



(ID Modèle = 454913)

Ineris - 200480 - 879062 - v2.0

26/11/2019

Modélisation de la dispersion des particules de plomb du panache de l'incendie de Notre Dame

Rapport Technique

PRÉAMBULE

Le présent document a été réalisé au titre de la mission d'appui aux pouvoirs publics confiée à l'Ineris, en vertu des dispositions de l'article R131-36 du Code de l'environnement.

La responsabilité de l'Ineris ne peut pas être engagée, directement ou indirectement, du fait d'inexactitudes, d'omissions ou d'erreurs ou tous faits équivalents relatifs aux informations utilisées.

L'exactitude de ce document doit être appréciée en fonction des connaissances disponibles et objectives et, le cas échéant, de la réglementation en vigueur à la date d'établissement du document. Par conséquent, l'Ineris ne peut pas être tenu responsable en raison de l'évolution de ces éléments postérieurement à cette date. La mission ne comporte aucune obligation pour l'Ineris d'actualiser ce document après cette date.

Au vu de ses missions qui lui incombent, l'Ineris, n'est pas décideur. Les avis, recommandations, préconisations ou équivalents qui seraient proposés par l'Ineris dans le cadre des missions qui lui sont confiées, ont uniquement pour objectif de conseiller le décideur dans sa prise de décision. Par conséquent, la responsabilité de l'Ineris ne peut pas se substituer à celle du décideur qui est donc notamment seul responsable des interprétations qu'il pourrait réaliser sur la base de ce document. Tout destinataire du document utilisera les résultats qui y sont inclus intégralement ou sinon de manière objective. L'utilisation du document sous forme d'extraits ou de notes de synthèse s'effectuera également sous la seule et entière responsabilité de ce destinataire. Il en est de même pour toute autre modification qui y serait apportée. L'Ineris dégage également toute responsabilité pour chaque utilisation du document en dehors de l'objet de la mission.

Nom de la Direction en charge du rapport : Direction des Risques Chroniques

Rédaction : TOGNET Frederic ; TRUCHOT BENJAMIN

Vérification : ROUIL LAURENCE; DUPLANTIER STEPHANE

Approbation : HUBERT PHILIPPE- le 26/11/2019

Liste des personnes ayant participé à l'étude :

Table des matières

1	Introduction	6
2	Définition du périmètre de l'étude	7
3	Détermination du terme source	9
3.1	Reconstruction du terme source incendie	9
3.1.1	Modélisation de l'incendie – partie théorique.....	9
3.1.2	Application au cas de ND	10
3.2	Détermination de la fraction de plomb dans le terme source	13
3.2.1	Détermination du comportement du plomb en cas d'incendie – partie théorique.....	13
3.2.2	Application au cas de ND	14
3.3	Choix des termes sources retenus pour l'étude	16
4	Modélisation de la dispersion du panache et de ses retombées sur le domaine d'intérêt	18
4.1	Modèle de dispersion utilisé	18
4.2	Caractéristiques du domaine de modélisation.....	18
4.3	Reconstruction météorologique de l'écoulement atmosphérique.....	19
4.4	Analyse de l'écoulement atmosphérique au moment de l'incendie.....	20
5	Résultats.....	21
5.1	Simulations réalisées.....	21
5.2	Éléments de vérification.....	25
6	Conclusion.....	26
7	Références	28

Résumé

Le présent rapport synthétise les résultats de l'étude de modélisation menée par l'Ineris pour simuler la dispersion atmosphérique du panache de fumées et les dépôts en plomb induits par l'incendie de la cathédrale Notre Dame à Paris, le 15 avril 2019. Plus précisément, l'étude vise à produire des éléments d'appréciation relatifs à la répartition spatiale des dépôts de monoxyde de plomb formé sous les effets thermiques de l'incendie puis mis en suspension et entraîné dans le panache sous forme particulaire.

Il est important de noter que les émissions de monoxyde de plomb et les retombées provoquées par les nombreux effondrements de grosses structures (morceaux de charpente, éléments métalliques, pierres de voute...) ne sont pas considérées dans cette étude. Ces effondrements, les foyers d'incendie locaux ou secondaires et la forte turbulence de l'écoulement aux environs immédiats du foyer sont en effet susceptibles d'avoir engendré **de fortes émissions de plomb au niveau du sol qui ont eu un impact important aux alentours immédiats de l'édifice (dans un rayon de l'ordre de 1km)**. Cependant, leur nature locale et très spontanée, fortement influencée par la mécanique des effondrements multiples des structures ne permet pas d'assimiler leur comportement à celui d'un panache de pollution qui se disperserait dans l'atmosphère. De fait, **les dépôts à proximité de Notre Dame qui ont fait l'objet des premières campagnes de mesure menées par l'ARS ne peuvent pas être modélisés** par l'approche développée dans cette étude.

Les résultats de modélisation du plomb émis à l'atmosphère présentés dans ce rapport définissent une deuxième zone d'impact due au panache de l'incendie qui s'étendrait sur une **distance de l'ordre de 800m jusqu'à une cinquantaine de kilomètres de la source**. Cette zone (ouest-nord-ouest) est également déterminée par la direction des vents dominants pendant la période de l'incendie. Ces travaux viennent donc compléter de manière cohérente la stratégie de prélèvements de l'ARS qui a ciblé la zone d'impact maximum aux environs immédiats de Notre Dame.

Le rapport présente la démarche d'évaluation et de caractérisation du terme source basée sur une analyse fine des différentes phases de l'incendie. Cette description repose sur un certain nombre d'hypothèses explicitées dans le rapport. Le profil granulométrique des particules étant un paramètre particulièrement sensible vis-à-vis des phénomènes de dépôts atmosphériques, en l'absence de données permettant de qualifier correctement ce paramètre, trois scénarios correspondant à trois hypothèses sur la répartition granulométrique des particules ont été établis. Ces scénarios correspondent à différentes hypothèses de répartition des particules dans des classes de granulométrie variant de 1,5 à 50 microns.

Pour établir des hypothèses sur la quantité de plomb émise lors de l'incendie, l'Ineris s'est appuyé sur les propriétés physiques du plomb qui montrent que le plomb est très stable aux températures observées lors d'un incendie. Des informations disponibles dans la littérature et des résultats d'essais ayant mis en jeu des échantillons de plomb soumis à un flux thermique et une ventilation reproduisant l'entraînement d'air d'un incendie ont également été considérés.

Sur la base de cette expertise, un taux d'émission de 0,3 g de particules émises par kg de plomb présent initialement (soit un ratio de 3 pour 10 000) a été estimé pour réaliser la modélisation. Cette fraction correspond à une émission totale émise à l'atmosphère d'environ 150 kg de plomb. Cette quantité a ensuite été répartie sur les trois premières heures de l'incendie développé en fonction de la puissance de ce dernier et des événements observés (chute de la flèche notamment).

Cette estimation est faite au regard des données et connaissances disponibles et elle présente des incertitudes concernant notamment le facteur d'émission conduisant à estimer les quantités de plomb émises à l'atmosphère, la granulométrie des particules et la répartition temporelle des émissions, **elle permet cependant de modéliser la dispersion des retombées du panache et leur répartition géographique**.

Ainsi, les résultats issus des simulations de dispersion et de dépôt de plomb sont présentés sous la forme de cartographies de niveaux relatifs de quantités déposées (par rapport au niveau maximal simulé).

Ces simulations sont réalisées à l'aide d'un modèle lagrangien tridimensionnel, MSS, qui permet de prendre en compte la variabilité des champs météorologiques sur l'ensemble du domaine de calcul, et l'influence du relief.

La relative stabilité de la direction des vents le temps qu'a duré l'incendie, explique la faible dispersion du panache, qui s'étire sur un axe reliant l'île de la Cité à Mantes-la-Jolie. Au niveau de l'agglomération parisienne, le panache impacte la **pointe nord du VI^{ème} arrondissement, le VII^{ème}, le Nord du XV^{ème}, et le XVI^{ème}**. Ces arrondissements constituent la zone de plus fortes retombées quel que soit le scénario

considéré, avec un gradient décroissant du centre vers la périphérie de la ville étant admis que la zone aux alentours de la cathédrale soumise aux impacts locaux du sinistre, non modélisée, restait la zone de dépôts maximaux. A la sortie de Paris, le panache de l'incendie subit les effets du relief liés à la vallée de la Seine. Les retombées s'étendent jusqu'à Mantes-la-Jolie à près d'une cinquantaine de kilomètres de la source.

L'analyse des trois scénarios permet de mettre en évidence l'effet de la granulométrie : les particules les plus grosses retombent plus, et plus près de la source, alors que les particules de plus faible taille sont transportées sur de plus grandes distances et donc déposées plus loin. C'est ainsi qu'il est tout à fait plausible, selon les simulations, que le signal en concentrations en plomb détecté par la station Airparif de Limay (soit $0.108 \mu\text{g}/\text{m}^3$ obtenus par prélèvement sur filtre sur une moyenne hebdomadaire) à 50km au Nord-ouest de Paris) soit bien imputable à l'incendie de Notre Dame. Cette concentration est toutefois très inférieure aux valeurs réglementaires pour le plomb : objectif de qualité de $0.25 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en moyenne annuelle et valeur limite de $0.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en moyenne annuelle. De plus, il est important de noter qu'à cette distance, quel que soit le scénario, les dépôts associés sont certainement faibles, de 20 à 40 fois inférieurs à ceux estimés dans le VII^{ème} arrondissement où se situe le maximum des retombées du panache de l'incendie modélisé.

Il est enfin intéressant de noter que ces conclusions ont permis de guider l'ARS dans la mise en place d'une récente campagne de prélèvements complémentaires visant à explorer des zones possiblement impactées par le panache et relativement éloignées de la source. Malgré les incertitudes liées aux effets de lessivage et de ruissellement six mois après l'incendie, les résultats de cette campagne visant une approche globale (prélèvements et modélisation) fournissent des éléments d'information complémentaires aux simulations sur la distribution spatiale du plomb potentiellement déposé au passage du panache.

Pour citer ce document :

Institut National de l'Environnement Industriel et des Risques, Verneuil-en-Halatte : Ineris - 200480 - 879062 - v2.0, 26/11/2019.

Mots-clés :

Incendie Notre Dame, plomb, modélisation, terme source, dispersion atmosphérique, dépôts atmosphériques.

1 Introduction

L'incendie de la cathédrale de Notre-Dame à Paris le 15 avril 2019 a généré une dispersion de poussières contenant du plomb, issues de la toiture et de la flèche de l'édifice.

Les mesures de poussières de plomb autour de la cathédrale ont révélé des niveaux de contamination élevés. De plus, la station de surveillance de la qualité de l'air d'Airparif installée à Limay (à environ 50 km à l'ouest de Notre-Dame) a relevé une élévation inhabituelle de la concentration en plomb dans l'air (0,108 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ obtenus par filtre sur une moyenne hebdomadaire) dans la semaine de l'incendie.

Ces éléments ont conduit les autorités sanitaires à s'interroger sur les retombées de poussières sur le bassin parisien, et en particulier sur sa partie ouest qui était sous l'influence des vents dominants le jour de l'incendie.

Lors d'une réunion sur le sujet réunissant la DGS, la DGPR, l'INERIS et l'ARS Ile-de-France le 20 août 2019, il a été décidé que l'Ineris réaliserait une modélisation haute résolution de la dispersion du panache de l'incendie de Notre-Dame et de ses retombées en plomb.

Ces travaux font l'objet d'une convention entre l'ARS Ile de France et l'Ineris et le présent rapport de l'Ineris présente le résultat de cette étude de modélisation, ainsi que l'approche méthodologique et les hypothèses adoptées. Il présente donc une analyse des résultats de la modélisation de la dispersion des constituants en plomb du panache de l'incendie de Notre Dame survenu entre le 15 et le 16 avril 2019.

Conformément à la méthode déployée, ce rapport s'articule en quatre parties :

- Définition du périmètre de l'étude,
- Détermination du terme source,
- Modélisation de la dispersion du panache de l'incendie et des retombées de plomb de ce panache,
- Analyse des résultats de modélisation.

2 Définition du périmètre de l'étude

L'incendie du toit et de la flèche de Notre Dame a été à l'origine d'émissions de composés en plomb qui ont pu impacter l'environnement à différentes échelles spatiales :

- Dans le champ proche, sous l'influence de l'effondrement de certaines structures de l'édifice, l'émission de poussières se caractérise par une interaction forte à très forte avec des événements importants au niveau de l'incendie qui ne relèvent pas du panache de fumées (effondrement, proximité des foyers de l'incendie...);
- Dans une zone s'étendant sur quelques dizaines de kilomètres influencée par la dispersion du panache de l'incendie chargé en composés de plomb;
- Dans une zone de grande distance, qui se caractérise par des écoulements atmosphériques spécifiques susceptibles de transporter les composés qui ne se seraient pas déposés au sol ou décomposés sous l'effet de réactions chimiques.

Le périmètre de la présente étude concerne **l'impact du panache de fumées de l'incendie transportant des particules du plomb émises dans des conditions qui seront définies dans le paragraphe suivant et dispersées sur une zone impactant une partie de l'île de France**. Il s'agit typiquement d'une zone s'étendant depuis quelques centaines de mètres (environ 800m pour les premiers impacts du panache de l'incendie modélisé) de la source jusqu'à une cinquantaine de kilomètres. Sa taille est déterminée par des tests préliminaires qui visent notamment à définir sa borne supérieure. Cette zone constitue la « **zone d'intérêt de l'étude** », cette dénomination est reprise dans la suite du document.

Les impacts constatés à proximité immédiate de l'édifice et autour du foyer de l'incendie, résultant également de nombreux effondrements de structures (morceaux de charpente, éléments métalliques, pierres de voûte...) **ne font pas l'objet de l'étude**. Ces effondrements sont susceptibles d'avoir engendré de fortes émissions de plomb au niveau du sol. Si on ajoute à ces émissions l'effet des foyers d'incendie locaux ou secondaires, une aéraulique interne liée à l'incendie très spécifique liée à l'architecture de l'édifice, et la forte turbulence de l'écoulement extérieur aux environs immédiats du foyer, des émissions importantes de plomb ont pu se produire sans être entraînées dans le panache de l'incendie. Ces émissions de plomb ont ensuite été répandues aux alentours immédiats de l'édifice, sur le parvis et les rues adjacentes et ont vraisemblablement impacté fortement ces zones. Cependant, la nature de ces émissions spontanées, très locales et fortement influencées par la mécanique des effondrements multiples des structures ne permet pas d'assimiler leur comportement à celui d'un panache de pollution qui se disperserait dans l'atmosphère. De fait, les dépôts à proximité immédiate de Notre Dame ne peuvent pas être modélisés par cette approche.

De même le possible transport des particules de plomb sur de très longues distances (au-delà de la centaine de kilomètres) est possible, mais il est raisonnable de supposer (comme cela sera montré par la présente étude) que la plus grande partie de ces particules se sera déposée dans les 50 premiers km. L'objectif de l'étude étant de déterminer les aires géographiques où l'impact des retombées du panache modélisé est maximal, il ne nous a pas paru opportun de mettre en œuvre des modèles spécifiques grande échelle pour simuler la dispersion au-delà de cette zone.

Le périmètre géographique de l'étude étant fixé, la modélisation de la dispersion et des retombées du panache est faite en deux étapes :

1. **Le calcul d'un terme source** qui consiste à estimer les caractéristiques de l'incendie en fonction notamment de la nature du combustible, de sa quantité et de sa répartition dans le volume concerné. Ces caractéristiques, puissance dégagée, production de fumées, température et composition permettent de définir les conditions d'émission des particules de plomb. Par ailleurs, dans cette étape, la quantité de plomb rejetée ainsi que la granulométrie des particules sont estimées pour compléter la caractérisation du terme source.
2. La **modélisation de la dispersion** du panache et des dépôts de plomb et le rendu de résultats sous forme cartographique. Cette deuxième phase est alimentée par les résultats de la première, et par un ensemble de données météorologiques observées ou simulées pendant la durée de l'incendie. Le modèle peut ainsi prendre en compte l'état de l'écoulement atmosphérique, également influencé par la nature des sols et du relief.

Le modèle de dispersion simule l'évolution des concentrations atmosphériques en plomb sur le domaine d'étude et durant l'incendie en prenant en compte les processus de retombées au sol. La distribution spatiale du plomb déposé constitue donc le résultat de cette étude.

Il est important de préciser que compte tenu :

- de la difficulté d'estimer les contributions respectives des émissions en plomb liées au panache de l'incendie ou celles liées aux phénomènes locaux autour de Notre Dame,
- des incertitudes importantes sur le diagnostic du terme source,
- des incertitudes sur les autres données d'entrée qui serviront à alimenter le modèle de dispersion utilisé, (notamment les champs météorologiques qui décrivent une situation moyenne horaire),
- des incertitudes intrinsèques à la modélisation de la dispersion,

les résultats en valeurs absolues (concentrations atmosphériques ou dépôts) sont eux-mêmes entachés d'incertitudes importantes, difficiles à estimer.

Afin de ne pas induire de biais dans l'interprétation des résultats bruts, ces derniers sont présentés sous forme de cartographies d'indicateurs relatifs de dépôt sur la zone d'intérêt. Elles décrivent la distribution spatiale des retombées, et il est ainsi possible d'identifier les zones d'impacts maximums du panache, celles d'impacts plus modérés et les ratios de dépôts entre ces zones.

3 Détermination du terme source

Ce paragraphe décrit les hypothèses retenues concernant la reconstruction d'un terme source, il se décompose en 3 parties principales :

- La première relative à la construction du terme source incendie proprement dit, et plus particulièrement aux éléments relatifs à la production de fumées. Une première sous partie sera consacrée à des rappels théoriques permettant d'accéder aux principales caractéristiques de l'incendie et la seconde sous partie sera consacrée à l'application au cas de l'incendie de Notre-Dame.
- La deuxième partie est relative aux conditions d'émission du plomb dans ces fumées, en distinguant une revue des connaissances disponibles sur le comportement du plomb soumis à un incendie dans une première sous-partie, et les choix retenus pour l'incendie de Notre-Dame dans une seconde.
- Enfin, la troisième et dernière partie est consacrée aux différents « termes sources » ou scénarios qui pourraient être retenus pour faire la modélisation de la dispersion du panache et l'estimation des retombées. Cette partie a notamment pour but d'évaluer l'influence de l'incertitude liée à la connaissance de certains paramètres d'entrée sur les distances de dispersion.

3.1 Reconstruction du terme source incendie

Afin de modéliser le terme source, différentes caractéristiques de l'incendie devront être déterminées. Il s'agit tout d'abord de déterminer l'évolution de la puissance de l'incendie au cours du temps. La puissance et la cinétique de développement du feu ont en effet conditionné le comportement des tuiles de plomb et l'émission des particules qui en résultent. L'Ineris s'est appuyé, pour l'évaluation de la puissance, d'une part sur son expérience des incendies de grandes ampleurs et d'autre part sur les données de la littérature sur les caractéristiques de combustion du bois. La courbe de puissance ainsi déterminée est comparée aux images et vidéo disponibles, au travers notamment de la hauteur de flamme.

Sur la base de la courbe de puissance, au moyen des corrélations existantes pour la caractérisation des panaches de fumées, l'Ineris détermine le débit total d'émission de fumées, la température de ce panache et la vitesse ascensionnelle. Cette notion de vitesse ascensionnelle est un paramètre déterminant dans la mesure où cette grandeur gouverne le comportement du panache, pour les feux de grande ampleur, dans les premières centaines de mètres en aval du foyer.

3.1.1 Modélisation de l'incendie – partie théorique

La principale grandeur représentative d'un incendie est sa puissance, exprimée en MW. Avant de parler de cinétique, il convient de déterminer la puissance maximale que peut développer un tel incendie. Plusieurs approches sont pour cela disponibles dont certaines sont décrites dans [1]. Afin de confirmer ces valeurs mais également de justifier la pertinence des corrélations permettant de modéliser les conséquences de l'incendie, l'Ineris a choisi d'utiliser une méthode de calcul inverse, c'est-à-dire basé sur les observations disponibles (vidéos, photos).

Il existe dans la littérature, différentes corrélations permettant de décrire un incendie. La corrélation de Thomas [2] décrit ainsi la hauteur de flamme visible, h . Cette corrélation s'exprime par :

$$h = 42.D_{eq} \left(\frac{\dot{\omega}}{\rho_{air} \cdot \sqrt{g \cdot D_{eq}}} \right)^{0,61} \quad (1)$$

Où, D_{eq} est le diamètre équivalent,
 ω , la vitesse de combustion du bois,
 ρ_{air} , la masse volumique de l'air,
 g , la constante de gravité.

A partir des observations (hauteur de flammes et dimensions du feu), il est possible de calculer la vitesse de combustion du bois dans cette configuration. Cette vitesse de combustion permet ensuite de calculer la puissance en multipliant celle-ci par la surface en feu et la chaleur de combustion du bois, 17 MJ/kg.

A partir de cette puissance maximale, il est ensuite possible, en s'appuyant sur les éléments théoriques relatifs au développement des incendies, d'estimer l'évolution de cette puissance. Il convient de souligner que la phase de feu naissant, avant le début de la propagation réelle n'est pas modélisée car la quantité de fumées produite au cours de cette phase est faible.

Le développement d'un incendie peut, dans les premiers instants après la phase de feu naissant, être approché par une fonction du temps au carré [4]. Lorsque le développement de l'incendie continue avec une propagation de fumées chaudes dans un espace confiné telle la charpente de Notre-Dame, il peut être observé un phénomène d'embrasement généralisé, appelé *flashover*, conduisant à une augmentation significative de la cinétique de propagation. Des lois analytiques permettent d'approximer ce phénomène [4][5]. L'évolution de la puissance de l'incendie, P, s'exprime en conséquence par :

$$\text{Avant la phase de flashover : } P = \alpha \cdot t^2 \quad (2)$$

$$\text{Après la phase de flashover : } P = \alpha \cdot t^2 + \alpha_2 \cdot (t - t_{\text{ref}})^2 \quad (3)$$

Relations dans lesquelles α est une constante dépendante de la nature du combustible, ici 0,00018 pour ce type de bois (1 MW atteint en 75 s) et α_2 une constante dépendant de la configuration, ici prise égale à 0,008, en relation avec la cinétique observée de l'incendie. t_{ref} est, en lien avec les observations, pris égal à 300 s.

Connaissant la puissance de l'incendie, il est ensuite possible d'estimer les caractéristiques thermocinétiques du panache. La dispersion, tant de gaz que de particules, dépend en effet du mouvement ascensionnel créé par l'élévation des gaz chauds produits par l'incendie. La méthode employée consiste à déterminer les vitesses et températures du panache au-dessus du foyer. La corrélation généralement utilisée pour déterminer ces paramètres est la corrélation d'Heskestad [6]. Cette corrélation permet de déterminer la vitesse ascensionnelle des fumées, la température et le débit total de gaz, qui est la somme du débit de gaz produits par l'incendie et de l'air entraîné, en fonction de la hauteur au-dessus de l'incendie.

Pour la modélisation des phénomènes de dispersion atmosphérique, l'approche consiste à fixer la température à 250°C, température pour laquelle l'effet de l'écoulement atmosphérique n'est plus négligeable au regard du rapport de densité entre les fumées et l'air frais [7]. Sous cette hypothèse, il est alors possible de déterminer :

- la hauteur d'émission des fumées, h, correspondant à la hauteur à laquelle est atteinte la température seuil de 250°C :

$$h = 0,166 \cdot Q_c^{0,4} \quad (4)$$

- la vitesse ascensionnelle, v_h :

$$v_h = 0,5 \cdot 1,87 \cdot Q_c^{0,2} \quad (5)$$

- le débit total de fumées, Q_s :

$$Q_s = 3,24 \cdot Q_t \quad (6)$$

Dans ces équations, Q_t est la puissance totale de l'incendie et Q_c la puissance convective, égale à 2/3 de la puissance totale.

3.1.2 Application au cas de ND

Afin de bien comprendre les phénomènes d'émission relatifs à l'incendie, il est important de décrire les différentes phases de l'incendie :

- **Une phase de développement lent du feu qui fait suite à l'inflammation (0)**, cette montée en température au cours de cette phase est très limitée, cela correspond à l'échauffement et au début de pyrolyse des matériaux situés à proximité de la source d'inflammation.
- **Une phase de feu confiné (1)**, correspondant à la période de développement de l'incendie au sein de la charpente avant l'ouverture de la toiture qui se produit lors de la fonte des premières tuiles de plomb, estimée à environ 5 minutes.

- **Une phase de développement du feu (2)**, après ouverture de la toiture avec une ventilation du foyer assurée par les différentes ouvertures. Au cours de cette phase, les premiers éléments de charpente tombent. Sa durée est estimée à environ 30 minutes.
- **Une phase d'incendie pleinement développé (3)**, phase au cours de laquelle l'incendie s'est propagé à l'ensemble de la toiture et est au maximum de sa puissance. Au cours de cette phase, de nombreux éléments de charpente s'effondrent. Sa durée est estimée à plusieurs heures (de 19h à 22h) et il est supposé que la quasi-totalité des émissions en plomb dans le panache se soit produite pendant cette phase.
- **Une phase de fin de feu (4)**, correspondant à la diminution progressive de la puissance de l'incendie jusqu'à extinction sous l'action conjuguée des services de secours et de la diminution progressive des quantités de combustible dans les zones de plus forte intensité.

De l'analyse des éléments disponibles, l'Ineris a estimé la hauteur de flammes à 25 m en moyenne Figure 1.



Premières fumées



Propagation de l'incendie à la toiture

Figure 1. : Images de l'incendie à différents instants.

En appliquant la méthode décrite précédemment, c'est-à-dire en considérant dans l'équation (1) que la largeur de la cathédrale représente le diamètre équivalent, D_{eq} , la vitesse de combustion du bois, ω , peut alors être estimée à $80 \text{ g/m}^2/\text{s}$. Cette valeur est en cohérence avec les données expérimentales dont dispose l'Ineris pour la combustion d'un stockage de bois dans une configuration aérée [3]. Cette vitesse de combustion permet par la suite de calculer la puissance en multipliant celle-ci par la surface en feu, environ $1\,700 \text{ m}^2$ et la chaleur de combustion du bois, d'environ 17 MJ/kg . La valeur ainsi calculée pour le maximum de puissance est de l'ordre de $2\,300 \text{ MW}$. Cette valeur est en accord avec les évaluations réalisées par [1]. Il est également possible de souligner que cette puissance est cohérente avec l'essai Flumilog réalisé par l'Ineris[3], la puissance d'un incendie de stockage de bois de 12m de hauteur sur une surface de 800 m^2 avait été mesurée à environ $1\,200 \text{ MW}$.

La vitesse de combustion étant pertinente au regard des données expérimentales disponibles et la valeur calculée étant en bon accord avec celle estimée par d'autres méthodes, il est possible de confirmer la pertinence des corrélations algébriques pour cette application.

La courbe de puissance peut ensuite être comparée aux vidéos disponibles pour confirmer les grandes étapes et ainsi fournir une première estimation de l'évolution de la puissance du feu, telle que représentée sur la Figure 2.

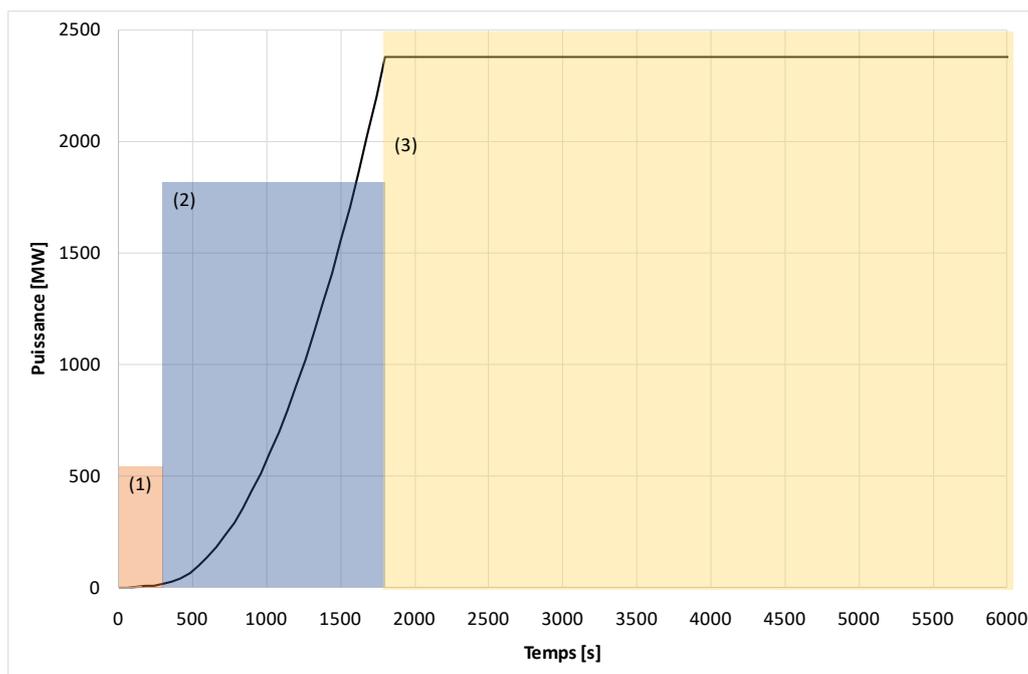


Figure 2. : Evolution de la puissance de l'incendie au cours du temps. (1): Phase pré-flashover, (2): Phase post-flashover – (3) : Incendie pleinement développé.

L'évolution de la puissance de l'incendie permet de définir toutes les valeurs caractéristiques du terme source « incendie » synthétisées dans le Tableau 1. Ces quantités ont été estimées pour différents instants afin de prendre en compte les émissions des différents constituants de la toiture.

Quantité	Valeurs calculées – 50% de la puissance nominale (phase de dvp de l'incendie)	Valeurs calculées – Incendie pleinement développé
Puissance totale, Q_t	1 150 MW	2 300 MW
Puissance convectée, Q_c	750 MW	1 500 MW
Hauteur d'émission, h	35 m, au-dessus du foyer	50 m, au-dessus du foyer
Débit total de fumée, Q_t	3 750 kg/s	7 500 kg/s
Vitesse ascensionnelle, V_h	14 m/s	16 m/s

Tableau 1 : Caractéristiques du terme source d'émission.

Ces grandeurs servent par la suite de données d'entrée au calcul de dispersion des fumées et des particules. Afin de vérifier si les calculs réalisés pour décrire la dynamique de l'incendie étaient conformes aux observations disponibles une simulation CFD (Computational Fluid Dynamics) de la dispersion immédiate du panache de fumées, hors particules de plomb, a été réalisée. Pour cette modélisation, le code FDS (Fire Dynamics Simulator) [8] a été utilisé. La direction de vent est fixée et le profil météo est basé sur un instant correspondant à la phase d'incendie pleinement développé.

Cette simulation a pour objectif d'évaluer la pertinence et la cohérence des données relatives au terme source sur la base d'une comparaison visuelle du panache calculée avec le panache observé (Figure 3). Cette comparaison, bien que simplement visuelle, montre la cohérence des données calculées en comparaison des caractéristiques supposées de l'incendie, qui peuvent donc être confirmées comme données d'entrée pour le calcul d'impact et retombées,



Figure 3. : Comparaison visuelle du panache observé et du panache calculé en proximité de l'incendie pour évaluer le terme source.

3.2 Détermination de la fraction de plomb dans le terme source

Sur la base des données de la littérature et d'essais réalisés par le passé à l'Ineris, une estimation des quantités et des caractéristiques des particules de plomb émises par l'incendie a été réalisée. Il convient à ce titre de rappeler que cette partie comporte une incertitude importante au regard de la situation spécifique de l'incendie de Notre Dame. En particulier, l'Ineris n'a pas eu accès à l'inventaire du plomb récupéré, information qui nous aurait permis de préciser certaines hypothèses faites dans ce paragraphe.

Cependant, afin d'affiner autant que possible l'estimation des quantités de plomb potentiellement émises, l'Ineris a pris contact avec l'architecte en chef, responsable de la restauration de la cathédrale. Les éléments d'information ainsi recueillis ne nous ont cependant pas permis d'améliorer significativement l'approximation des quantités émises décrite dans les paragraphes suivants.

3.2.1 Détermination du comportement du plomb en cas d'incendie – partie théorique

La dispersion de particules dépend de deux caractéristiques principales, le diamètre et la masse. Afin d'évaluer ces deux paramètres, une analyse physique a été réalisée.

3.2.1.1 Caractéristiques physiques du plomb

Concernant les émissions de particules de plomb, il convient tout d'abord de rappeler les seuils de température critiques du plomb :

- la température de fusion du plomb, 327°C ;
- la température de formation des oxydes de plomb, autour de 600°C ;
- la température d'ébullition du plomb de 1749°C.

Ce différentiel de température permet de souligner la séquence des phénomènes lors d'un incendie tel que celui de Notre-Dame. Le plomb est chauffé, tout d'abord par le dessous, avant l'ouverture de la toiture, puis par-dessus principalement après l'ouverture et le développement des flammes au-dessus de la toiture. Il atteint dans un premier temps la température de 327°C, il fond, et il tombe par gravité sur la voute. Le rayonnement des flammes continue d'échauffer le plomb qui atteint la température de formation des oxydes. Une partie du plomb présent sur la voute forme donc des oxydes de plomb. Il convient de souligner à ce stade qu'il existe différentes formes d'oxydes de plomb (PbO, Pb₃O₄, ...), disposant d'une couleur spécifique (voir Tableau 2). La température peut ensuite encore augmenter mais sans jamais atteindre la température d'ébullition du plomb (1749°C), cette température étant très supérieure à celles couramment observée dans un incendie de composés du bois (entre 700 et 1000°C).

Concernant les oxydes de Plomb, ils présentent les caractéristiques suivantes :

Type di-oxyde	Couleur	Masse volumique	Evolution en température
PbO	Rouge ou jaune	9 500 kg/m ³	Fusion à 888°C et ébullition à 1 470°C
Pb ₃ O ₄	Rouge	9 100 kg/m ³	Fusion et décomposition à 500°C en PbO
PbO ₂	Noir	9 380 kg/m ³	Fusion et décomposition à 290°C en Pb ₃ O ₄ puis PbO

Tableau 2 : Caractéristiques physiques des oxydes de plomb.

3.2.1.2 Comportement du plomb soumis à un flux thermique

Afin de comprendre les mécanismes et identifier, autant que faire se peut, la nature des oxydes formés, une expérimentation a été réalisée à l'échelle du laboratoire. En s'appuyant sur la succession des événements décrits précédemment, il ressort que le mécanisme de formation des oxydes de plomb est principalement lié à la chauffe du plomb par le rayonnement des flammes. Pour reproduire ce mécanisme, l'Ineris a utilisé un calorimètre FPA (Fire Propagation Apparatus) tel que décrit dans la norme ISO 12136 [1]. Cette installation permet de chauffer, au moyen de panneaux radiants, un échantillon placé au centre d'un flux d'air contrôlé. Le flux thermique incident peut être réglé entre 0 et 50 kW/m². Au regard des caractéristiques de l'incendie de Notre Dame, le plomb a été soumis à un flux de 50 kW/m², flux incident jugé représentatif d'un incendie de grande ampleur. Cet essai a permis de mettre en évidence :

- une coloration jaune de l'échantillon ;
- une augmentation de la masse de l'échantillon au cours du temps ;
- une température d'équilibre d'environ 620°C.

3.2.2 Application au cas de ND

La coloration de l'échantillon observée lors de l'essai au FPA met en évidence la formation majoritaire de monoxyde de plomb, de formule PbO. Cependant, lors de l'essai, un flux d'air circule autour de l'échantillon, apportant l'oxygène. Dans la situation d'un feu réel, la quantité d'oxygène à cœur du foyer est réduite, et la formation d'oxyde de niveau supérieur paraît en conséquence d'autant moins probable. Ce premier résultat permet de fixer la masse volumique des particules produites.

Pour bien comprendre la prise de masse de l'échantillon, lors de ce même essai au FPA, il convient de distinguer deux phénomènes :

- la transformation du plomb, sous forme Pb, en oxyde de plomb, sous forme PbO, qui induit le piégeage d'atomes d'oxygène dans la phase solide et donc à une augmentation de la masse ;
- l'émission de particules d'oxyde de plomb qui conduit à une perte de masse.

Il faut rappeler que la température d'ébullition du plomb est de plus de 1700°C, aucune évaporation n'est donc prise en considération. De même pour les oxydes, les températures d'ébullition sont très élevées et les émissions se font donc sous forme de particules.

Ainsi, cette prise de masse s'explique au travers de ces températures. La perte de masse d'un échantillon de produit volatile, et la mise en suspension résultante, provient de l'évaporation ou de la pyrolyse des produits suivis d'une phase de condensation lorsque la température baisse. Dans le cas du plomb, le mécanisme est différent puisque les températures dans les flammes restent inférieures aux températures d'évaporation des produits. Ainsi, le comportement supposé du plomb lors de l'incendie est le suivant :

- fusion des plaques de plomb avec formation d'une nappe liquide à la surface de la voute ;
- oxydation sous l'effet de l'augmentation de température et de la présence d'air ;
- mise en suspension des particules d'oxyde de plomb, notamment par la chute de morceaux de charpente.

A noter que si, lors de la chute de morceaux de charpente, des gouttes de plomb, Pb, liquide étaient mises en suspension, elles seraient immédiatement oxydées en PbO au regard des conditions de température.

Comme mentionné dans la description précédente des mécanismes d'incendie (paragraphe 3.1.2), lors de la phase de développement et plus encore lors de la phase d'incendie développé, de nombreux éléments de charpente sont tombés sur la voute où se situe le plomb fondu, la chute de la flèche étant une manifestation particulièrement visible du phénomène. Lors de ces phénomènes d'effondrement, une partie de l'oxyde de plomb, sous forme particulière, est mise en suspension et, par suite, entraînée par le courant ascensionnel de l'incendie.

La complexité de ces mécanismes de mise en suspension explique pourquoi il est particulièrement délicat, **voire impossible**, d'estimer avec précision la quantité de particules mises en suspension et entraînées dans le panache. **Peu d'éléments sont disponibles dans la littérature scientifique, et l'Ineris a dû définir un facteur d'émission de l'oxyde de plomb théorique, indispensable pour réaliser les calculs mais ne se rapportant pas à la réalité physique des phénomènes.** Il s'est appuyé sur des résultats d'essais ayant mis en jeu des mélanges de plomb, partiellement oxydé avant l'incendie et de plastique. Il convient de souligner que ces essais ont été réalisés dans des conditions différentes de l'incendie de Notre Dame, toutefois, au regard de l'absence de données publiées dans la littérature, ces éléments ont servi de point de référence. Cette campagne d'essais n'avait pas fait l'objet de publication de la part de l'INERIS. Le taux d'émission mesuré dans ces conditions, configuration dans laquelle, les particules sont également mises en suspension par les mouvements de solides, est de 0,3 g de particules émises par kg de plomb présent initialement (soit un ratio de 3 pour 10 000).

Appliqué au cas de l'incendie Notre-Dame ce facteur d'émission théorique permet d'aboutir aux estimations suivantes :

- Pour la toiture de Notre-Dame qui contenait 210 t de plomb (source : Notre Dame de Paris), l'application du facteur d'émission conduit à une émission d'une masse totale de plomb de 63 kg dans le panache,
- Pour la flèche qui contenait 250 t (source : Notre Dame de Paris), l'application du facteur d'émission conduit à une émission d'une masse totale de 75 kg de plomb dans le panache.

Bien évidemment, il s'agit ici d'une estimation comportant une incertitude importante, les conditions de mises en suspension variant d'un incendie à l'autre en fonction de la nature des effondrements. Il a également été supposé que la masse totale de plomb émise ait été répartie pendant la durée de la phase d'incendie pleinement développée.

Enfin, la température de 620°C correspond à la température à laquelle l'énergie rayonnée par la surface du plomb est égale à l'énergie absorbée issue du flux radiatif. Ce résultat met en évidence l'absence de formation de plomb ou d'oxydes de plomb sous forme gazeuse lors de l'incendie.

3.2.2.1 *Granulométrie des particules de plomb*

Plus encore que la masse volumique, le diamètre des particules gouverne leur trajectoire après émission à l'atmosphère. Les particules d'oxydes de plomb transportées par le panache de l'incendie vont se déposer dans la zone d'étude en fonction de leur granulométrie, les particules les plus grosses retombant plus vite (et donc plus près) que les particules plus fines. Les hypothèses réalisées sur le profil granulométrique des particules de plomb constituent donc un paramètre déterminant pour les simulations. Cependant, il n'existe dans la littérature que très peu d'études relatives à la mesure de la granulométrie de particules de plomb émises lors d'un incendie,

La principale étude trouvée sur le sujet indique des diamètres de particules pour différentes configurations d'émissions possibles du plomb. En particulier, cette étude fournit des tailles de particules pour des prélèvements réalisés au niveau de plomb en fusion. Bien qu'éloigné de la configuration de l'incendie de Notre Dame, cela permet de disposer d'un repère pour la détermination du diamètre des particules émises. Il ressort de cette étude que les diamètres de particules sont, de manière générale, compris entre 1 et 30 μm , les proportions des différentes classes granulométriques de particules variant fortement d'une application à l'autre.

De façon à traduire au mieux l'influence des hypothèses sur la granulométrie, une étude de sensibilité basée sur différents scénarios (ou hypothèses) de distribution granulométrique des particules a été menée. Ces différents profils granulométriques considèrent des particules avec des diamètres compris en 1 et 50 μm . Par expérience, un diamètre de 50 μm a été également considéré car des recombinaisons peuvent se produire lors de la traversée de la flamme par les particules. Le choix de simuler plusieurs scénarios permet de disposer d'une étude de sensibilité des résultats aux hypothèses sur la granulométrie, mais il est bien évident que les résultats obtenus doivent être considérés avec prudence du fait de cette forte incertitude sur la granulométrie.

Afin d'appréhender l'importance de cette hypothèse, il est possible d'évaluer la vitesse limite de chute en fonction du diamètre des particules. Cette quantité correspond à la vitesse maximale atteinte par une particule en chute libre dans l'air, calculée comme l'équilibre entre la force de trainée et la force de gravité. La vitesse de chute, U_p , est ainsi calculée par la relation :

$$U_p = \frac{2 \cdot m_p \cdot 9,81}{\pi \cdot r^2 \cdot C_d \cdot \rho_f}$$

Dans cette relation, m_p , est la masse de la particule, r , son rayon, ρ_f , la densité de l'air, et C_d le coefficient de trainée des particules, évalué par l'équation :

$$\text{Si } Re_p \ll 1 : C_d = \frac{24}{Re_p}$$

$$\text{Sinon : } C_d = \left(\frac{24}{Re_p}\right) (1 + 0,15 Re_p^{0,687})$$

Où Re_p est le Reynolds particulaire :

$$Re_p = \frac{\rho_f \cdot U_r \cdot d}{\mu_f}$$

Dans cette relation, U_r est la vitesse relative de la particule par rapport à l'air, prise égale à la vitesse du vent, d , le diamètre de la particule et μ_f la viscosité de l'air.

Les vitesses de chute calculées sont comparées à la vitesse d'émission calculée précédemment soit 16 m/s en calculant le rapport entre vitesse de chute libre et vitesse d'émission (les deux vitesses étant opposées). Plus ce rapport est faible, plus la particule sera en mesure d'être transportée dans le panache.

Diamètre [μm]	Re_p [-]	C_d [-]	Vitesse de chute [m/s]	Fraction vitesse de chute/vitesse d'émission (%)
1,5	2,6E-01	9,24E+01	0,017	0,11
15	2,60E+00	1,19E+01	0,133	0,83
30	5,19E+00	6,77E+00	0,468	2,92
50	8,65E+00	4,61E+00	1,15	7,2

Les fractions estimées montrent que toutes les particules de diamètre compris entre 1,5 et 50 μm peuvent être entraînées dans le panache et d'autant plus facilement qu'elles sont petites. Toutefois, les particules les plus grosses sont elles aussi entraînées par le panache, au moins dans le champ proche, au-dessus du feu où la vitesse ascensionnelle est la plus importante.

3.3 Choix des termes sources retenus pour l'étude

Le terme source reconstruit est ainsi composé de particules d'oxydes de plomb réparties suivant leur taille, leur composition et leur densité. Les effluents gazeux sont également pris en compte pour représenter l'effet d'entraînement lié à la dynamique de l'incendie.

Au regard des incertitudes sur les mécanismes de mise en suspension des particules de plomb, plusieurs termes sources ont été modélisés.

- Le premier correspond à une émission de plomb pendant la phase pleinement développée l'incendie, soit entre 19h et 22h. Les particules sont supposées émises à 50 m au-dessus de la voute, hauteur d'émission des fumées, soit la hauteur à laquelle celle-ci atteint 250°C. Le débit total de gaz émis à cette altitude est de 7 500 kg/s avec une surface équivalente de 650 m². Durant cette phase, la partie du plomb provenant du toit a été répartie sur les 3 heures: 1/6 du plomb a été émis pendant la première heure, la moitié pendant la seconde et le tiers pendant la dernière heure.
- Le second correspond à l'émission correspondant à la contribution de la flèche. La hauteur d'émission est alors de 37 m et le débit de gaz émis est de 3 750 kg/s. La surface d'émission

équivalente est estimée à 396 m². La totalité du plomb émis par la flèche est supposée émise pendant cette phase en une heure de 19H à 20H

Pour chacun des termes sources, les trois distributions granulométriques présentées Figure 4 ont été prises en compte.

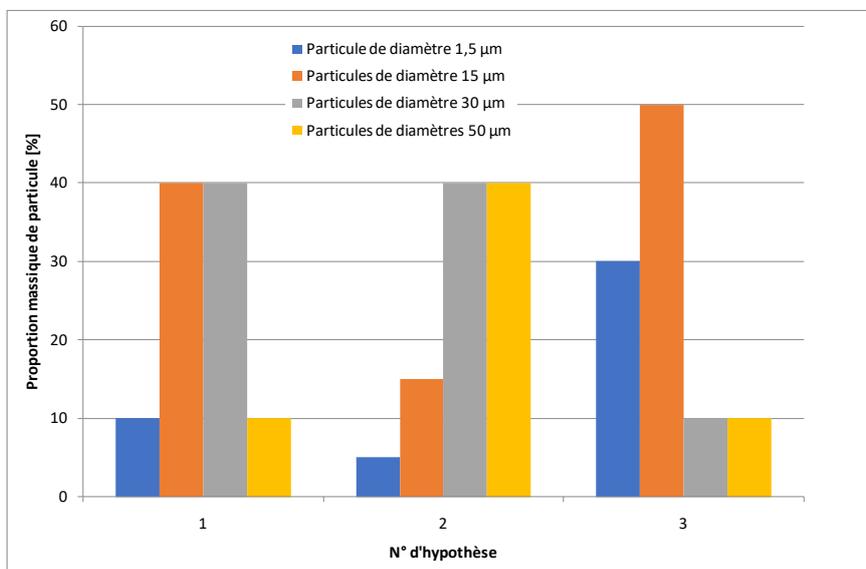


Figure 4. Distribution granulométriques modélisées.

La distribution (1) correspond à une distribution gaussienne de la masse répartie sur des particules de diamètres compris entre 1,5 et 50 µm. Les distributions (2) et (3) sont respectivement des distributions « test » afin de voir l'influence de cette distribution en privilégiant respectivement les grosses particules puis les plus petites particules.

4 Modélisation de la dispersion du panache et de ses retombées sur le domaine d'intérêt

4.1 Modèle de dispersion utilisé

Le modèle doit être adapté au contexte et à la finalité de l'étude. La cathédrale Notre-Dame se situe au cœur de Paris sur l'île de la cité, une zone de centre urbain bordée par la Seine. Le modèle doit donc être capable de prendre en compte l'occupation des sols décrivant ces spécificités. L'outil utilisé doit également pouvoir intégrer une source d'émission dynamique et thermique en considérant une variation temporelle des substances émises compatibles avec celles d'un incendie. Il doit de plus être capable de prendre en compte un champ météorologique hétérogène sur le domaine d'intérêt, celui étant d'assez grandes dimensions. Enfin, en tenant compte de l'ensemble de ces paramètres, il doit permettre de simuler la dispersion tridimensionnelle du panache et les retombées des particules, de façon suffisamment fine pour disposer d'une estimation des zones géographiques où l'impact est maximal.

Le modèle sélectionné par l'Ineris pour cette étude de dispersion est le modèle Micro-Swift-Spray (MSS) développé et commercialisé par la société Aria Technologies. MSS est un modèle de type lagrangien (ou modèle à particules). Le déplacement lié à l'advection de ces particules est calculé grâce à la connaissance des champs de vents atmosphériques, leur déplacement diffusif étant une fonction statistique liée à la turbulence du milieu. Le modèle lagrangien détermine les concentrations de polluants en compilant l'ensemble des trajectoires d'un grand nombre de particules du panache.

MSS permet de modéliser le transport, la dispersion et le dépôt des polluants émis par des sources de nature différente sur un terrain complexe, en présence d'obstacles pris en compte de manière explicite ou par un paramètre de rugosité. Les variables de turbulence peuvent être définies en entrée du modèle, ou éventuellement déterminées en utilisant un modèle intégré (préprocesseur Micro Swift) basé sur la couche de surface et les profils de la couche-limite. Ces profils sont générés à partir des entrées météorologiques standards au niveau du sol et de la nature de ces sols par le préprocesseur Micro Swift qui permet la reconstruction d'un champ de vent moyen vérifiant la loi de conservation de la masse, lui-même diagnostiqué à l'aide de corrections analytiques induites par la présence d'obstacles (bâtiments).

MSS est composé de deux modèles : Micro-Swift et Micro-Spray.

- *Micro-Swift* assure l'interpolation tridimensionnelle sur une grille fine de données météorologiques clés (vents, température) à partir de mesures in situ et/ou de sorties de modèles météorologiques moyennes ou grande échelle, dans le respect des équations de la physique. A noter qu'il prend en compte la topographie, l'occupation des sols, l'influence de la stabilité (effet de la stratification thermique sur l'écoulement) ainsi que les bâtiments.
- *Micro-Spray* est un modèle de type Lagrangien. Le principe de base est la discrétisation du panache en particules virtuelles. Ce type de modèle simule la dynamique d'un très grand nombre de particules virtuelles dans un champ météorologique 3D non-stationnaire. La trajectoire des particules est calculée à partir des champs de vents 3D fournis par Micro-Swift et les mouvements turbulents des particules sont représentés par une composante stochastique (aléatoire). Le modèle prend en compte les cisaillements du vent, les rebonds contre les obstacles et la topographie ainsi que le dépôt sec et humide (lessivage). Le calcul des concentrations et des dépôts de polluants s'effectue par un comptage des particules sur un maillage fine échelle.

4.2 Caractéristiques du domaine de modélisation

La taille du domaine de modélisation a été définie selon le meilleur compromis entre la résolution du calcul (et donc les temps de calcul) et la distance parcourue par la plus grosse partie des particules contenues dans le panache.

Des tests préliminaires avec des conditions météorologiques simplifiées mais représentatives de celles observées pendant l'incendie ont **montré qu'un domaine de 50km d'Est en Ouest et de 26 km du Nord au Sud** était nécessaire pour circonscrire l'impact potentiel des retombées en plomb de l'incendie.

Le relief pris en compte dans le modèle (Figure 5) est issu des données de la BD ALTI® de l'Institut national de l'information géographique et forestière (IGN) avec une résolution horizontale de 25 mètres.

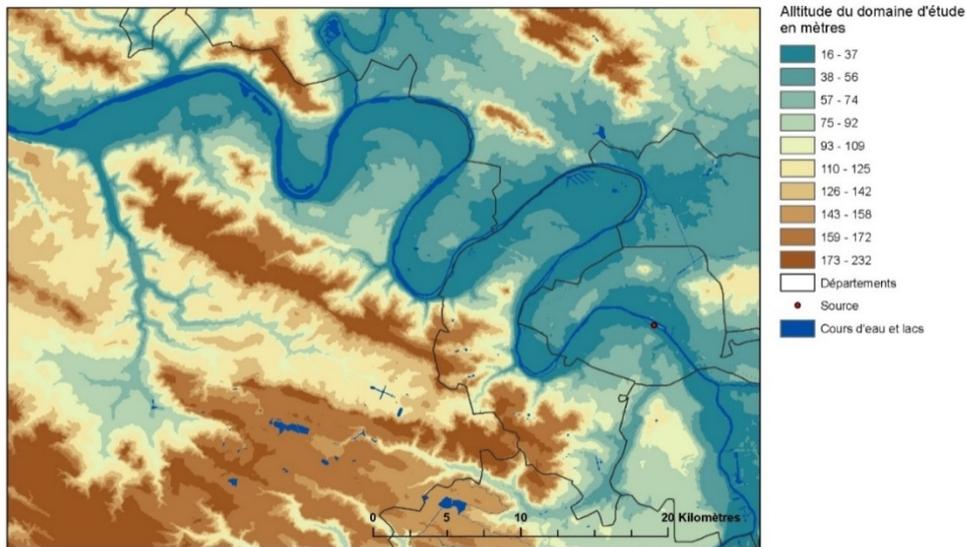


Figure 5. Altitude, limite des départements, rivières et lacs du domaine d'étude

La description de l'usage des sols résulte d'une combinaison des données de la base européenne Corine Land Cover avec les données à haute résolution fournies par la mairie de Paris (Figure 6).

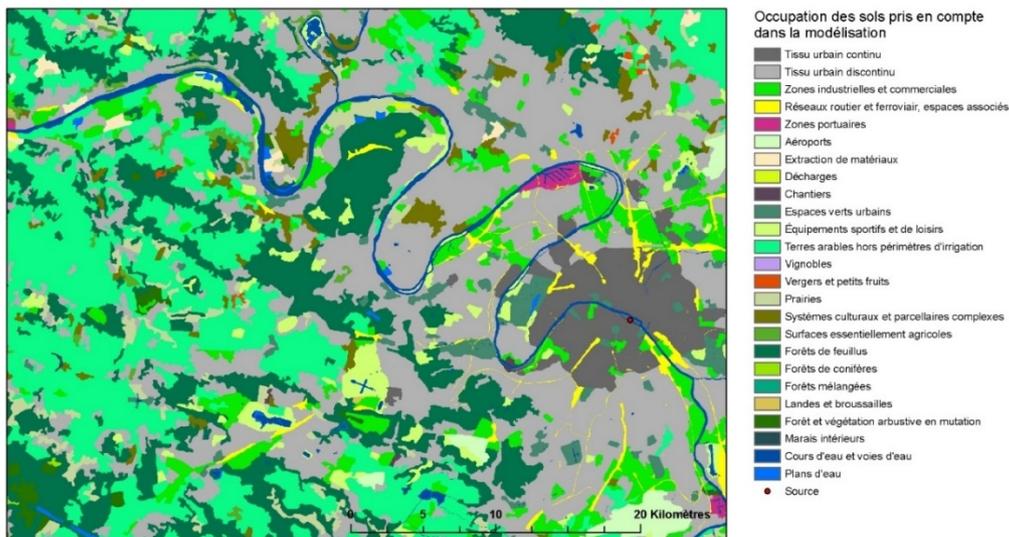


Figure 6. Description de l'occupation des sols sur le domaine d'étude

Enfin, la résolution spatiale des modélisations est choisie comme le meilleur compromis entre incertitudes liées aux émissions, caractéristiques du domaine géographique et temps de calcul. Une résolution spatiale du modèle de 100m a été choisie.

4.3 Reconstruction météorologique de l'écoulement atmosphérique

Des champs météorologiques grande échelle fournis par Météo France et issus des sorties du modèle AROME ont été considérés pour réaliser les calculs. Ce sont des analyses météorologiques qui combinent résultats du modèle et observations *in situ*. Ces champs météorologiques sont utilisés en condition aux limites par le modèle *Micro Swift* qui intègre un traitement des variables météorologiques en réalisant une descente d'échelle et une reconstruction à haute résolution de l'écoulement atmosphérique sur le domaine d'intérêt avec une prise en compte fine du relief et de l'usage des sols.

4.4 Analyse de l'écoulement atmosphérique au moment de l'incendie

Le 15 avril 2019 à 19H, l'écoulement atmosphérique mesuré par les stations météo France présente un état de stratification neutre à légèrement instable avec des vitesses de vents moyens mesurés à 10 m de hauteur de 4.9 m/s à la station météo France de Paris Montsouris (située à 75 m d'altitude) et de 3.5 m/s à la station Météo France de Longchamp (située à 27 m d'altitude). Le vent est de secteur est-sud-est avec des variations locales (provenance du vent mesurée à 19H de 110° à la tour Eiffel, 140° à la station de Montsouris et 120° à la station de Longchamp).

Les analyses AROME (données modélisées et corrigées par les observations) pour les 3 heures suivant le début de l'incendie (période recouvrant les émissions de plomb les plus importantes), montrent que les conditions météorologiques varient peu. La direction du vent est stable avec de faibles oscillations entre 90° et 110° les deux premières heures puis devient plus instable la troisième heure avec des variations locales plus importantes entre 70° et 110°. La hauteur de couche limite varie entre 1 200 m et 1 300 m à 19h puis baisse à 1 000 m vers 20h, puis 400 m vers 21h et 350 m à 22h.

Ces conditions météorologiques sont donc représentatives de conditions plutôt dispersives qui ont évité la stagnation du panache de l'incendie au-dessus des zones urbaines.

5 Résultats

5.1 Simulations réalisées

Pour mémoire, les trois scénarios d'émissions modélisés correspondent à trois profils granulométriques (Figure 4) qui permettent d'appréhender la sensibilité des résultats (dépôts d'oxydes de plomb au sol) à ce paramètre. Ils sont numérotés S1, S2, S3 dans la suite. Pour rappel, S1 correspond à un scénario supposant une majorité de particules de taille « moyenne » (de 15 à 30 μm), S2 suppose une majorité de plus grosses particules (30-50 μm) alors que S3 suppose une majorité de plus fines particules (1,5-15 μm).

Deux types de cartographies sont proposées : sur l'ensemble du domaine de calcul d'une part et un zoom sur les zones de plus fort impact d'autre part. Nous rappelons qu'elles ne concernent que l'impact des particules en plomb contenu dans le panache issu de l'incendie et que **les retombées à proximité immédiate de la source imputables aux phénomènes d'effondrement ne sont pas modélisées. Ceci explique l'absence de représentation de traces de plomb au niveau des environs proches (de l'ordre du premier kilomètre) de Notre-Dame dans les illustrations proposées, bien que les retombées soient plus importantes dans cette zone.** Pour faciliter la lecture des cartes et éviter toute confusion, nous avons indiqué par un cercle hachuré sur la carte, la zone où les retombées ne sont pas simulées.

Les figures suivantes proposent des cartographies des dépôts cumulés d'oxydes de plomb au sol sur l'ensemble de la période de l'épisode modélisée.

Comme évoqué au début de ce rapport, compte tenu des incertitudes liées aux hypothèses de construction du terme source, les valeurs calculées au niveau du sol ne peuvent pas être exploitées d'un point de vue quantitatif. **Le parti a donc été pris de cartographier la répartition relative des niveaux de plomb déposé. L'échelle fournie représente donc des pourcentages de la valeur de dépôt maximale simulée qui a été constatée pour le scénario 2 (majorité de grosses particules). Le dépôt maximum modélisé correspond à la valeur 100 et les cartographies montrent donc la décroissance relative des dépôts par rapport à cette valeur maximale.**

De ce fait, les comparaisons entre différents scénarios sont possibles et la distribution géographique des dépôts ainsi que les rapports entre quantités déposées dans ces différentes zones sont représentés de manière robuste. Les zones géographiques où les dépôts imputables au panache sont maximaux (en dehors de la zone aux alentours de la cathédrale soumise aux impacts locaux du sinistre) peuvent être également clairement identifiées.

La Figure 7 présente pour chacun des scénarios la cartographie des dépôts en plomb. Dans tous les cas, le même comportement du panache est observé.

La hauteur moyenne du panache s'établit au plus haut entre 150 m et 450 m en fonction des différents composés qui le constituent : les composés gazeux et particules fines se situent dans la partie haute du panache alors que les particules plus grosses vont rapidement occuper la partie basse du panache. A distance de la source, les panaches se dissocient, les particules les plus grosses sédimentant plus rapidement.

Entre 19h et 22h locale, le panache est donc transporté dans la direction ouest-nord-ouest. Au niveau de l'agglomération parisienne il passe ainsi au-dessus des arrondissements suivants : **pointe nord du VI^{ème}, VII^{ème}, Nord du XV^{ème}, XVI^{ème}**. S'agissant de l'impact du panache de l'incendie, Ces arrondissements constituent la zone de plus fortes retombées quel que soit le scénario considéré, avec un gradient décroissant du centre vers la périphérie de la ville étant admis que la zone aux alentours de la cathédrale soumise aux impacts locaux du sinistre, non modélisée, restait la zone de dépôts maximaux. A la sortie de Paris, le panache de l'incendie subit les effets du relief liés à la vallée de la Seine. Les retombées s'étendent jusqu'à Mantes-la-Jolie à près d'une cinquantaine de kilomètres de la source.

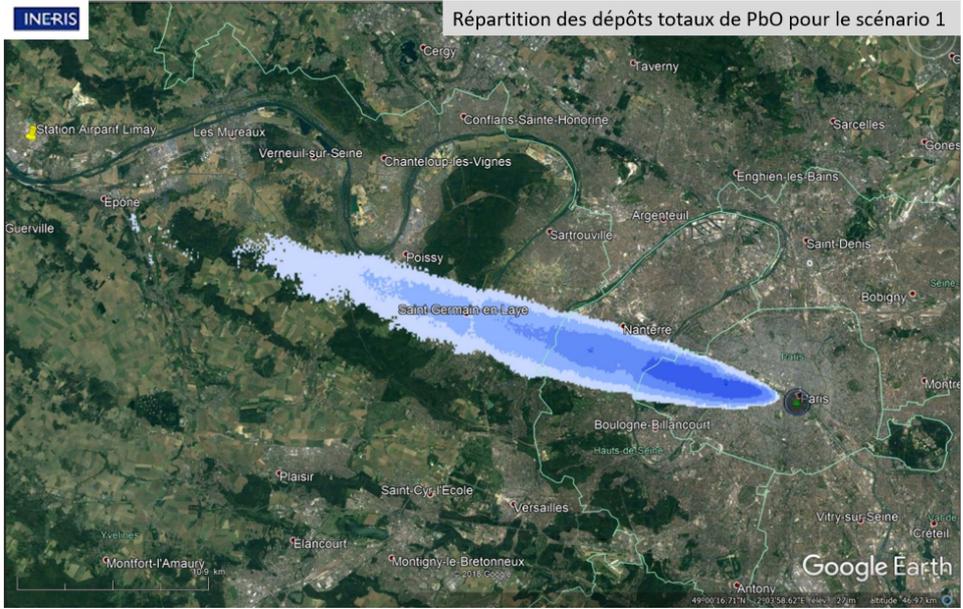


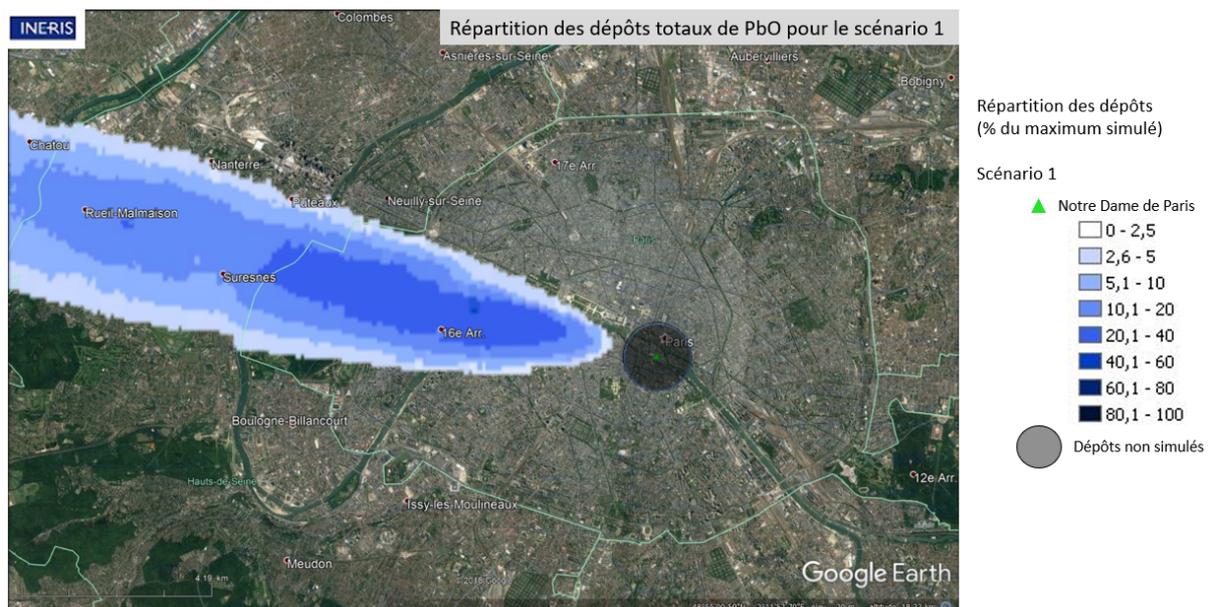


Figure 7. Représentation de la répartition relative des dépôts cumulés de monoxyde de plomb issus du panache de l'incendie, selon les trois profils granulométriques S1, S2, S3.

L'analyse des résultats relatifs aux trois scénarios permet d'appréhender l'influence des hypothèses sur la granulométrie, tant sur les niveaux de concentrations et de dépôts que sur l'étendue du panache.

Les particules les plus grosses (30µm et 50 µm de diamètre) soumises à une vitesse de sédimentation plus importante impactent plutôt les arrondissements parisiens sous le vent de la source. Bien que la composition estimée du panache inclue une part minoritaire de ces particules, les dépôts modélisés au point d'impact maximum sont significativement plus importants que ceux modélisés pour les autres tailles de particules. Il est donc attendu que le scénario 2, privilégiant une part plus importante de grosses particules dans le panache, montre des dépôts plus importants, notamment dans Paris. En revanche, selon ce scénario l'étendue du panache est moindre.

Celle-ci est plus importante pour les scénarios 1 et 3 qui intègrent une plus forte proportion de petites particules qui sont transportées sur de plus longues distances.



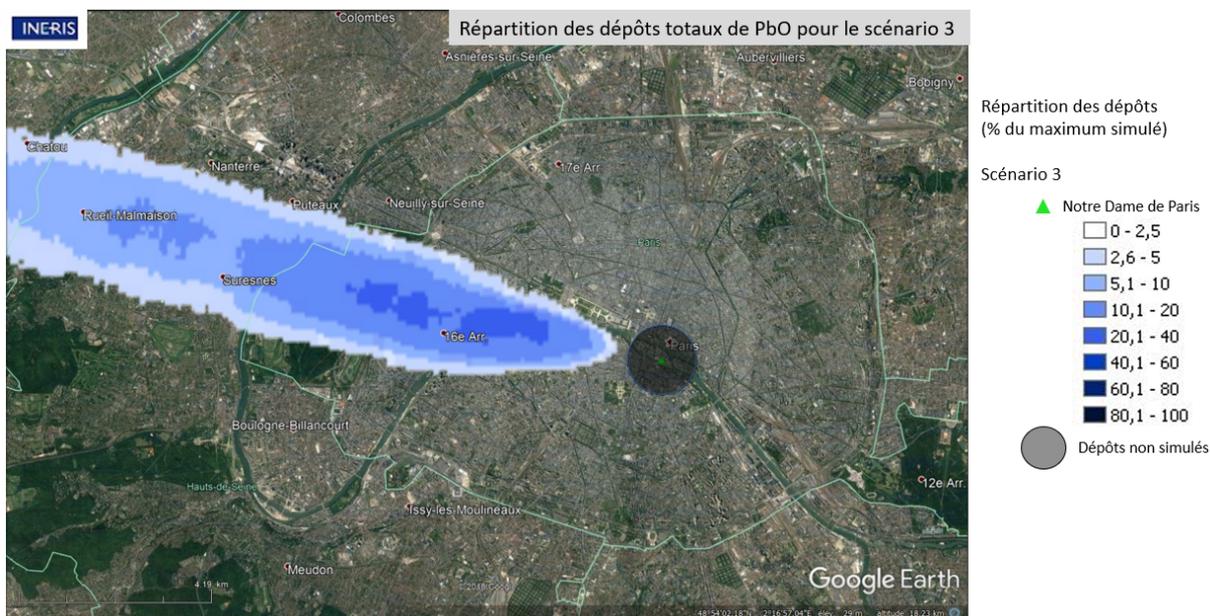
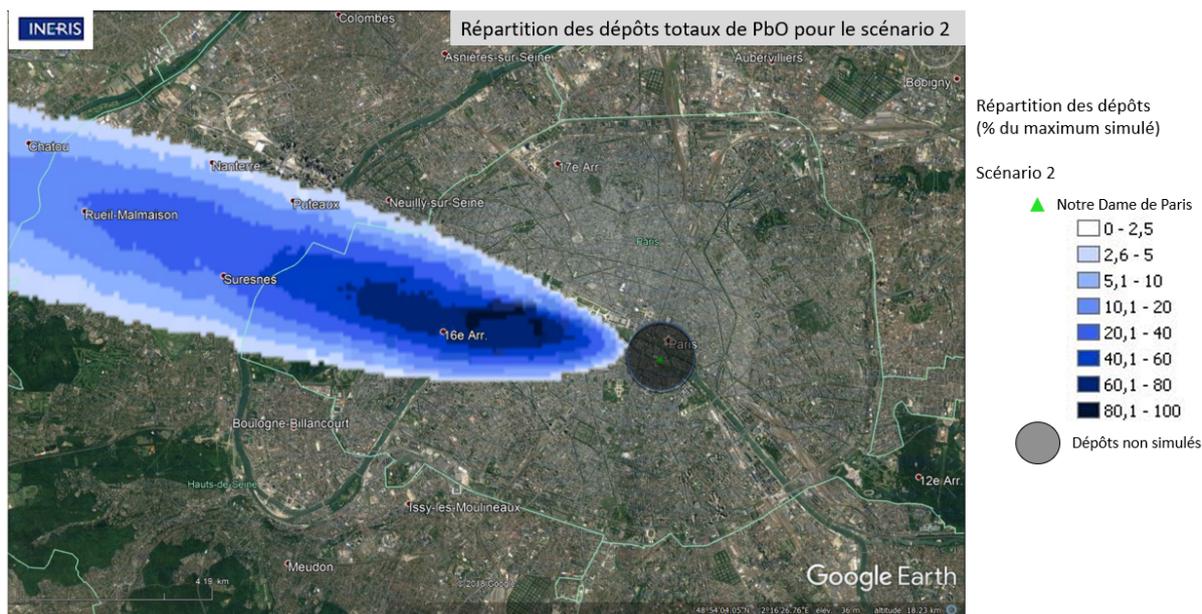


Figure 8. Représentations zoomées de la répartition relative des dépôts cumulés de monoxyde de plomb issus du panache de l'incendie, selon les trois profils granulométriques S1, S2, S3.

La Figure 8 propose un zoom du panache des dépôts pour chacun des scénarios étudiés et permet d'illustrer de manière plus précise leur répartition géographique sous le vent, **tout en rappelant que les dépôts aux abords de la cathédrale (jusqu'à 800 m), plus importants que ceux du panache, ne sont pas modélisés.** Des impacts jusqu'à 40% de la valeur maximale de monoxyde de plomb déposés par le panache atmosphérique sont attendus jusqu'à Rueil-Malmaison à une dizaine de kilomètres de la source. La variation des retombées en fonction de la granulométrie est mise en évidence par ces représentations. Ainsi les retombées en un point donné de l'empreinte du panache sont les plus importantes pour le scénario S2 qui simule une majorité de grosses particules qui se déposent plus facilement, et les plus faibles pour le scénario S3 qui simule une majorité de plus petites particules. La différence dans Paris entre les deux scénarios est de l'ordre d'un facteur 3. La zone d'impact le plus élevé s'étend dans tous les cas dans le 7^{ème} arrondissement jusqu'à la Seine, mais des dépôts peuvent également se trouver au-delà du fleuve dans le 16^{ème} arrondissement.

5.2 Eléments de vérification

La station de mesure d'AIRPARIF située à Limay a détecté un signal sur les concentrations atmosphériques en plomb pour la semaine du 15 au 22 avril 2019. Les niveaux à cette station de surveillance sont d'ordinaire très bas alors que des concentrations de l'ordre de $0,108 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ont été mesurées à cette station pendant la semaine de l'incendie. Par comparaison AIRPARIF précise que les concentrations atmosphériques en plomb pendant la même semaine à la station de Paris, 18^{ème} arrondissement étaient de l'ordre de $0,003 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Ces niveaux sont très largement inférieurs aux seuils de la valeurs limite et objectif de qualité définis dans la réglementation européenne (directive 2008/50/EC) qui sont respectivement de 0.5 et $0.25 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en moyenne annuelle.

Bien que les concentrations atmosphériques simulées par MSS ne soient que de peu d'intérêt dans le contexte de l'étude qui cible les dépôts, l'étude a permis de vérifier que le panache avait bien impacté la commune de Limay, expliquant ainsi le signal anormal mesuré par la station d'Airparif.

6 Conclusion

Afin de produire des éléments d'appréciation relatifs à la répartition spatiale des possibles dépôts de plomb induits par le panache de l'incendie de la cathédrale Notre Dame à Paris, le 15 avril 2019, l'Ineris a mené une étude de modélisation visant à simuler la dispersion atmosphérique de ce panache de fumées. Cette étude cible **uniquement** les émissions de monoxyde de plomb sous forme particulaire, formé sous les effets thermiques de l'incendie puis mis en suspension et entraîné dans le panache.

La modélisation de la dispersion et des retombées du panache est faite en deux étapes :

1. **Le calcul d'un terme source** qui consiste à estimer les caractéristiques de l'incendie en fonction notamment de la nature du combustible, de sa quantité et de sa répartition dans le volume concerné. Ces caractéristiques, puissance dégagée, production de fumées, température et composition permettent de définir les conditions d'émission des particules de plomb. Une estimation de la quantité de plomb rejetée ainsi que la granulométrie des particules permettent de compléter la caractérisation du terme source. A noter que d'après l'analyse de l'Ineris, le plomb est essentiellement transporté dans le panache sous la forme de monoxyde de plomb.
2. La **modélisation de la dispersion** du panache et des dépôts de plomb émis à l'atmosphère selon les caractéristiques du terme source, et les conditions météorologiques observées ou simulées pendant la durée de l'incendie. Le modèle prend en compte ainsi l'état de l'écoulement atmosphérique, également influencé par la nature des sols et du relief.

Il est important de noter que l'étude n'intègre pas les émissions et retombées de plomb à proximité immédiate du site de la cathédrale et du foyer de l'incendie (dans un rayon de l'ordre d'un kilomètre) provoquées par les nombreux effondrements de structures (gros morceaux de charpente, éléments métalliques, pierres de voute...). Ces effondrements sont susceptibles d'avoir engendré de fortes émissions de plomb au niveau du sol, de même que les foyers d'incendie locaux ou secondaires, et la forte turbulence de l'écoulement extérieur aux environs immédiats du foyer. Ces émissions de plomb ont potentiellement été importantes aux alentours immédiats de l'édifice, sur le parvis et les rues adjacentes. Mais leur nature locale et spontanée, fortement influencée par la mécanique des effondrements multiples des structures ne permet pas d'assimiler leur comportement à celui d'un panache de pollution qui se disperserait dans l'atmosphère. De fait, les dépôts à proximité immédiate de Notre Dame ne peuvent pas être modélisés par l'approche développée dans cette étude.

La zone d'impact du panache de l'incendie étudié est estimée comme s'étendant sur une **distance de 800m à une cinquantaine de kilomètres de la source**. Cette zone (ouest-nord-ouest) est déterminée par la direction des vents dominants pendant la période de l'incendie.

Le rapport présente la démarche d'évaluation et de caractérisation du terme source basée sur une analyse fine des différentes phases de l'incendie. Cette description repose sur un certain nombre d'hypothèses explicitées dans le rapport. Le profil granulométrique des particules étant un paramètre particulièrement sensible vis-à-vis des phénomènes de dépôts atmosphériques, en l'absence de données permettant de qualifier correctement ce paramètre, trois scénarios correspondant à trois hypothèses sur la répartition granulométrique des particules ont été établis. Ces scénarios correspondent à différentes hypothèses de répartition des particules dans des classes de granulométrie variant de 1,5 à 50 microns.

De même, en l'absence de données de références sur les quantités de monoxyde de plomb susceptibles d'être formées et émises par ce type de sinistre, un facteur d'émission basé sur des données disponibles dans la littérature et des expérimentations menées à l'Ineris a été estimé pour réaliser les calculs. Mais les incertitudes sur ce facteur d'émission sont telles que pour ne pas induire de biais sur l'interprétation des résultats issus des simulations de dispersion et de dépôt, ceux-ci sont présentés sous la forme de cartographies de quantités relative d'oxydes de plomb déposé, normalisées par le maximum simulé.

Ces simulations sont réalisées à l'aide d'un modèle lagrangien tridimensionnel, MSS, qui permet de prendre en compte la variabilité des champs météorologiques sur l'ensemble du domaine de calcul, et l'influence du relief.

La relative stabilité de la direction des vents le temps qu'a duré l'incendie, explique la faible dispersion du panache, qui s'étire sur un axe reliant l'île de la Cité à Mantes-la-Jolie. Au niveau de l'agglomération parisienne, le panache impacte la **pointe nord du VI^{ème} arrondissement, le VII^{ème}, le Nord du XV^{ème}, et le XVI^{ème}**. Ces arrondissements constituent la zone de plus fortes retombées quel que soit le scénario de profil granulométrique des particules considéré, avec un gradient décroissant du centre vers la périphérie de la ville étant admis que la zone aux alentours de la cathédrale soumise aux impacts locaux du sinistre, non modélisée, restait la zone de dépôts maximaux. A la sortie de Paris, le panache de l'incendie subit les effets du relief liés à la vallée de la Seine. Les retombées s'étendent jusqu'à Mantes-la-Jolie à près d'une cinquantaine de kilomètres de la source.

L'analyse des trois scénarios permet de mettre en évidence l'effet de la granulométrie : les particules les plus grosses retombent plus, et plus près de la source, alors que les particules de plus faible taille sont transportées sur de plus grandes distances et donc déposées plus loin. C'est ainsi qu'il est tout à fait plausible, selon les simulations que le signal en concentrations en plomb détecté par la station Airparif de Limay à 50km au Nord-ouest de Paris soit bien imputable à l'incendie de Notre Dame. La valeur de concentration mesurée en ce point par Airparif est, pour la semaine du 15 au 22 avril 2019, de 0,108 µg/m³, ce niveau étant largement inférieur aux seuils de la valeurs limite et objectif de qualité définis dans la réglementation européenne (directive 2008/50/EC) qui sont respectivement de 0,5 et 0,25 µg/m³ en moyenne annuelle. Il est également important de noter qu'à cette distance, quel que soit le scénario, les dépôts sont certainement relativement faibles, de 20 à 40 fois inférieurs à ceux estimés dans le VII^{ème} arrondissement où se situe le maximum de retombées (en dehors de la zone aux alentours de la cathédrale soumise aux impacts locaux du sinistre).

Enfin l'INERIS rappelle que les hypothèses retenues pour la modélisation du terme source et de la dispersion atmosphérique du panache de l'incendie sont accompagnées d'incertitudes potentiellement importantes concernant notamment :

- le facteur d'émission conduisant à estimer les quantités de plomb émises à l'atmosphère,
- la granulométrie des particules,
- la répartition temporelle des émissions.

Toutefois, les différents scénarios d'émission modélisés dans cette étude permettent de réduire l'incertitude concernant la localisation de **l'impact maximum du panache modélisé** (en dehors de la zone aux alentours de la cathédrale soumise aux impacts locaux du sinistre).

Il est enfin intéressant de noter que ces conclusions ont permis de guider l'ARS dans la mise en place d'une récente campagne de prélèvements complémentaires visant à explorer des zones possiblement impactées par le panache et relativement éloignées de la source. Malgré les incertitudes liées aux effets de lessivage et de ruissellement six mois après l'incendie, les résultats de cette campagne visant une approche globale (prélèvements et modélisation) fournissent des éléments d'information complémentaires aux simulations sur la distribution spatiale du plomb potentiellement déposé au passage du panache.

7 Références

- [1] P. Carlotti, Quelques ordres de grandeur pour mieux comprendre le feu de notre Dame, Face au risque, 2019.
- [2] THOMAS The size of flames from natural fires; 9th international symposium on combustion, p 844-859, 1963
- [3] Description de la méthode de calcul des effets thermiques produits par un feu d'entrepôt, 2011.
- [4] D. Drysdale, An Introduction to Fire Dynamics, Third Edition, 2011.
- [5] B. TRUCHOT, The importance of uncertain parameter for fire modelling SPFE Conference Malaga, 2019.
- [6] G. Heskestad, Engineering relations for fire plume, Fire Safety Journal, 7 (1984) 25 – 32.
- [7] Rapport INERIS Omega 16, Toxicité et dispersion des fumées d'incendie phénoménologie et modélisation des effets, 2005.
- [8] MacGrattan et al., Fire Dynamic simulator, User's guide, NIST Special Publication 1019, 6th edition, 2013.
- [9] Norme ISO 12136, Reaction to fire tests – Measurement of material properties using a fire propagation apparatus, 2011.

