux retenus, avec ou sans agent complexant.

Mais les résultats se sont avérés négatifs, voire déroutants comme avec le cataplasme argileux contenant un agent complexant de cations, car il était très difficile de le sécher avant de pouvoir le retirer (8 minutes et 22 secondes / m² avec agent complexant au lieu de 22 secondes / m² sans!).

Donc l'utilisation d'un agent complexant, plébiscitée pour nettoyer et déplomber la surface des peintures décoratives, est à proscrire pour les pierres murales (apparition de sels à base de sodium Na⁺ en surface).

Pour la mise en œuvre du nettoyage et de la dépollution des pierres murales, il est donc préconisé aux entreprises d'utiliser, sans agent complexant, soit le latex pelable soit le cataplasme argileux, tous deux retenus à la fin de la première série de tests.



Étape 2 : Seconde série de tests.

Source : [Conservation des maçonneries endommagées par les sels solubles suite à l'incendie de Notre Dame](#) – Véronique Vergès-Belmin (géologue, responsable du pôle scientifique Pierre au [Laboratoire de Recherche des Monuments Historiques](#))

Conclusion

Le vaste chantier de Notre-Dame illustre bien la synergie nécessaire entre les divers corps de métier et les laboratoires de recherche. La chimie apporte sa contribution à la préservation du patrimoine grâce aux analyses et traitements effectués. Le travail d'analyse, en utilisant des méthodes physiques ou physico-chimiques, est indispensable pour faire les bons diagnostics. Tout traitement utilisant des produits chimiques nécessite une phase de tests, permettant, à partir de mesures, de valider le meilleur protocole. Tout ceci est bien entendu rigoureux et fait appel à une démarche scientifique qui amène de temps en temps à des résultats déroutants, mais essentiels pour faire avancer les techniques et la connaissance. De cet incendie historique, la science retirera sans doute bon nombre d'enseignements et progressera !

Voici le résultat de la restauration de la chapelle Saint-Ferdinand de Notre Dame, c'est du très beau travail !

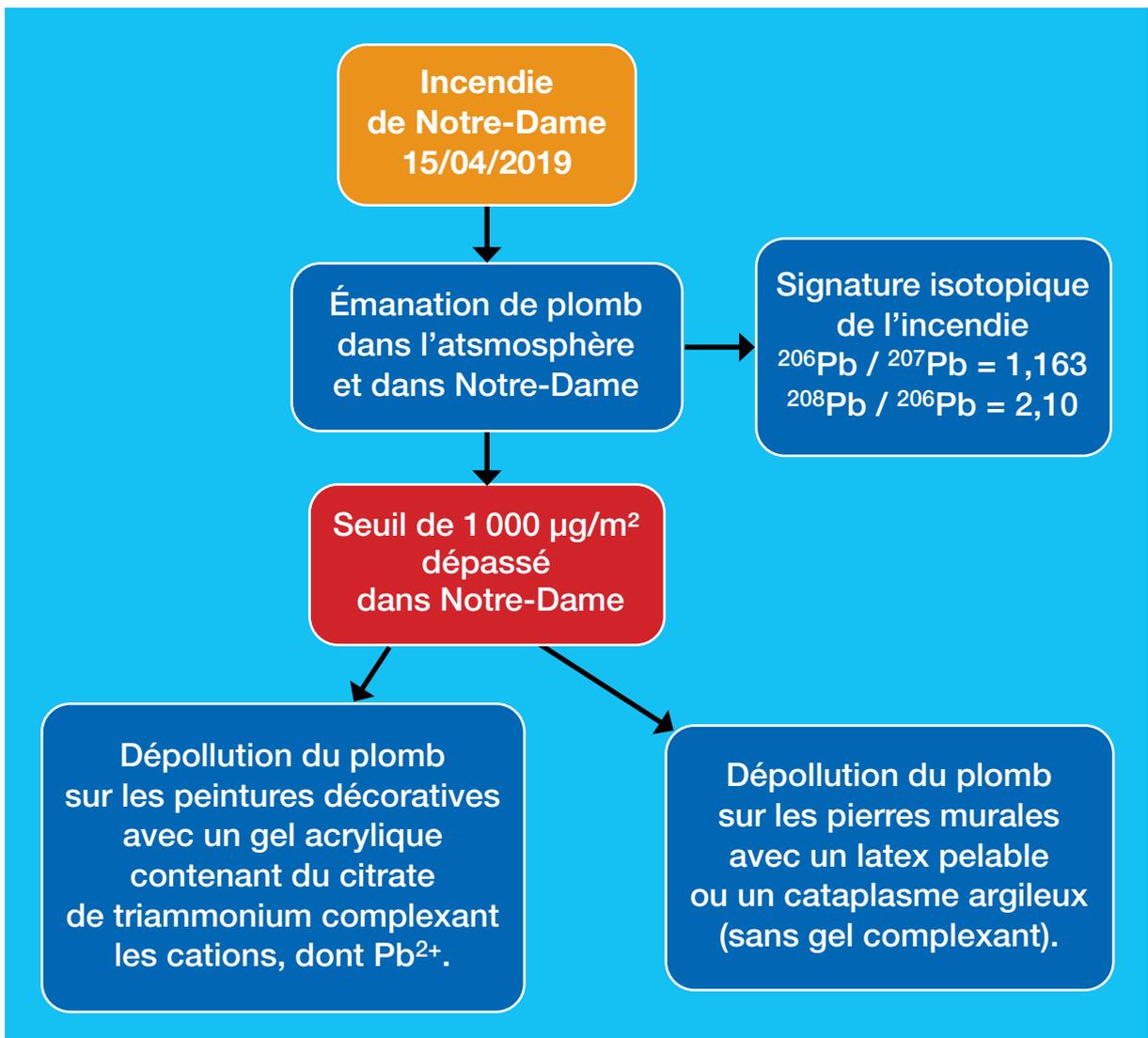


Après l'incendie



Après restauration

En résumé



Pour aller plus loin et explorer des domaines mettant en lien chimie et patrimoine

Vous pouvez prendre connaissance des activités du laboratoire de recherche des monuments historiques (LRMH) à travers ses divers pôles (pierre, métal, bois, etc.). Deux colloques organisés par la Maison de la Chimie et des liens Médiachimie permettent d'élargir vos connaissances sur l'art et la conservation du patrimoine :

- Colloque « [Chimie et Notre Dame](#) » - 09/02/2022
- Colloque « [Chimie et Alexandrie dans l'antiquité](#) » - 13/02/2019

Archéologie et pierres précieuses

- [Les cinq vies d'un objet archéologique](#)
- [Protections des objets archéologiques métalliques](#)
- [Pierres précieuses](#)

Art et peinture

- [De l'analyse des planètes à celle des œuvres d'art](#)
- [La Joconde a moins de secrets](#)
- [La chimie crée sa couleur... sur la palette du peintre](#)
- [Zoom sur les pigments](#)

Verre

- [Zoom sur les vitraux](#)
- [La couleur des verres](#)
- [L'art du verrier : des nanotechnologies depuis l'antiquité!](#)
- [Analyse du verre des bouteilles](#)

Pierre, bétons et grottes

- [Carbone 14 : maître du temps](#)
- [Datation à l'aide de noyaux radioactifs](#)
- [Comment a été retrouvé le secret du ciment romain ?](#) (vidéo associée)
- [La conservation de la pierre en milieu salin](#)

Bois

- [La chimie au service de la conservation du bois : l'exemple du chaland Arles-Rhône 3](#)
- [Les cinq vies d'un objet archéologique](#)

Lutte contre la fraude aux objets d'art

- [L'expert, l'œuvre d'art et la chimie](#)
- [Objets d'art : quand la chimie enquête sur la fraude](#)
- [Fraude et objets d'art](#)

Pour en savoir plus

Une exposition au Collège des Bernardins (Paris) retrace l'histoire de Notre-Dame de Paris ainsi que sa restauration. Cette exposition gratuite qui se déroulera jusqu'en juillet 2022 a pour objectifs de faire rayonner le chantier en cours, mais aussi les métiers du patrimoine méconnus.

Notre-Dame: plus de 850 ans d'histoire



LE PROJET PROFESSIONNEL

La grande diversité des objets du patrimoine, qu'ils soient en bois, terre cuite, porcelaine, métal, verre, pierres précieuses, tissus, peinture, fibres, papier, os... ainsi que les bâtiments et sculptures en pierre et bétons, font l'objet de soins de conservation et de restauration. Il s'agit alors de comprendre le mode de fabrication de l'objet, d'identifier les matériaux qui le constituent et leur provenance, les causes des dégradations qu'il a subies ainsi qu'éventuellement son âge, afin de le restituer ou le conserver au mieux pour qu'il s'adapte aux environnements actuels et le tout en respectant les données historiques.

L'équipe d'ARC-Nucléart montre quelques-unes des différentes facettes de ses métiers : étudier et consolider.

Source : ARC-Nucléart.



Le patrimoine au labo © [Mediachimie](#).

Les scientifiques, dont les chimistes, travaillent alors en relation étroite avec les expert(e)s, historien(ne)s d'art, restaurateurs et restauratrices d'art spécialisés, archéologues et architectes. Ils permettent aussi de lever des doutes et de lutter contre la fraude aux objets d'art. Une multitude d'exemples sont présentés dans l'espace [Chimie et Art](#) de la médiathèque de Mediachimie.

Les chimistes peuvent intervenir à différents niveaux :

Le travail d'analyse est primordial utilisant des techniques dans la mesure du possible non destructives qu'elles soient physiques, physico-chimiques ou relatives aux états de surface.

Il est souvent nécessaire :

- d'éliminer des dépôts de surface plus ou moins gros (par exemple sur des pièces métalliques cela peut faire appel à l'électrochimie) ;
- de nettoyer l'objet et de faire pour cela un choix adapté de certains produits chimiques en fonction des matériaux considérés ;
- de résoudre des problèmes de corrosion.

Dans certains cas il peut être fait appel à des matériaux polymères ou composites pour consolider ou se substituer à la matière détériorée.

Les connaissances et le savoir-faire sur la formulation des peintures et vernis permet de mettre à disposition les produits qui seront nécessaires pour un nettoyage puis une restauration la plus fidèle possible.



Analyse des pigments du visage du scribe accroupi au Louvre © [Mediachimie](#).

Quelques ressources et métiers ciblés :

Relatifs à l'analyse : En quoi consiste le [domaine de l'analyse](#) ? Les chimistes dans la [traque à l'infiniment petit](#).

[Responsable de laboratoire d'analyses / contrôle qualité](#) (H/F) et [Technicien d'analyse chimie / physico-chimie](#) (H/F).

Pour la science des matériaux : [Technicien matériaux](#) (H/F) et [Ingénieur matériaux](#) (H/F).

Relatifs à la formulation : [Zoom sur la formulation](#) pour comprendre ce qu'est la formulation et les métiers associés [Ingénieur en formulation / formulateur](#) (H/F), [Technicien en formulation](#) (H/F).

Les docteurs, les [chercheurs et enseignants-chercheurs](#) (H/F), les [assistants ingénieurs](#) (H/F) des laboratoires de recherche publiques sont très souvent impliqués. Un goût prononcé à la fois pour les sciences, l'histoire et l'art est indispensable.

On consultera avec intérêt les sites web suivants :

Laboratoire de recherche des monuments historiques et ses pôles [LRMH](#), Centre de recherche et de restauration des musées de France [C2RME](#), CNRS et en particulier [Porosity](#), quand la science rencontre l'art, [ArtNucleart](#), Atelier de Recherche et de Conservation (art et science) associé au CEA, le laboratoire [MSAP](#) (Microanalyse, Sciences des Matériaux Anciens et du Patrimoine), [CIRAM](#), laboratoire privé d'analyse pour les objets d'art et le patrimoine culturel, et l'article [Histoire du laboratoire de recherche des musées de France](#) dans la *Revue pour l'histoire du CNRS*.

Ressources proposées en collaboration avec les équipes métiers/orientation de la Maison de la Chimie : Françoise Brénon et Gérard Roussel.