

# L'INCENDIE DE NOTRE-DAME A-T-IL CONSIDÉRABLEMENT PLOMBÉ L'ATMOSPHÈRE PARISIENNE ?

Sandrine Steydli

## Parties des programmes de physique-chimie associées

- Radioactivité et datation
  - Programme d'enseignement scientifique de :
    - ▶ Terminale, spécialité physique-chimie — Thème « modéliser l'évolution temporelle d'un système, siège d'une transformation » partie B
    - ▶ Première, enseignement scientifique — Thème « Une longue histoire de la matière »
    - ▶ Terminale, spécialité SVT — Thème « À la recherche du passé géologique de notre planète »
- Mots-clés :** plomb — pollution — radioactivité — signature isotopique — spectrométrie de masse — Notre-Dame

## INTRODUCTION

Suite au tragique incendie de la cathédrale Notre-Dame de Paris le 15 avril 2019, un vaste chantier de rénovation a vu le jour, avec pour objectif ambitieux de reconstruire le monument à l'identique. Quatre ans et demi plus tard, et à un an de sa réouverture au public prévue le 8 décembre 2024, la charpente est achevée et la flèche qui vient tout juste d'être posée culmine à nouveau à 96 mètres de haut. Si le public se réjouit de voir la cathédrale renaître de ses cendres, la prochaine étape de reconstruction de la toiture ravive néanmoins des inquiétudes suite au choix de garder le plomb comme matériau de couverture. En effet, lors de l'incendie, plusieurs centaines de tonnes de ce métal à la toxicité avérée sont parties en fumée et se sont dispersées dans l'atmosphère parisienne (Figure 1).



Figure 1 — Notre-Dame de Paris, le 15 avril 2019. Les fumées de l'incendie ont dispersé de nombreuses poussières de plomb dans l'air.

**Comment peut-on mesurer l'impact de l'incendie de Notre-Dame sur la pollution au plomb à Paris ?**

## ÉTAT DES LIEUX DU PLOMB À PARIS

### Des sources multiples

La cathédrale Notre-Dame de Paris contient une grande quantité de plomb, qui se localise principalement dans les armatures de vitraux et dans les peintures, en plus de la toiture. Ce métal, qui présente l'avantage d'être imperméable, facile à travailler et d'être très peu sujet à la corrosion, figurait sur la toiture d'origine de la cathédrale depuis le XII<sup>e</sup> siècle et a fait l'objet de plusieurs rénovations au cours des siècles (Figure 2).



Figure 2 — Le plomb à Notre-Dame de Paris, une longue histoire.

En réalité, l'édifice de Notre-Dame est loin d'être la seule source de plomb dans Paris. Tout d'abord, l'utilisation massive d'essence plombée entre les années 1970 et 1985 a largement contribué à la contamination de l'air, de même que dans toutes les grandes villes de la planète. On trouve également du plomb dans les sculptures et les fontaines. De plus, la capitale française possède des spécificités en raison de son histoire, puisqu'on peut rencontrer ce métal dans les bâtiments haussmanniens, notamment dans les peintures et les éléments d'étanchéité des toits et des balcons, ainsi que dans les conduites du système d'adduction d'eau potable et d'évacuation des eaux usées (Figure 3).

**Les matériaux de construction**



Toiture, agrafes, scelliments ...

**Les sources anthropiques**



Trafic routier



Le bâti parisien (toitures, peintures, tuyauteries, ...)

Figure 3 — Les différentes sources de plombs dans Notre-Dame et la ville de Paris.

Parmi ces sources multiples de pollution au plomb, l'objectif des analyses chimiques est de déterminer quelle est la proportion qui peut réellement être imputée à l'incendie.

**Caractériser les plombs parisiens par leur signature isotopique**

L'élément plomb possède une trentaine d'isotopes<sup>1</sup>, dont quatre sont stables : le plomb 204<sup>2</sup>, 206, 207 et 208. Parmi ceux-ci, un seul était présent au début de l'histoire de l'Univers, à savoir le plomb 204, et sa quantité n'a donc pas varié dans le temps. En revanche, son abondance relative a progressivement baissé jusqu'à aujourd'hui, puisque les trois autres isotopes stables du plomb sont radiogéniques, c'est-à-dire qu'ils



Figure 4 — L'origine radiogénique des isotopes 206, 207 et 208 du plomb. Ces isotopes se situent à la fin de chaînes de désintégrations nucléaires d'isotopes de l'uranium ou du thorium et sont donc stables.

sont formés lors de désintégrations nucléaires d'autres éléments radioactifs (Figure 4). Le plomb 204 représente aujourd'hui à peine 1,4 % du plomb total sur Terre.

La formation des isotopes radiogéniques du plomb se fait très lentement au fil des ans, car les éléments radioactifs dont ils sont issus — à savoir uranium 238, uranium 235 et thorium 232 — ont des demi-vies très longues, de l'ordre du milliard d'années. Et comme ces trois demi-vies sont cependant différentes, la formation des plomb 206, 207 et 208 ne s'effectue pas à la même vitesse.

1. Deux isotopes sont des atomes possédant le même nombre de protons et d'électrons, mais un nombre de neutrons différents. Leurs propriétés chimiques sont identiques, car elles dépendent du cortège électronique. La légère différence de masse de deux isotopes entraîne une différence de certaines propriétés physiques, notamment en termes de stabilité.

2. La notation « plomb 204 » précise que cet isotope du plomb possède 204 nucléons.

Par conséquent, les rapports entre les quantités des différents isotopes stables (par exemple  $^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$ , ou  $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ , etc.) évoluent de manière infime, néanmoins détectable au cours du temps. Leur connaissance permet alors de réaliser une datation et de déterminer l'origine du métal analysé, même s'il a été recyclé, car cette empreinte géologique se conserve de la mine jusqu'aux objets manufacturés.

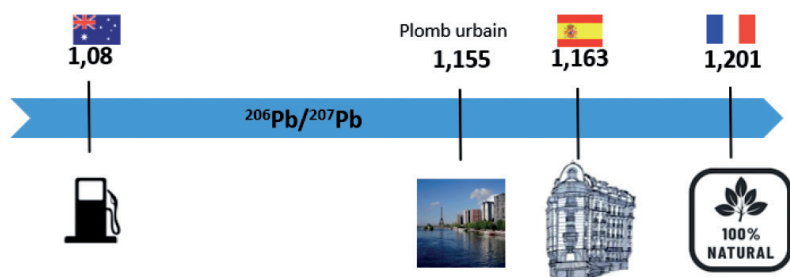


Figure 5 — Signature isotopique des principales sources de plomb à Paris. Source : d'après L. Lestel (CNRS, Paris), Ayrault et coll. (2012, 2014).

La connaissance des signatures isotopiques permet ainsi d'identifier les sources principales de plomb dans Paris. On constate par exemple que les plombs issus des carburants laissent une empreinte très différente des autres, avec un rapport  $^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$  caractéristique égal à 1,08 (Figure 5). Avec

cette technique, on parvient alors assez aisément à le distinguer du plomb des bâtis haussmanniens, du plomb naturel du bassin de la Seine, et du « plomb urbain » que l'on retrouve couramment dans les déchets tels que les eaux usées.

Étant donné que certains plombs ont des rapports isotopiques proches, on peut affiner la méthode en y ajoutant également la signature élémentaire, qui permet de différencier entre eux les différents éléments chimiques de l'échantillon. Pour ce faire, on réalise un dosage de nombreux autres métaux ou métalloïdes<sup>3</sup> notamment les éléments très abondants sur Terre (tels le silicium, le fer, l'aluminium...) et on rapporte leur concentration à celle du plomb ; on obtient ainsi une signature géochimique plus complète (Figure 6).

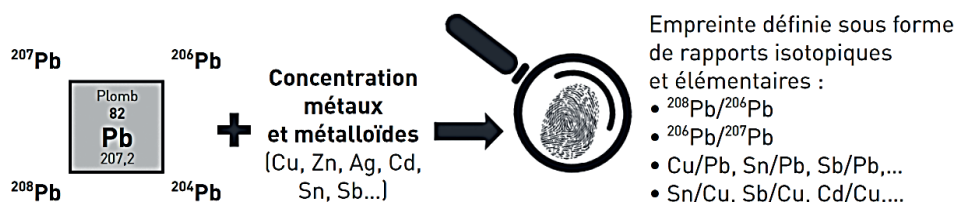


Figure 6 — Pour identifier de manière précise la provenance d'une poussière de plomb, l'enquêteur-chimiste associe deux outils : les proportions de l'élément plomb par rapport aux autres éléments chimiques [rapports élémentaires] et les proportions des différents isotopes stables de l'élément plomb [rapports isotopiques].

Finalement, il restera à « cartographier » les différents plombs que l'on rencontre à Paris, et à faire un travail similaire avec les fumées de l'incendie afin de comparer leurs empreintes respectives.

## LA DÉMARCHE DES CHIMISTES POUR TRACER LES PLOMBES ISSUS DE L'INCENDIE

### Prélever des échantillons à analyser

Sur le site de la cathédrale en partie ravagée par le feu, dix-neuf prélèvements de poussière ont été réalisés entre juin 2019 et avril 2020. Le protocole habituel suivi par les techniciens consiste à récupérer des échantillons sur des supports dédiés, parfaitement nettoyés, inertes et non contaminants... ce qui s'est révélé impossible dans le cas de Notre-Dame. Le support s'approchant le plus de ces critères s'est révélé être le bois, qui n'est pas contaminant contrairement au métal, et qui est probablement exempt d'autres particules antérieures à l'incendie comme celles qu'on a pu retrouver sur du tissu par exemple.

Une fois les poussières isolées mécaniquement de mélanges de fibres quand cela s'est avéré nécessaire, la chimie de laboratoire prend le relais : dans un premier temps, il est souhaitable de décomposer ces particules solides en une solution limpide. On utilise pour cela des digesteurs, fours à micro-ondes sous pression où les poussières sont traitées par des solutions très concentrées d'acides fluorhydrique, nitrique, chlorhydrique et perchlorique.

3. Un métalloïde possède des propriétés physiques et chimiques intermédiaires entre celles d'un métal et d'un non-métal. Ils sont par exemple souvent semi-conducteurs (il n'existe pas d'appellation officielle « métalloïde » pour l'IUPAC).

## La spectrométrie de masse pour déterminer la signature élémentaire des poussières...

La solution provenant de chaque échantillon est ensuite introduite dans un spectromètre de masse qui permet de séparer, d'identifier et de quantifier les différents éléments chimiques qu'elle contient. On peut ainsi établir les rapports entre les quantités de plomb et celles d'une trentaine d'autres éléments chimiques.

Quelques résultats figurent sur les courbes de la **figure 7**, où on a mis en correspondance les concentrations de l'argent, du cadmium, de l'étain, de l'antimoine, du bismuth et du cuivre avec celles du plomb. Les points de mesure présentent des couleurs différentes selon le support sur lequel l'échantillon a été prélevé, et leur forme est liée au niveau de prélèvement. Par ailleurs, les poussières qui étaient à l'origine dans un mélange de fibres sont repérables par un contour rouge.

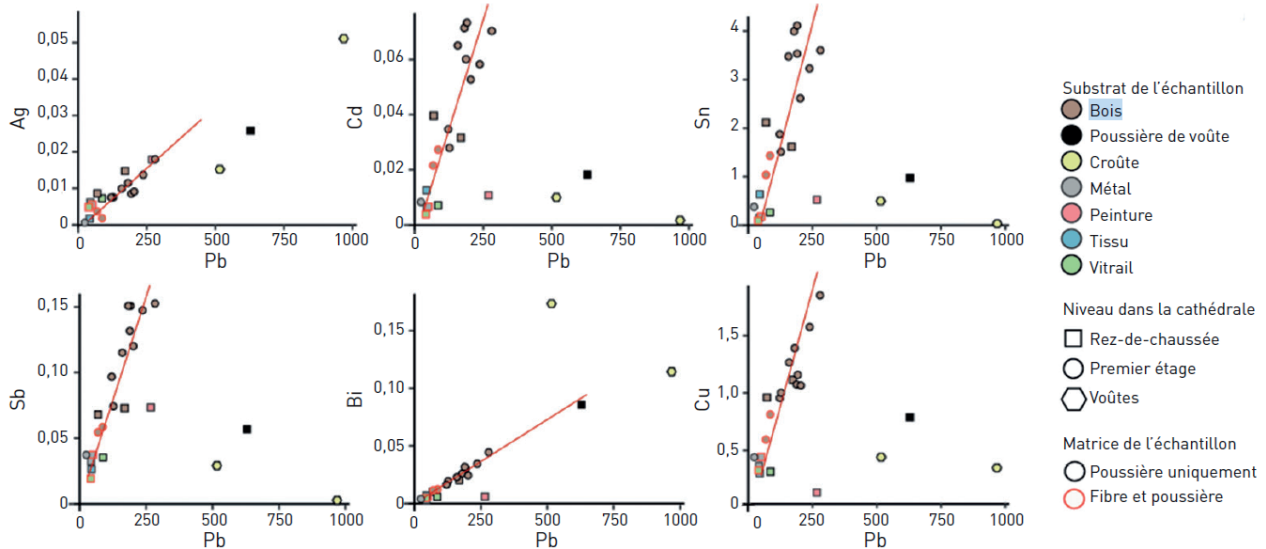


Figure 7 — Empreintes des poussières émises par l'incendie de Notre-Dame : corrélation entre les concentrations des éléments en gramme par kilogramme de matière et les concentrations en plomb en g/kg<sup>4</sup>.

On peut tout d'abord constater que les points de couleur marron sont bien regroupés et homogènes en termes de teneur en plomb, et ce quel que soit l'autre élément considéré, ce qui valide le fait que le bois soit un support de choix, car il est très peu contaminant.

De plus, on a tracé pour chaque graphique des droites de corrélation, dont le coefficient directeur permet d'accéder au rapport entre la concentration du métal étudié et celle du plomb. La compilation de ces données constitue l'empreinte élémentaire des poussières de Notre-Dame et contribue à les identifier.

### ... ainsi que leur signature isotopique

En modifiant les réglages du spectromètre, on peut également quantifier les différents isotopes du plomb présents dans les poussières et ainsi établir leurs rapports isotopiques pour compléter leur empreinte caractéristique.

On peut alors représenter le rapport  $^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$  en fonction de l'inverse de la concentration du plomb, comme dans la **figure 8** qui utilise le même symbolisme que la **figure 7**. On constate que les points de mesure correspondant au support bois prélevés à l'étage sont ici encore bien regroupés et très homogènes avec un taux de plomb élevé, ce qui s'interprète par une source unique de plomb et permet d'affirmer que la zone correspondante constitue la signature de l'incendie de Notre-Dame. À l'inverse, une deuxième zone large et horizontale se dégage sur ce même graphique, où les différents échantillons présentent quasiment le même rapport  $^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$  quelle que soit leur teneur en plomb ; on attribuera cette partie à l'ambiance de Notre-Dame, car elle inclut notamment les échantillons où les poussières étaient mélangées à des fibres.

4. Un spectromètre de masse permet de séparer des éléments de masses différentes. Les atomes sont fondus, vaporisés, et ionisés. Ils sont ensuite accélérés sous l'action d'un champ électrique puis déviés avec un champ magnétique dont on peut faire varier les propriétés. La vitesse et la trajectoire des ions sont différentes selon leur masse (ou plutôt leur rapport « masse sur charge »), ce qui permet de les séparer puis les détecter et les quantifier.



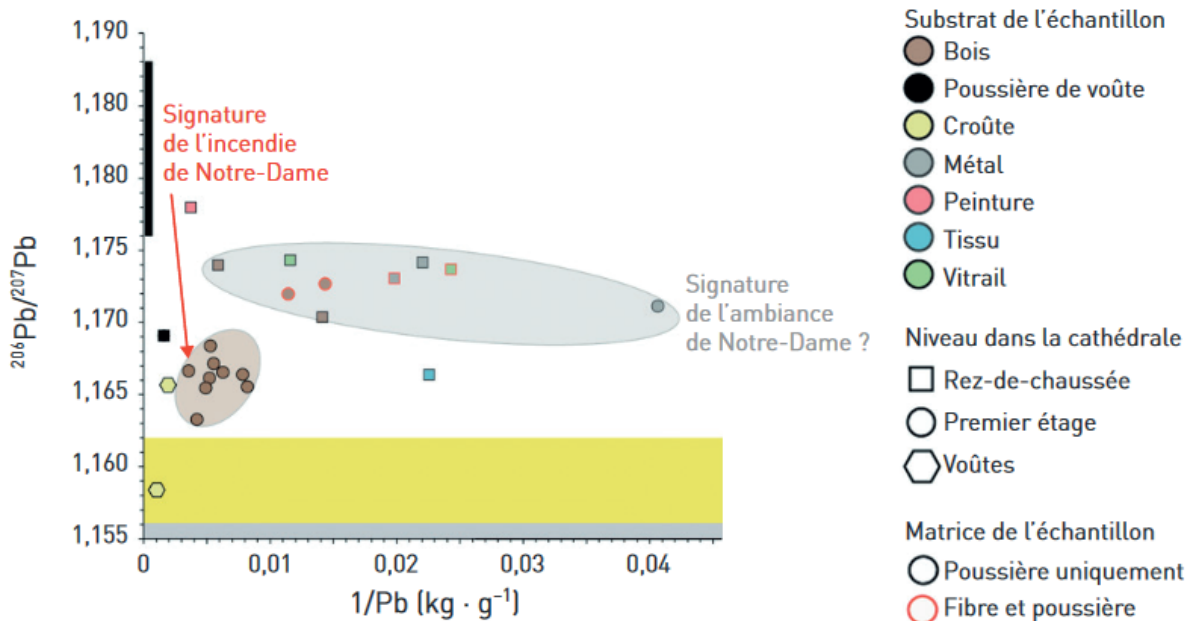


Figure 8 — Échantillons représentatifs de Notre-Dame de Paris. Exclusion des échantillons collectés sur des supports contaminants (pollution du signal). Exclusion des échantillons à matrice fibreuse (pollution et/ou dilution du signal). Exclusion des échantillons provenant du RDC (dilution du signal).

### Recouper les données des analyses chimiques, présentes et passées

Afin de déterminer l'impact de l'incendie sur la pollution au plomb à Paris, il est ensuite judicieux de compiler l'ensemble des résultats précédents. La figure 9 regroupe ainsi sur un même graphique le rapport  $^{208}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$  en fonction du rapport  $^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$  pour la cathédrale Notre-Dame, l'ensemble des sources de plomb de la ville, ainsi que d'autres éléments de comparaison. On voit alors apparaître plusieurs zones distinctes, permettant de tracer différentes origines pour le plomb.

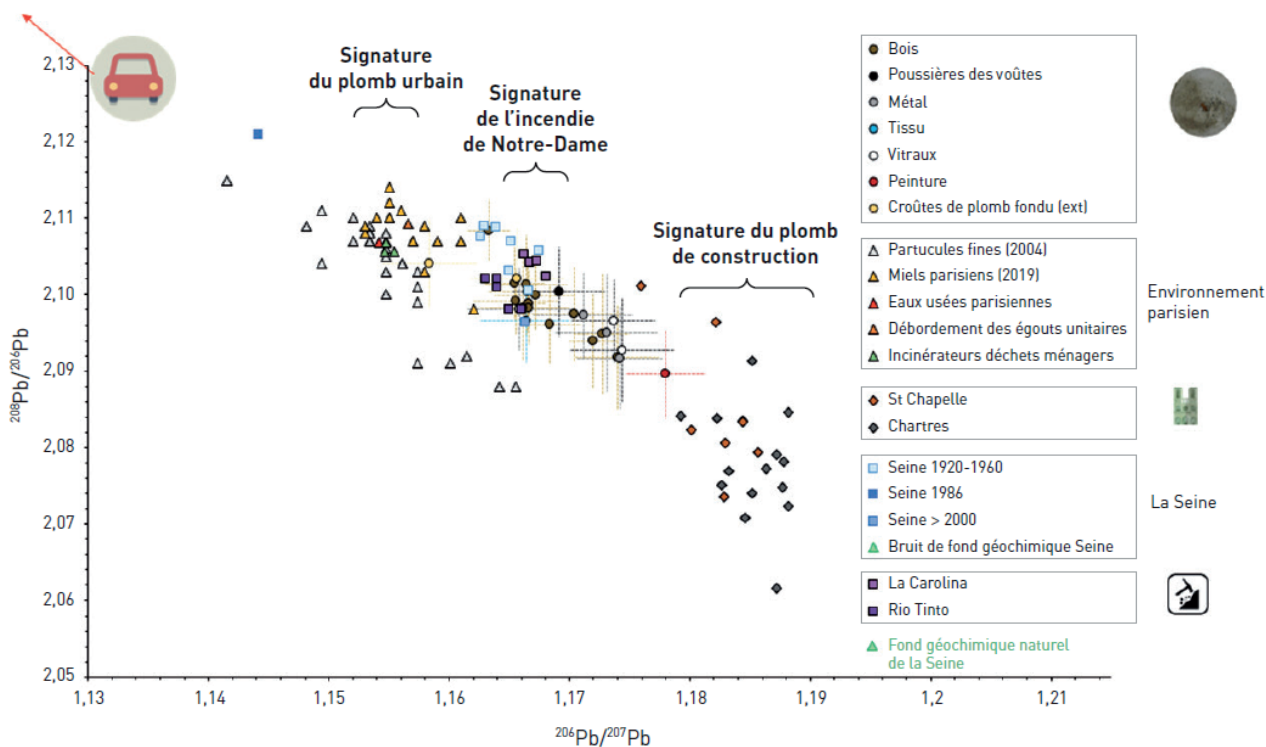


Figure 9 — L'empreinte isotopique de l'incendie de Notre-Dame de Paris dans les sources de plomb à Paris. On notera que l'échelle en abscisse est très dilatée par rapport au document simplifié de la Figure 5, ce qui explique que les plombs des carburants ne soient pas représentés avec leur signature de 1,08.

Dans un premier temps, on repère en haut à gauche le plomb urbain, issu notamment des échantillons des eaux usées parisiennes et des incinérateurs de déchets ménagers. On y voit aussi des résultats d'études de l'air parisien, mais ces prélèvements sont anciens donc moins significatifs, constituant une des difficultés majeures rencontrées par les chimistes dans ce travail de synthèse. En ce qui concerne l'atmosphère de Paris, les mesures ont été arrêtées peu de temps après l'interdiction du plomb dans les carburants, les dernières datant de 2003-2004. La majorité des points obtenus s'intègrent à la signature du plomb urbain.

Dans la partie droite du graphique, on distingue également la signature du plomb de construction. Ne disposant pas de données spécifiques à Notre-Dame, les points représentés sont ceux de la Sainte-Chapelle et de la cathédrale de Chartres, deux autres édifices qui ont été construits à la même période et dans des conditions estimées suffisamment semblables par les historiens pour être exploitables.

Au centre du graphique, on retrouve enfin la signature de l'incendie de Notre-Dame, avec tous les échantillons significatifs précédents. Bien séparée des deux zones précédentes, elle rend ainsi possible la distinction entre les plombs de l'incendie et ceux de la majorité des autres sources parisiennes. Dans cette partie centrale, on peut cependant observer des points de mesure qui relèvent d'analyses de sédiments de la Seine largement antérieures, ce qui rend plus difficile l'identification certaine des plombs de l'incendie.



Figure 10 — Le panache de fumée de l'incendie s'est propagé majoritairement vers l'ouest.

### L'étude du miel comme bio-indicateur de l'environnement

Par ailleurs, des chercheurs canadiens se sont intéressés de près à des miels produits par des abeilles parisiennes, afin d'évaluer la pollution de la ville de Paris après cet incendie. En effet, les abeilles, qui s'éloignent au maximum de deux à trois kilomètres de leur ruche, collectent au passage les éventuelles particules qu'elles rencontrent dans l'air, et celles-ci se retrouvent jusque dans leur miel, qui devient alors un indicateur précieux de leur environnement. Ainsi les analyses effectuées durant l'été 2019 montrent une augmentation du taux de plomb par rapport à des miels prélevés auparavant, notamment à proximité de la cathédrale et dans des lieux plus à l'ouest, situés sur le trajet suivi par le panache de fumée en cette funeste soirée du 15 avril 2019 (Figure 10).

Même si elle reste bien en deçà des limites admissibles, cette hausse de la teneur en plomb a donc d'abord été assimilée à des séquelles de l'incendie. Or sur le graphique de la figure 9, on peut voir que les points de mesure associés aux miels parisiens se situent dans la partie gauche, et se distinguent nettement des plombs issus de l'incendie qu'on a mis en évidence au centre. On peut donc en déduire que le plomb présent dans les miels parisiens provient finalement d'une autre source que la cathédrale Notre-Dame.

### CONCLUSION

Au terme d'un important travail de recherche collaborative, où les enquêtes scientifiques sur le terrain ont été enrichies d'éléments historiques et de données économiques de l'époque, les chimistes ont réussi à déterminer la signature isotopique et élémentaire du plomb issu de l'incendie de Notre-Dame.

À la manière d'un code-barre qui permet de l'identifier au milieu de nombreuses sources de plomb dans Paris, il est donc désormais possible de déterminer si l'incendie est responsable ou non de la contamination d'un objet. Cet élément de diagnostic a par exemple permis de mettre en évidence que la pollution des miels parisiens n'était finalement pas directement liée à l'incendie, contrairement à ce qui était pressenti au départ. Bien qu'il reste de nombreuses analyses de plomb à mener dans la capitale, ce premier résultat se montre plutôt rassurant et laisse à penser que la pollution imputable à l'incendie reste assez marginale.

Pour conclure, dans un contexte où il peut être tentant de diaboliser la chimie, cette étude illustre le rôle important qu'ont à jouer les chimistes, à la fois dans la sensibilisation du public aux risques sanitaires, mais également en fournissant des outils d'analyse objectifs qui participent à des prises de décisions éclairées.

## SOURCE PRINCIPALE

*Sophie Ayrault*

*Chimie et Notre-Dame de Paris, EDP Sciences, 2023, ISBN : 978-2-7598-2896-8*

Tracer les plombs de Notre-Dame de Paris par leur signature isotopique et élémentaire

<https://www.mediachimie.org/ressource/tracer-les-plombs-de-notre-dame-de-paris-par-leur-signature-isotopique-et-élémentaire>

**Pour aller plus loin sur le spectroscope de masse :**

<https://www.mediachimie.org/ressource/spectrométrie-de-masse-ms-mass-spectrometry>

**Sandrine Steydli** est professeure agrégée de physique-chimie

**Comité éditorial :** Danièle Olivier, Jean-Claude Bernier, Grégory Syoen