

PROJET COP HERL

COnséquences Potentielles pour l'Homme et l'Environnement, perception et Résilience

**DE LA CARACTERISATION DU RISQUE PHYSICO-CHIMIQUE,
ENVIRONNEMENTAL ET SANITAIRE A LA PERCEPTION SOCIETALE
SUITE A L'INCENDIE DE LUBRIZOL ET NORMANDIE LOGISTIQUE :
VERS UNE RESILIENCE DU TERRITOIRE ?**

SEPTEMBRE 2024

SYNTHESE FINALE

PROJET COP HERL

COnséquences Potentielles pour l'Homme et l'Environnement, perception et RésiLience

**DE LA CARACTERISATION DU RISQUE PHYSICO-CHIMIQUE,
ENVIRONNEMENTAL ET SANITAIRE A LA PERCEPTION SOCIETALE
SUITE A L'INCENDIE DE LUBRIZOL ET NORMANDIE LOGISTIQUE :
VERS UNE RESILIENCE DU TERRITOIRE ?**

1 TABLE DES MATIERES

TABLE DES ILLUSTRATIONS.....	1
PREAMBULE.....	5
I. OBJECTIFS ET ATTENDUS.....	7
II. DÉVELOPPEMENTS MÉTHODOLOGIQUES POUR L'ÉCHANTILLONNAGE ET L'ANALYSE DES MARQUEURS DE L'INCENDIE ET LA CARACTÉRISATION DE LEUR TOXICITÉ.....	9
A. Des Méthodologies analytiques diversifiées et complexes.....	9
1. Constitution d'une base de données interne pour la recherche de marqueurs de l'incendie.....	9
B. Une stratégie de prélèvement complète.....	13
1. Prélèvements atmosphériques.....	13
2. Prélèvement d'un échantillon liquide de ruissellement.....	15
3. Prélèvements des eaux et MES.....	15
4. Prélèvement des sols et sédiments.....	20
C. Mise au point d'une stratégie analytique pour les incendies en enceinte confinée de laboratoire.....	22
1. Description de l'enceinte confinée de laboratoire et mise en œuvre.....	22
2. Contact avec des cellules pulmonaires.....	24
III. RESULTATS.....	25
A. Simulation chronologique de la dispersion et du rabattement des particules présentes dans le panache de fumées.....	25
1. Contexte et Objectifs.....	25
2. Résultats et analyses.....	25
3. Conclusions et perspectives.....	29
B. Imprégnation des cheveux en HAP et métaux.....	31
1. Contexte et objectif.....	31
2. Résultats.....	31
3. Discussion et conclusion.....	37
C. Analyse comportementale durant l'incendie.....	39
1. Circulation des populations lors de l'incendie.....	39
2. Informations et réseaux sociaux en temps de crise.....	40
3. Les médecins généralistes face aux évènements.....	41
4. La gestion de la crise dans les collèges de l'agglomération rouennaise.....	47
5. Perception et vécu des adolescents et jeunes adultes face aux risques industriels suite à l'incendie....	48
D. Les marqueurs de l'incendie issus des retombées de l'incendie.....	53
1. Analyse et choix des huiles brûlées en enceinte de laboratoire.....	53
2. Effluents gazeux issus de l'incendie – relation avec les essais en enceinte de laboratoire.....	54
3. Suies issues de l'incendie – relation avec les essais en enceinte confinée.....	57
4. Résidu issu du ruissellement de surface : échantillon ASL.....	59

5.	Analyse d'échantillons aqueux à proximité de l'incendie	63
E.	Imprégnation environnementale suite à l'incendie.....	66
1.	Intégration dans la base de données des molécules détectées dans les fractions issues des retombées de l'incendie	66
2.	Imprégnation dans les eaux superficielles et souterraines.....	67
3.	Imprégnation dans les sols	75
4.	Imprégnation dans les sédiments	79
5.	Liste des marqueurs de l'incendie imprégnant l'environnement après l'accident.....	86
F.	Toxicité des marqueurs de l'incendie	90
1.	Toxicologie des produits marqueurs de l'incendie.....	90
2.	Evaluation <i>in vitro</i> de la toxicité des aérosols et des particules générées lors d'un incendie impliquant des huiles minérales et lubrifiants pour moteurs	98
IV.	PERSPECTIVES	106
A.	La culture du risque au sein de la Métropole Rouen Normandie	106
1.	Enquête sur la connaissance du signal d'alerte et des consignes de sécurité	106
2.	Tactiques et outils de la gestion de crise.....	107
B.	L'incendie dans la trajectoire politique rouennaise.....	111
C.	L'incendie dans la trajectoire socio-économique rouennaise : perception, adaptation, évaluation des dommages et d'une culture multi-risque.....	112
	CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS	115

TABLE DES ILLUSTRATIONS

Figure 1 : Structuration du projet COP HERL.....	6
Figure 2 : Produits ayant brûlé dans l'entrepôt Lubrizol. La partie gauche de la figure correspond aux types de produits ayant brûlé avec leur tonnage et la partie droite correspond aux familles de molécules ayant brûlé lors de l'incendie	10
Figure 3 : Constitution de bases des données pour identifier des marqueurs de l'incendie.....	11
Figure 4 : Lieu de prélèvement de l'air le jour de l'accident (Université Rouen Pasteur et hall de l'université).....	13
Figure 5 : Remplacement sous le panache de l'incendie des 5 sites d'études dans le contexte géographique, topographique, hydrographique et météorologique de la région	15
Figure 6 : Exemple d'un profil de vitesse ADCP obtenu le 17/11/2023 à proximité de la station de l'Andelle	19
Figure 7 : Localisation du prélèvement de la carotte sédimentaire de la darse aux bois et schéma des différentes sections.....	21
Figure 8 : Enceinte de combustion (1 m ³) permettant de simuler un feu (photo et schéma de l'installation)	22
Figure 9 : Description de l'enceinte de combustion équipée de capteurs et de systèmes de prélèvement des effluents solides et gazeux	23
Figure 10 : Schéma d'exposition à l'interface Air-Liquide (système Vitrocell®).....	24
Figure 11 : Représentation schématique des phénomènes physiques à modéliser dans le cas d'une étude sur la dispersion de polluants	25
Figure 12 : Comparaison qualitative des panaches numérique et réel.....	26
Figure 13 : Visualisation des deux structures au niveau de la source d'injection des fumées	26
Figure 14 : Photo du panache le jour de l'incendie	27
Figure 15 : Vue en coupe dans le plan X=0m.....	27
Figure 16 : Estimation de l'altitude du panache pour un terme source dimensionné sur la puissance maximale P_{max} et pour la puissance moyenne \bar{P}	28
Figure 17 : Influence de la topographie sur les vitesses. Composante horizontale de la vitesse U_y (haut) et Composante verticale de la vitesse U_z (bas).....	29
Figure 18 : Vue en coupe dans le plan Y=3500m de l'isocontour instantané du scalaire Z (ligne bleue) et de sa valeur moyenne (ligne noire)	29
Figure 19 : Les départs de population au sein de la Métropole Rouen Normandie le 26 septembre 2019	40
Figure 20 : Classification et heure de publication des tweets français le 26 septembre 2019	41
Figure 21 : Frise chronologique de septembre 2019 à juillet 2020. Au-dessus de la flèche, les évènements liés à l'incendie et la pandémie et en dessous, les différentes étapes de construction de l'étude	42
Figure 22 : Répartition des enquêtés selon leur lieu de vie, de cabinets.....	44
Figure 23 : Score d'anxiété	50
Figure 24 : Score de dépression.....	50
Figure 25 : Expression et anxiété au prisme de la situation actuelle des adolescents et jeunes adultes	50
Figure 26 : Score d'anxiété en fonction de l'exposition aux odeurs	50
Figure 27 : Score d'anxiété en fonction de l'exposition au nuage	50
Figure 28 : Le registre émotionnel évoqué dans les réponses texte.....	51
Figure 29 : Précision des réponses en fonction de l'exposition au nuage.....	51
Figure 30 : Précision des réponses en fonction de l'exposition aux odeurs.....	51
Figure 31 : Référence à la famille en fonction de l'exposition au nuage	52
Figure 32 : Chromatogrammes provenant des échantillons d'air, issus de l'extraction de l'ion m/z 119,085	55
Figure 33 : Spectres de masse LDI FTICR MS des échantillons de suie de Quincampoix, Préaux et Fond-Du-Val Un agrandissement au rapport m/z 393 est présenté pour chaque échantillon.....	57
Figure 34 : Spectres de masse FTICR obtenus par la soustraction entre la phase huileuse de l'échantillon ASL et son blanc, à partir des analyses ESI (-) en haut et à partir des analyses APCI(+) en bas. Des propositions de structures associés à certains ions de spectre de masse sont présentés dans cette figure.....	60

Figure 35 : Résultats obtenus en MEB-EDX pour la caractérisation de la phase solide de l'échantillon ASL lavée à l'heptane. En haut se trouve une cartographie des différents éléments chimiques présents dans l'échantillon. En bas se trouvent les informations sur les teneurs en % des différents éléments chimiques identifiés par EDX	63
Figure 36 : Chromatogrammes (Total Ion Current) basse énergie (6 eV) (50-1000 m/z) des échantillons d'eaux prélevés dans la darse aux Bois ou en Seine en aval/amont du site Lubrizol	64
Figure 37 : Analyse en composantes principales sur les molécules spécifiques détectées par UPLC-IMS-QTOF à partir des échantillons liquides collectés peu après l'accident	65
Figure 38 : Méthodologie d'intercomparaison des bases de données pour identifier des marqueurs de l'incendie	66
Figure 39 : Évolution de la présence à l'état dissout dans la phase aqueuse (en rouge) de différents marqueurs liés à l'incendie (identifiés à des niveaux de confiance élevés par GC-HRMS Orbitrap ou LC-HRMS Orbitrap) en fonction des différentes eaux et campagnes (1 à 5).....	67
Figure 40 : Intensité détectée de certaines des molécules spécifiques identifiées en fonction du site et de la date de prélèvement des MES.....	69
Figure 41 : Concentrations de HAP dans les échantillons d'eau des 5 sites et de la première à la cinquième campagne	70
Figure 42 : Somme des 16 HAP prioritaires et des 6 PCB indicateurs dans les MES des rivières Andelle, Cailly, Robec et les sources Crevon et Fontaine-Nourrice, durant les campagnes hiver 2021, printemps 2022, automne 2022 et printemps 2023	71
Figure 43 : Concentrations mesurées dans les MES pour Zn, Al, Cd, P, Ca et B, pour les 5 sites au cours des campagnes hiver 2021, printemps 2022 et automne 2022.....	72
Figure 44 : Teneurs en Pb, Zn et Li (ppm = mg/kg) des échantillons de l'étude : MES des 5 sites d'étude et carotte de sédiments de la darse aux Bois. Le seuil de qualité S1 est représentée par une ligne en rouge pour Pb et Zn ...	73
Figure 45 : Représentation graphique des rapports $^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$ en fonction de l'inverse de la teneur en Pb pour les échantillons de MES. La droite en pointillé représente la corrélation linéaire entre $1/\text{Pb}$ et le rapport $^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$ pour les échantillons de MES ($y = 0.582 * x + 1.161$, $R = 0.926$). Les pôles naturels et anthropiques définis par la littérature sont également représentés sur ce graphique	74
Figure 46 : Représentation graphique (a) des compositions isotopiques en Li, et (b) des compositions isotopiques en Li en fonction de l'inverse de la teneur en Li pour les échantillons de MES et des sédiments de la darse aux Bois	75
Figure 47 : Concentrations en HAP totaux (16 prioritaires) et en PCB totaux (6 indicateurs) dans les 8 sols prélevés pour l'étude	76
Figure 48 : Relation entre les niveaux de HAP dans les sols et la distance par rapport à l'incendie	77
Figure 49 : Concentration de chacun des HAP et PCB individuels mesurés dans le sol de Petite Bouverie avant et après l'incendie (profondeur 0-10 cm).....	77
Figure 50 : Concentration des éléments dans les échantillons de sol du site de la petite Bouverie, 4 mois avant l'incendie, 5-6 jours après et 9,5 mois après l'incendie, pour les éléments mineurs (en haut) et les éléments majeurs (en bas)	78
Figure 51 : Intensités détectées de 3 des molécules marqueurs dans les différentes sections de la carotte de la darse aux Bois.....	80
Figure 52 : Concentrations en HAP totaux (16 prioritaires) et en PCB totaux (6 indicateurs) dans les différentes sections de la carotte sédimentaire de la darse aux Bois	83
Figure 53 : Niveaux de contamination en PFAS de la carotte sédimentaire de la Darse aux bois	84
Figure 54 : Teneurs en certains éléments traces (à gauche) ou majeurs (à droite) en fonction de la profondeur des sections de la carotte sédimentaire de la darse aux bois.....	85
Figure 55 : Représentation graphique (a) des compositions isotopiques en Li, et (b) des compositions isotopiques en Li en fonction de l'inverse de la teneur en Li pour les échantillons de sédiments (et des MES des 5 rivières étudiées).....	86
Figure 56 : Concentrations en ATP (μM) par insert (A) et ratio ATP/ADP (B) mesurés après 3h et 24h d'exposition aux PM. Les valeurs sont exprimées en moyenne +/- écart-type de 4 expérimentations indépendantes, * $p < 0.05$; ** $p < 0,01$	98
Figure 57 : Impact de l'exposition à l'interface Air-liquide de cellules BEAS 2B aux aérosols issus de la combustion de l'huile minérale et de l'huile additivée. Les têtes de flèches jaunes indiquent la présence et accumulation des	

particules. Micrographie rouge : Cartographie élémentaire du carbone montrant la présence de particules de combustion à proximité de la cellule	99
Figure 58 : Expression de gènes impliqués dans le métabolisme de biotransformation (A) et dans la réponse antioxydante (B) après exposition de cellules Beas-2B 3h ou 24h aux particules obtenues des conditions « Huile minérale » et « huile additivée ». Les résultats sont exprimés en moyenne \pm écart-type de 4 conditions expérimentales indépendantes et mesurées en duplicat	100
Figure 59 : Étude de la réponse inflammatoire après exposition de cellules Beas-2B 3h ou 24h aux particules obtenues des conditions « Huile minérale » et « huile additivée ». (A) Expression d'IL6, d'IL8 et de MCP-1 mesurées par RT-qPCR, (B) Taux de MCP-1 sécrété (C) Taux d'IL6 et (D) taux d'IL8. Les résultats sont exprimés en moyenne \pm écart-type de 4 conditions expérimentales indépendantes mesurées en duplicat	101
Figure 60 : Pourcentage de déplétion en acide ascorbique (A) ou en dithiothréitol (DTT ; B) par les PM provenant de la combustion d'huile minérale ou d'huile additivée. Les valeurs sont exprimées en moyenne \pm écart-type de 4 expérimentations indépendantes, * $p < 0,05$; ** $p < 0,01$	102
Figure 61 : Taux d'IL-8 et de MCP-1 après exposition de cellules Beas-2B 3h ou 24h aux particules obtenues des conditions « Huile non additivée » et « Huile additivée ». Les résultats sont exprimés en moyenne \pm écart-type de 4 conditions expérimentales indépendantes mesurées en duplicat.....	103
Figure 62 : Cinétique de croissance des deux souches bactériennes modèles en présence ou non des suies issues d'huiles additivées (HA) et non additivées (HnA). (A) <i>P. aeruginosa</i> H103. (B) <i>P. fluorescens</i> MFAF76a	104
Figure 63 : Temps de génération des deux souches bactériennes modèles en présence ou non des suies issues d'huiles (HA) ou non (HnA). (A) <i>P. aeruginosa</i> H103. (B) <i>P. fluorescens</i> MFAF76a	104
Figure 64 : Production de facteurs de virulence par <i>P. aeruginosa</i> H103 (A ; pyocyanine) et <i>P. fluorescens</i> MFAF76a (B, pyoverdine) en présence de 100 μ g/mL de suies additivées ou non après 24h de culture. Trois réplicats biologiques ont été réalisés. Les étoiles noires représentent une diminution significative de la formation du biofilm. Les étoiles rouges représentent une augmentation significative de la formation du biofilm. La barre représente la production de facteurs de virulence par les 2 souches modèles en absence de suies. * $0,05 < p$, *** $0,001 < p$	105
Figure 65: Les premiers réflexes déclarés par la population suite au déclenchement du signal d'alerte	106
Figure 66 : Grille d'analyse pour l'évaluation des messages envoyés depuis la plateforme FR-Alert	109
Tableau 1 : Produits les plus retrouvés en nombre parmi les fiches de sécurité Lubrizol	12
Tableau 2 : Échantillons d'air prélevés dans la semaine suivant l'accident (2019)	13
Tableau 3 : Échantillons d'air prélevés en 2021	13
Tableau 4 : Récapitulatif des échantillons de suies analysés et localisation de la collecte.....	14
Tableau 5 : Sources, aménagements et prélèvements répertoriés durant la période 2017-2021 dans les aires drainées par les 5 stations de mesure.....	17
Tableau 6 : Performances de calcul pour un point de fonctionnement.....	25
Tableau 7 : Description de la population * : entre la date de l'incendie et la date de prélèvement.....	32
Tableau 8 : Dosage des HAP et des métabolites (pg/mg)	33
Tableau 9 : Dosage des métaux (concentrations en ng/mg).....	37
Tableau 10 : Comparaison des molécules identifiées dans les échantillons collectés juste après l'incendie industriel et la simulation d'incendie sur huile moteur additivée (les composés notés en gras ont un haut niveau de confiance 1 ou 2 selon l'échelle d'identification de Koelmel)	56
Tableau 11 : Exemple de formules brutes des échantillons de suies Fond du Val, Préaux et Quincampoix pour les classes CHO ₂ Na, CHO ₃ Na et CHO ₄ Na.....	58
Tableau 12 : Exemple de familles de molécules identifiées dans la phase huileuse de l'échantillon ASL	61
Tableau 13 : Familles moléculaires identifiées dans la phase aqueuse de l'échantillon ASL. Les valeurs de KMD y sont indiquées ainsi que les substituants R identifiés pour chaque famille moléculaire.....	62
Tableau 14 : Concentration en équivalent toxique total des PCDDs/PCDFs pour les MES des rivières Cailly et Robec	70
Tableau 15 : Liste restreinte de molécules polaires d'intérêt issues des listes de composés détectés par FTICR MS dans les échantillons ASL et de suie, et détectées dans les échantillons de sédiments ou d'eau de la darse aux Bois analysés par UPLC-IMS-QTOF	81

Tableau 16 : Liste restreinte de molécules polaires d'intérêt issus des listes de composés détectés par FTICR MS dans les échantillons ASL et de suie ou des listes de produits utilisés sur le site de l'incendie, et détectés dans les échantillons de sédiments et d'eau de la darse aux Bois, analysés par UPLC-IMS-QTOF	82
Tableau 17 : Niveaux S1 de la réglementation GEODE du 9 août 2006 pour les éléments traces dans les sédiments fluviaux susceptibles d'être dragués	85
Tableau 18 : Liste des 30 molécules marqueurs identifiées, spécifiquement liées à l'incendie Lubrizol, retrouvées dans les effluents gazeux, liquides et solides peu après l'accident (échantillons primaires), retrouvées dans les échantillons gazeux ou particulaires lors de la simulation de feu en laboratoire, et retrouvées dans l'environnement plusieurs mois après l'accident (échantillons secondaires)	87
Tableau 19 : Liste des marqueurs de l'incendie et classification des dangers	91

PREAMBULE

L'accident industriel majeur qui s'est produit sous la forme d'un incendie sur les sites de Lubrizol et Normandie Logistiques en septembre 2019 constitue un événement exceptionnel, déjouant les stratégies industrielles et publiques de prévention et de précaution, et créant des contaminations inédites liées à la combustion de nombreux produits chimiques pouvant conduire à des effets « cocktails » très peu, voire non documentés. Durant la période de l'incendie, un protocole de gestion de crise a été mis en place par les autorités afin de suivre en temps réel l'évolution de la situation avec pour seul mot d'ordre la protection des populations face au risque immédiat. Après avoir écarté le risque aigu, un protocole de suivi renforcé des milieux environnementaux (air, sol, végétaux, denrées alimentaires, eaux superficielle et souterraine) a été mis en place sur une période de 3 mois et a permis l'acquisition d'une quantité importante de données qualitatives ne révélant pas de pollution liée à l'incendie sur ce territoire devenu parmi les plus investigués de France. Dans un processus de transparence, les autorités ont rendu public l'ensemble de ces résultats et ont fait évoluer la législation en réponse à cet accident.

Cependant, les incertitudes sur les contaminations et la gestion de l'action publique ont créé de l'inquiétude et une crise de confiance voire une défiance envers les industriels et les représentants de l'Etat. La spécificité et l'ampleur de cet accident ont créé de nombreuses conséquences encore en débat pouvant être comprises au travers de ses temporalités (ses différentes phases), et des divers espaces impactés (territoriaux, urbains/ruraux, publics, privés, domestiques, de travail, de loisirs, etc.), des risques d'exposition, des expériences vécues, et des multiples manifestations de la population et des institutions s'étant senties lésées (plaintes, manifestations citoyennes, défiance vis à vis de la gestion publique, etc.) ont cours encore aujourd'hui.

Toutefois, l'approche événementielle ne suffit pas, car l'implantation des usines Seveso – seuil haut, comme Lubrizol - dans l'agglomération de Rouen s'inscrit dans une histoire industrielle française et locale, qui est toujours d'actualité. Ainsi, il est nécessaire d'inscrire cet événement dans des temporalités plus longues, liées notamment aux processus d'industrialisation, d'urbanisation, et des processus contingents comme ceux régissant l'économie de marché ou l'action publique. *A contrario*, il interroge les politiques de développement durable, car il démontre la vulnérabilité d'un vaste territoire – plus d'une centaine de communes ayant été touchées – face aux accidents industriels aux conséquences incertaines et non maîtrisées. Il questionne aussi les dangers environnementaux générés par ces industries, créant des risques de plus en plus documentés sur le climat, les environnements naturels et anthropisés, ou la santé des populations.

Ainsi, cet accident met en lumière toute la difficulté d'analyser un tel phénomène aussi complexe sans une approche pluridisciplinaire mettant en jeu des chimistes, des spécialistes de la santé, de la combustion, des environnements naturels (air, sol, eau, sédiment), des biologistes, des spécialistes des sciences humaines et sociales (psychologues, sociologues, économistes, géographes) pour la perception des risques et de la gestion de crise. Les laboratoires de recherche universitaires ont le vivier de compétences nécessaires pour mener à bien cette analyse pluridisciplinaire et ont été sollicités par l'Université Rouen Normandie et la Région Normandie pour développer un projet dans le but de répondre aux problématiques posées par cet incendie. Ce projet fédère une quinzaine de laboratoires pour une centaine de personnels et vise à caractériser non seulement les risques physico-chimiques, environnementaux et sanitaires mais aussi la perception sociétale de ceux-ci dans le cadre d'un vaste projet pluridisciplinaire. Ce dernier a fait l'objet d'une évaluation par l'ANR dans le même timing de l'AAP RA-SIOMRI aboutissant à des recommandations par les 6 experts-évaluateurs. Dans le cadre des procédures de financement des projets de recherche, la Région Normandie et la Métropole de Rouen Normandie ont souhaité que le projet COP HERL initial soit retravaillé i) en faisant ressortir un axe de recherche interdisciplinaire, ii) en précisant les finalités sociétales, iii) en développant des outils permettant d'améliorer la résilience du territoire.

Le projet COP HERL a été structuré en 4 groupes de travail amenés à interagir durant toute la durée du programme de novembre 2020 à juin 2024 (Figure 1). Il a fait l'objet d'un financement public de 1.426k€ hors salaire des fonctionnaires (1.041k€ de la Région Normandie sur fond propre et crédit FEDER, 199k€ de l'ANR, 100k€ de l'Université de Rouen Normandie, 86k€ de la Métropole Rouen Normandie). Le projet a été conduit en 2 phases, la première entre novembre 2020 et juin 2021 puis la seconde entre juillet 2021 et juin 2024.

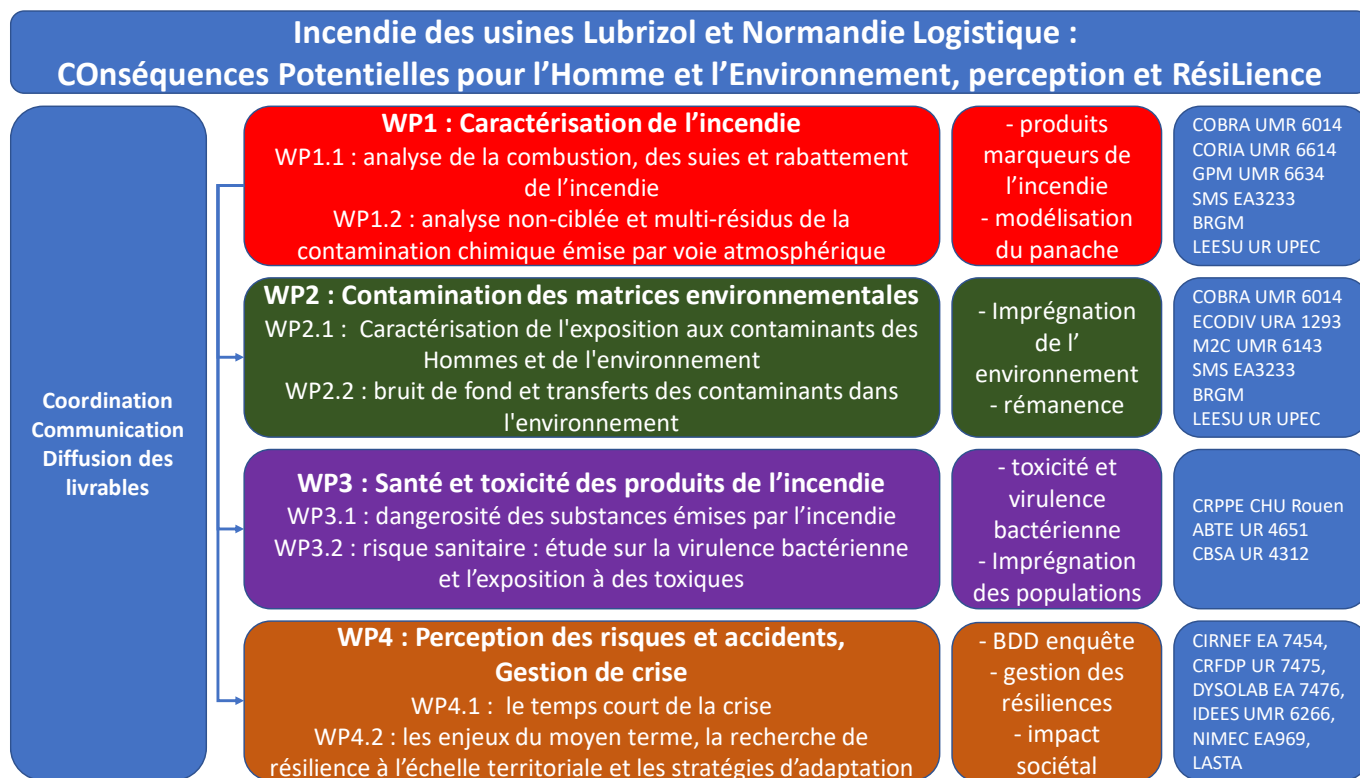


Figure 1 : Structuration du projet COP HERL

Durant les 5 ans du projet, de sa gestation à la restitution des résultats, une partie de la communauté universitaire rouennaise a développé une culture interdisciplinaire apprenant à faire avancer leurs recherches spécifiques avec un objectif de partage de connaissance dans le cadre d'une analyse systémique complexe centrée sur l'analyse multirisques propre à la compréhension des enjeux posés par l'incendie industriel de Lubrizol-Normandie Logistique. Ce travail en commun des laboratoires de l'Université de Rouen Normandie a forgé une certaine culture scientifique basée sur sa pluridisciplinarité et sa sensibilité vers les transitions socio-écologiques et a vu dans le même temps la création de L'Institut des Transitions au service de la transformation pour un développement durable des territoires et de la société (l'institut TURN, <https://turn.univ-rouen.fr/>) illustrant la volonté de l'Université Rouen Normandie de s'inscrire dans une démarche de développement durable et responsabilité sociétale.

Le projet COP HERL a permis également de faire la démonstration de la capacité des laboratoires rouennais à travailler ensemble sur des questions sociétales globales mobilisant la pluridisciplinarité sur les enjeux des risques croisés (climatiques, environnementaux, sanitaires, industriels, socio-économiques et sociétaux). Le projet COP HERL a servi de base à la réponse à l'AAP Excellences-France 2030. Ainsi, le projet TRANSITION (ANR-23-EXES-0013), porté par l'Université Rouen Normandie avec le CNRS, le CHU Rouen, l'INSA Rouen et l'ENSAN, a été sélectionné par l'ANR dans l'objectif de créer une référence dans l'enseignement supérieur et la recherche français, pour **l'acculturation, la formation et la diplomation en transition socio-écologique et en culture de la maîtrise des risques pour un modèle de société et des territoires durables**, tout en apportant des aides à la décision pour les acteurs socio-économiques. Le projet TRANSITION donc renforce la signature distinctive de l'URN en **développant une action de recherche sur le multirisques** (risques environnementaux, industriels, sanitaires, économiques et sociétaux), en lien avec le contexte territorial et en particulier le changement climatique.

I. OBJECTIFS ET ATTENDUS

L'incendie a mis en lumière des risques industriels importants liés à la présence d'usines SEVESO seuil haut au sein de la métropole. **Le projet COP HERL de par son expertise, son indépendance et son emprise locale suscite une attente sociétale importante pour répondre aux nombreuses questions orphelines que les périodes de gestion de crise et de suivi renforcé n'ont pas apportées.** En effet, la plupart des très nombreuses analyses réalisées durant l'incendie et ces périodes ont été effectuées dans le but d'identifier des molécules ciblées présentant un risque accru plus ou moins important pour l'Homme et l'environnement afin de décider d'une mise en protection adéquate des populations.

Le projet COP HERL est un projet scientifique animé par des questionnements de recherche dont les réponses peuvent d'améliorer la compréhension des conséquences de l'incendie sur l'environnement et les populations et fournir un retour d'expérience dans la gestion des futurs accidents industriels. Il s'inscrit comme un projet de territoire dont l'enjeu est d'apporter des réponses scientifiques à l'ensemble des acteurs locaux sur l'incendie lui-même, ses conséquences potentielles sur l'environnement et l'Homme et sur la perception des risques, la gestion de crise et la résilience du territoire, grâce à cette approche multi et interdisciplinaire mettant en jeu des chimistes, des spécialistes de la santé, de la combustion, des environnements naturels, des Sciences Humaines et Sociales. Il n'a pas pour objectif d'apporter un jugement sur les démarches et/ou analyses entreprises lors de la gestion de crise par les services de l'Etat.

Le caractère innovant de COP HERL réside à la fois :

- **dans les méthodologies analytiques développées dans le projet :** analyses conjointes ciblées et non-ciblées haute-résolution pour caractériser tous les atomes et molécules présentes dans les échantillons, enceinte confinée pour rejouer l'incendie, développements méthodologiques pour l'extraction des marqueurs et contaminants dans les matrices, suivi source to sink dans l'hydrosystème des marqueurs et contaminants, approche innovante pour l'étude de la toxicité des produits basée sur une exposition de cellules épithéliales pulmonaires humaines cultivées en interface air-liquide afin de les exposer « en ligne » aux fumées de l'incendie, enquêtes psycho-sociologiques pour comparer la perception sociétale du risque immédiat, moyen, long terme issu de l'incendie et la réalité de ce risque caractérisée par les données acquises durant l'incendie, le suivi sanitaire renforcé et le projet COP HERL
- **et dans l'ampleur de la multidisciplinarité engagée avec une quinzaine de laboratoires et une centaine de personnels physiciens, chimistes, environnementalistes, médecins, biologistes, géographes, économistes, sociologues et psychologues.** Cette multidisciplinarité a été utilisée pour développer un axe de travail interdisciplinaire autour de la comparaison entre la perception sociétale de l'incendie et la caractérisation réelle du risque physico-chimique, environnemental et sanitaire. Cette problématique interdisciplinaire porte sur la comparaison de la perception sociétale du risque versus sa caractérisation physico-chimique, environnemental et sanitaire afin d'identifier des ressorts pour augmenter la résilience du territoire et améliorer la gestion des crises futures par une communication adaptée.

Ainsi, le projet COP HERL vise à caractériser le risque industriel induit par l'incendie en identifiant les produits spécifiquement générés par celui-ci et leur dispersion atmosphérique (WP1) puis d'en identifier le risque sanitaire (WP3). L'incendie fini, l'environnement, qui a été le réceptacle des produits, devient source de contamination potentielle qu'il convient de caractériser. Ainsi le WP2 a pour objectif d'identifier le risque environnemental résiduel. Cet incendie majeur a généré des peurs et des comportements de défiance et de rejet qu'il convient d'analyser afin d'en identifier les ressorts et mécanismes pour capitaliser le retour d'expérience. L'objectif du WP4 est d'analyser les risques psycho-sociaux induits par l'incendie.

Les objectifs du projet COP HERL portent sur les questions suivantes :

- Comment se sont réalisés la dispersion du panache et le rabattement des suies ?
- Quels sont les produits qui ont été émis lors de l'incendie et peut-on dégager des marqueurs spécifiques ?
- Quelle a été la contamination des sols, des sédiments et des eaux superficielles et souterraines par ces marqueurs ? Cette contamination peut-elle être différenciée du "bruit de fond" enregistré sur le territoire avant l'accident ?
- Quelle a été l'exposition de la population aux marqueurs et quel est son devenir ?
- Quels sont les produits qui peuvent présenter une toxicité ? et laquelle ?
- Quels ont été la perception et les comportements des populations et des acteurs territoriaux face à cet accident et à la gestion de crise ? Quel retour d'expérience peut-on faire ? Quelles sont les retombées socio-économiques pour la Métropole ?
- Quelles peuvent être les stratégies d'adaptation et de résilience des acteurs ?

Les attendus escomptés sont les suivants :

- Liste des produits spécifiques identifiés lors de l'incendie et comparaison avec la liste des produits analysés
- Cartographie atmosphérique de l'emprise spatiale du panache puis terrestre des retombées de suies
- Bruit de fond des contaminants avant l'incendie, exposition environnementale aux contaminants spécifiques, flux hydrosédimentaires annuels et dynamique des marqueurs dans l'environnement
- Evaluation de la toxicité respiratoire des fumées d'incendie par une approche in vitro, évaluation de la virulence bactérienne après exposition expérimentale à des fumées d'incendie
- Mesure des métaux, HAP dans les cheveux de résidants
- Base de données en open-data sur la population générale et les comportements face à cet accident et à la gestion de crise
- Stratégies d'adaptation et de résilience des acteurs = retour d'expérience sur les comportements des populations en situation de crise, diagnostic de la communication de crise, guide de plan de communication de crise adapté à la gestion des accidents industriels régionaux.

II. DÉVELOPPEMENTS MÉTHODOLOGIQUES POUR L'ÉCHANTILLONNAGE ET L'ANALYSE DES MARQUEURS DE L'INCENDIE ET LA CARACTÉRISATION DE LEUR TOXICITÉ

A. Des Méthodologies analytiques diversifiées et complexes

De par la nature intégrative du projet CIPHERL, de nombreuses méthodes d'analyse ont dû être mises au point afin d'identifier des substances inconnues (analyses non ciblées) potentiellement marqueurs de l'incendie, ou de quantifier des molécules réglementées (analyses ciblées), et ceci dans des compartiments environnementaux aussi diversifiés que l'atmosphère (phase gazeuse ou retombées de suies et résidus carbonés), l'eau (superficielle ou souterraine, substances en phase dissoute ou adsorbées sur des matières en suspension (MES)), les sols ou sédiments. Un échantillon provenant du ruissellement des surfaces après un épisode de pluie, a également été collecté peu après l'incendie à proximité du site Lubrizol. Les échantillons environnementaux collectés étant de natures très différentes (solides organiques et inorganiques, liquides huileux ou aqueux, gaz), les méthodes de préparation de l'échantillon consistant à extraire les composés d'intérêt des matrices puis à purifier les extraits ont dû être adaptées à chaque matrice, optimisées et validées par les laboratoires de recherche. Outre la nécessité d'utiliser de nombreux outils analytiques de détection et d'identification de pointe (spectromètres de masses couplés ou non à des chromatographes), le traitement du nombre considérable de données récoltées a nécessité la formation des chercheurs sur des logiciels complexes et la mise en œuvre de compétences très pointues.

1. Constitution d'une base de données interne pour la recherche de marqueurs de l'incendie
Suite aux nombreuses analyses menées sur les échantillons récoltés pendant ou peu après l'incendie (retombées lors de l'incendie ou lixiviats de surfaces), une base de données interne a été créée afin de rassembler les molécules connues stockées sur les sites de Lubrizol et Normandie Logistique et les molécules identifiées lors des analyses effectuées. Ont été compilés dans cette base de données les rapports masse sur charge (m/z) des molécules (et leurs adduits possibles) obtenus à l'issue des analyses par spectrométrie de masse pour les molécules extraites des échantillons primaires collectés lors de l'accident (suies, résidus de ruissellement de surface (ASL), eaux de la darse aux bois collectées lors de l'incendie) mais aussi pour les molécules présentes dans les stocks de Lubrizol.

Concernant les molécules issues du stock Lubrizol, la Figure 2 a été obtenue à partir des données partagées par la préfecture. Elle présente les produits ayant brûlé dans l'entrepôt Lubrizol. La majorité de ces produits sont des additifs multi-usages, suivis d'additifs spécifiques (dispersants, détergents, additifs anti-usure...). Ces mélanges d'additifs sont susceptibles d'abriter une grande diversité moléculaire avec des composés oxygénés, soufrés, phosphorés ou même des métaux comme le zinc ou le bore. D'après la Figure 2, les composés ayant le plus brûlé sont des huiles minérales, des oléfines soufrées et des polymères hydrocarbonés et oxygénés. Les huiles minérales constituent la base des huiles lubrifiantes, il est donc normal d'en trouver en grande quantité. Les polymères hydrocarbonés et les copolymères de méthacrylate servent d'améliorants de viscosité tandis que les oléfines soufrées font partie du groupe des *sulfur carriers* et ont des propriétés anti-usure en conditions d'extrême-pression. D'autres composés en plus petite proportion sont trouvés comme les dithiophosphates de zinc (ZDTPs, dispersants), les sulfonates (détergents) et les arylamines (antioxydants).

Type de produit présent	Proportion	Tonnes
Produits finis : Additif multi-usages	62,88%	3308
Améliorant de viscosité	13,53%	711
Dispersant	4,21%	221
Huile vierge	4,18%	219
Détergent	3,99%	209
Additif anti-usure	3,54%	186
Additif pour carburant diesel	2,47%	129
Abaisseur du point de congélation	2,24%	117
Additif pour le travail des métaux	1,06%	55
Additif pour réduction des frottements	0,60%	30
Solvant	0,51%	27
Autres	0,48%	25
Additif anti-corrosion	0,31%	16
Quantité totale de produit détruite dans l'incendie		5253 tonnes

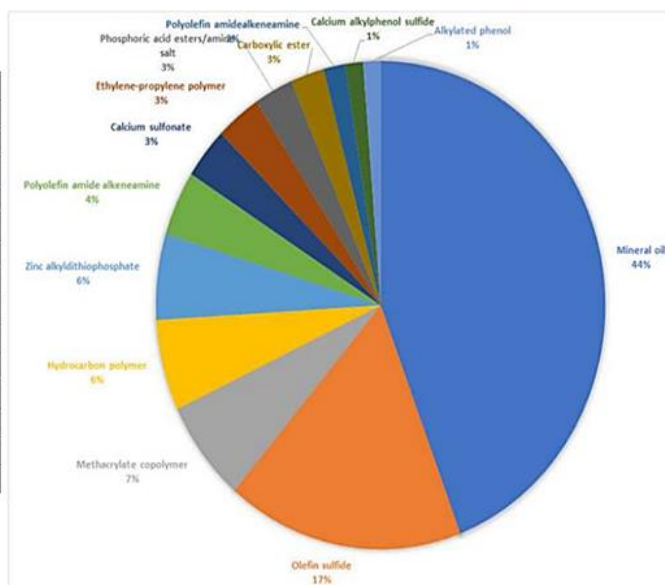


Figure 2 : Produits ayant brûlé dans l'entrepôt Lubrizol. La partie gauche de la figure correspond aux types de produits ayant brûlé avec leur tonnage et la partie droite correspond aux familles de molécules ayant brûlé lors de l'incendie

A partir des fiches de sécurité des produits présents dans l'entrepôt Lubrizol, une liste des composés les plus présents en nombre a été établie, avec une tentative de détermination de la structure chimique pour ces produits (Tableau 1). On retrouve parmi ces composés, des ZDTPs, des antioxydants de type dodecyl phenol et arylamines ainsi que des détergents de la famille des sulfonates. Le but était de retrouver ces composés intacts ou leurs produits de dégradation dans les différents échantillons analysés afin d'établir une liste de marqueurs à rechercher dans les différentes matrices environnementales contaminées suite à l'incendie.

Afin d'identifier des marqueurs assurément liés à l'incendie et indépendants du bruit de fond urbain et des molécules ubiquistes retrouvées classiquement dans l'environnement à cause des diverses activités anthropiques, deux bases de données ont été créées puis croisées (Figure 3). La première est issue des signaux m/z (masse sur charge) observés par FTICR et GC-MS Orbitrap sur les échantillons dits primaires, i.e. ceux prélevés lors de l'incendie sur les matrices air, suies, sols, eaux, sédiments, ceux retrouvés lors des feux d'huiles additivées et non-additivées dans l'enceinte confinée, puis ceux présents dans la liste des composés Lubrizol ayant brûlé. La seconde est issue des signaux observés sur les échantillons dits secondaires, i.e. ceux prélevés dans l'environnement (eaux superficielles et souterraines, MES, sédiments, sols) après l'incendie dans le cadre du projet COP HERL. L'intercomparaison des deux bases de données après suppression des molécules ubiquistes et de celles composant le bruit de fond urbain permettra d'identifier des marqueurs attribuables à l'incendie. La dynamique spatio-temporelle de ces marqueurs dans les différentes matrices environnementales sera alors caractérisée afin d'en déduire leur rémanence probable puis leur toxicité éventuelle sera recherchée parmi les références bibliographiques internationales.

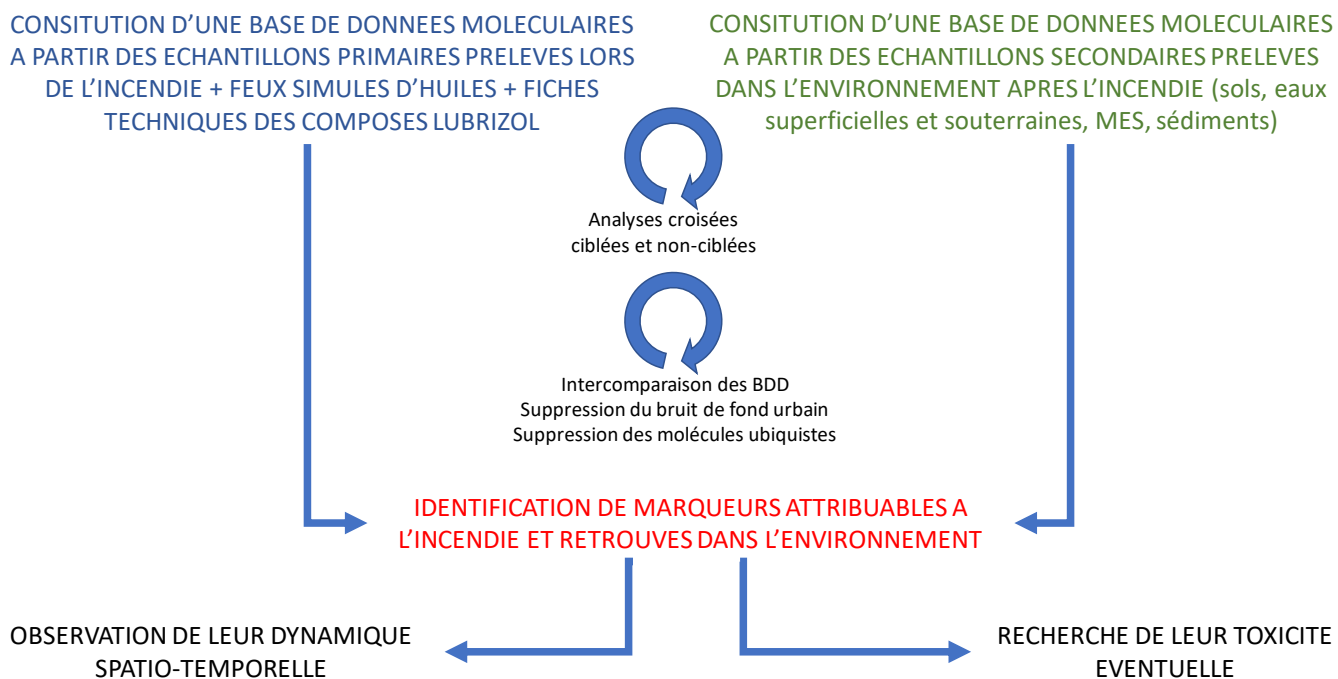


Figure 3 : Constitution de bases des données pour identifier des marqueurs de l'incendie

Tableau 1 : Produits les plus retrouvés en nombre parmi les fiches de sécurité Lubrizol

Nom du produit	Structure ou proposition de structure
zinc bis[O,O-bis(2-ethylhexyl)] bis(dithiophosphate)	
Phosphorodithioic acid, mixed O,O-bis(iso-Bu and pentyl) esters, zinc salts	
Phosphorodithioic acid, mixed O,O-bis(1,3-dimethylbutyl and iso-Pr)esters, zinc salts	
zinc O,O,O',O' -tetrakis(1,3- dimethylbutyl) bis (phosphorodithioate)	
Triphenyl phosphite	
++ O,O,O-triphenyl phosphorothioate	
Reaction products of benzenesulfonic acid, mono-C20-24 (even)-sec-alkyl derivs. Para-, calcium salts	
Benzenepropanoic acid, 3,5-bis(1,1-dimethylethyl)-4-hydroxy-, C7-9-branched alkyl esters	
(Z)-octadec-9-enylamine, C16-18-(even numbered, saturated and unsaturated)-alkylamines	
Reaction products of Benzeneamine, N-phenyl- with nonene (branched)	
Phenol, dodecyl-, branched	
1,3,4-Thiadiazolidine-2,5-dithione, reaction products with hydrogen peroxide and tert-nonanethiol	
Mineral oil, distillates (petroleum), hydrotreated heavy/light paraffinic/naphthenic	C_xH_y
Calcium branched alkyl phenate sulphide (overbased)	
C14-18 alpha-olefin epoxide, reaction products with boric acid	Non trouvé

B. Une stratégie de prélèvement complète

1. Prélèvements atmosphériques

i. Prélèvements d'air

Le jour de l'accident, trois points de prélèvement situés dans l'université de Rouen Pasteur (3 avenue Pasteur 76000 ROUEN, Figure 4 : Lieu de prélèvement de l'air le jour de l'accident (Université Rouen Pasteur et hall de l'université)) ont été choisis, l'un dans l'amphithéâtre 250B au rez-de-chaussée, l'autre sur la passerelle au 1er étage, et le dernier dans le couloir du 4ème étage. À chaque point de prélèvement a été disposé du matériel du prélèvement (Tableau 2).

Localisation des prélèvements

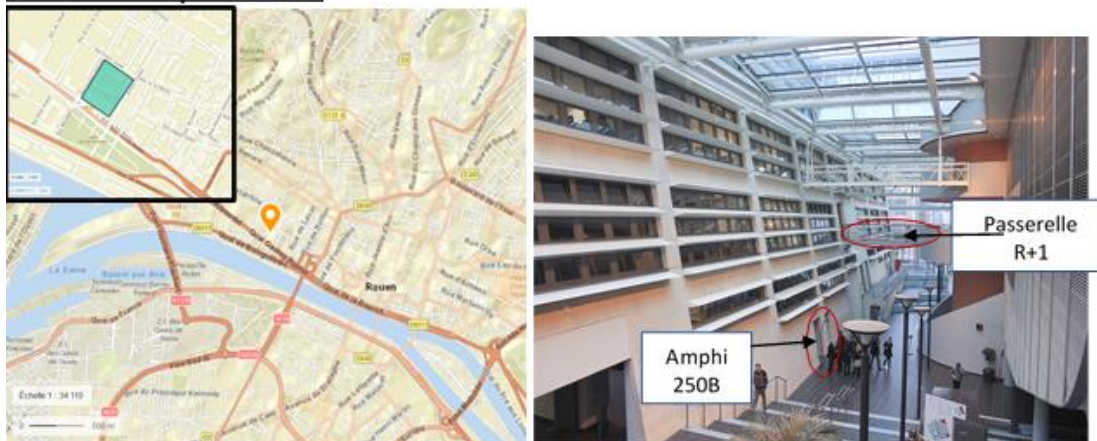


Figure 4 : Lieu de prélèvement de l'air le jour de l'accident (Université Rouen Pasteur et hall de l'université)

Tableau 2 : Échantillons d'air prélevés dans la semaine suivant l'accident (2019)

Nom de l'échantillon	Type et support	Début d'échantillonnage	Fin d'échantillonnage	Localisation dans l'université Rouen Pasteur	
L-ROU-AIR-1	Tube Tenax TA	30/09/2019, 9h	07/10/2019, 14h30	Amphi 250B, RDC	
L-ROU-AIR-2				Passerelle R+1	
L-ROU-AIR-3	Tube Carbopack B&X			30/09/2019, 16h20	Amphi 250B
L-ROU-AIR-4					Passerelle R+1
L-ROU-AIR-5	Twister (PDMS)		Couloir 4ème étage		
L-ROU-AIR-6					
L-ROU-AIR-7					

Des prélèvements aux mêmes endroits avec du matériel issu des mêmes lots ont été réalisés environ 18 mois plus tard (Tableau 3). Après prélèvement, tous les échantillons ont été scellés et stockés à température ambiante jusqu'à analyse.

Tableau 3 : Échantillons d'air prélevés en 2021

Nom de l'échantillon	Type et support	Début d'échantillonnage	Fin d'échantillonnage	Localisation	
L-ROU-AIR-1'	Tube Tenax TA	02/04/2021, 9h15	09/04/2021, 16h45	Amphi 250B, RDC	
L-ROU-AIR-2'				Passerelle R+1	
L-ROU-AIR-3'	Tube Carbopack B&X			02/04/2021, 16h30	Amphi 250B
L-ROU-AIR-4'					Passerelle R+1
L-ROU-AIR-5'	Twister (PDMS)		Couloir 4ème étage		
L-ROU-AIR-6'					
L-ROU-AIR-7'					

ii. *Prélèvements de suies et résidus carbonés issus de l'incendie*

Plusieurs types d'échantillons de suies et résidus carbonés ont été récoltés durant les semaines qui suivirent l'accident : sur des lingettes Kimtech et sur des écouillons stériles, des résidus carbonés récupérés directement sur le sol ainsi que des suies en suspension dans de l'eau. Au total, plus d'une soixantaine d'échantillons de suies ont été collectés. Parmi eux, ceux qui ont été échantillonnés et conservés correctement ont été choisis pour analyse. Le Tableau 4 suivant présente un récapitulatif des échantillons analysés.

Tableau 4 : Récapitulatif des échantillons de suies analysés et localisation de la collecte

Nom de l'échantillon	Type	Date d'échantillonnage	Surface/type	Localisation
L-Bel-1	Résidu carboné	28/09/2019	Zone urbaine	Belvédère - Rouen
L-FdV-1		29/09/2019	Prairie	Fond du Val - Rouen
L-FdV-2				
L-FdV-3				
L-FdV-4				
L-FdV-5				
L-FdV-6				
L-FdV-7				
Suies-Quincampoix	Suies en suspension dans l'eau	29/09/2019	Nappe plastique table de jardin	Quincampoix
Suies-Préaux		29/09/2019	Eau résiduelle jardin	Préaux
L-MSA-SUIE-1	Écouillon	29/09/2019	Tables, paillasse, sorbonnes	Locaux université campus MSA
L-MSA-SUIE-2				
L-MSA-SUIE-3				
L-MSA-SUIE-4				
L-MSA-SUIE-5				
L-MSA-SUIE-6				
L-MSA-SUIE-7				
L-MSA-SUIE-8				
L-ROU-SUIE-1				
L-ROU-SUIE-2				
L-ROU-SUIE-3				
L-ROU-SUIE-3				Blanc
L-ROU-SUIE-3				Locaux université Rouen Pasteur
1191001-musee1	Lingette KIMTECH	01/10/2019	Sur le musée fluvial	Quai bas Rive Droite-Rouen
191001-voiture1			Voiture	Rue du renard, Rouen
191001-voiture2			Voiture	
191001 blanc1			Blanc	Blanc
191003-bac1		03/10/2019	Bac à sable	Le Moulin, Fontaine-sous-Préaux
191003-bac2			Jeux pour enfants	
191003-jouet1			Jeux pour enfants	
191003-sac1			Sac à déchets verts	
191003-poubelle1			Poubelle extérieure	Rue du Mesnil, Isneauville
191003-sac2			Sac extérieur	
191003-ballon 1			Ballon	
191003-ballon 2			Ballon	
191003-ballon 3			Ballon	
191003-toboggan 1			Toboggan	
191003-toboggan 2			Toboggan	
Blanc2			Blanc	

2. Prélèvement d'un échantillon liquide de ruissellement

À la suite de l'incendie, l'inquiétude de la population vis-à-vis des potentielles retombées sur l'environnement et sur la santé humaine a conduit à la formation d'associations dont l'association des sinistrés de Lubrizol (ASL). Ce collectif citoyen a pu récupérer un échantillon provenant du ruissellement des eaux de pluie sur les surfaces 48h après l'incendie, entre la sortie de l'usine Lubrizol et la Darse au bois. L'échantillon, nommé « ASL » a été confié au laboratoire COBRA pour analyse non ciblée par spectrométrie de masse FTICR.

3. Prélèvements des eaux et MES

Afin d'appréhender finement la dynamique spatio-temporelle de transfert des contaminants, 5 stations de mesure en continu ont été déployées au printemps 2021 dans les hydrosystèmes de surface et souterrain impactés par les retombées de suies de l'incendie Lubrizol-Normandie Logistique (Fontaine Nourrice, Cailly, Aubette/Robec, Crevon et Andelle). Ces stations ont permis un suivi haute fréquence (15 minutes) sur 30 mois des flux hydriques, particuliers et dissous.

1. Sites d'étude et collecte des données

Sites d'étude

Les stations de mesures et de prélèvements des eaux et des particules sédimentaires ont été installées en 5 lieux stratégiques du secteur sinistré : à l'embouchure de deux sources majeures (Crevon et Fontaine Nourrice) et à proximité de l'exutoire des trois bassins versants situés sous le panache (Cailly, Andelle et Aubette-Robec). Les sources Fontaine Nourrice (Fontaine-Le-Bourg) et Crevon (St-Germain-Des-Essourts), de type karstique, sont respectivement localisées dans la partie amont des bassins versants du Cailly et de l'Andelle et alimentent les affluents du même nom. La station de mesure de l'Aubette/Robec a été implantée sur le bras mineur du cours d'eau à Darnétal (25 % des flux sortants ; PCM ECOLOGIE, 2022a). Les bassins versant du Cailly, de l'Andelle (736 km²) et de l'Aubette-Robec (149 km²) sont trois affluents du bassin naturel de la Seine (~76 000 km² ; Erreur ! Source du renvoi introuvable.).

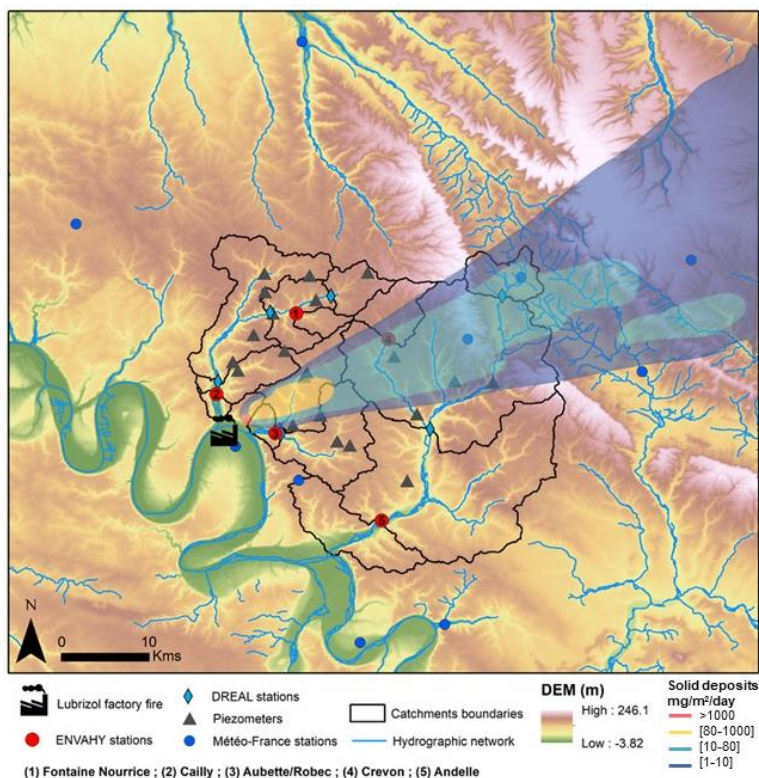


Figure 5 : Replacement sous le panache de l'incendie des 5 sites d'études dans le contexte géographique, topographique, hydrographique et météorologique de la région

Les trois bassins versants ont un relief assez régulier et faible avec des vallées relativement étroites et faiblement pentues. Leur lithologie est caractéristique de celle du Bassin de Paris avec de grands plateaux calcaires recouverts par une couche épaisse de formations superficielles constituée d'argiles, de sable et de loess. Ils sont le siège, du fait de la nature karstique de leur substratum crayeux, d'échanges surface-souterrain importants et rapides. Le modelé karstique du secteur se traduit par l'existence de points d'infiltration (bétoire) en surface, connectés à un réseau souterrain de conduits. Cet ensemble bétoires/conduits karstiques permet l'engouffrement sur les plateaux et la restitution en vallée d'eaux de ruissellement turbides via un ensemble de sources karstiques. Les bétoires, fractures et conduits karstiques sont distribuées de façon très hétérogène dans les bassins versants, induisant des réponses hydro sédimentaires à la pluie hautement complexes et non-linéaires (Jardani et al., 2007). Les sols des trois bassins versants sont principalement des luvisols et podzoluvisols, très sensibles à la battance et à l'hydromorphie (Le Bissonais et al., 1998). Les bassins se caractérisent par un usage des sols majoritairement agricole en amont sur les plateaux et urbain en aval dans les vallées. Le climat est de type océanique tempéré avec des hivers frais et humides et des été chauds et secs. Ce climat induit un régime hydrologique pluvial, caractérisé par des débits forts à la fin de l'hiver et un étiage à la fin de l'été.

Ces bassins versants, bien que partageant un contexte géomorphologique, lithologique, pédologique et climatique commun, possèdent des propriétés physiques uniques et produisent de ce fait des réponses hydro-géochimiques distinctes. La dynamique de restitution des contaminants issus de l'incendie est donc susceptible de varier d'un site à l'autre. Par ailleurs, les cours d'eau des bassins se caractérisent par d'importantes pressions anthropiques, pouvant rendre difficile la différenciation de la pollution liée à l'incendie du bruit de fond anthropique. Les aménagements (vannages, seuils) et les usages de la ressource (AEP, industries, agriculture) ainsi que les interactions nappes/rivières remarquables, susceptibles d'avoir des impacts sur la dynamique hydrologique des sites et le transfert des polluants sont résumés dans le Tableau 5.

Tableau 5 : Sources, aménagements et prélèvements répertoriés durant la période 2017-2021 dans les aires drainées par les 5 stations de mesure.

Sites	Sources amonts	Aménagements amonts	Prélèvements amonts	Prélèvements moyens annuels (m ³)
Fontaine Nourrice (Fontaine-Le-Bourg)	- Source de Fontaine-Le-Bourg	-	-	-
Cailly (Maromme)	- Sources de Saint-Germain-sous-Cailly	-	- Prélèvements AEP à Anceaumeville, Bosc-Le-Hard, Cailly, Clères, Fontaine-Le-Bourg, Maromme, Mont-Cauvaire, Montville, Rue-Saint-Pierre et Sierville. - Prélèvements industriels à Authieux-Ratieville, Bosc-Guerard-Saint-Adrien, Bosc-Le-Hard, Fontaine-Le-Bourg, Frichemesnil, Maromme, Malaunay, Montville et Notre-Dame-De-Bondeville. - Prélèvements agricoles à Authieux-Ratieville	- Prélèvements AEP : 8.41 millions - Prélèvements industriels : 0.50 millions - Prélèvements agricoles : 0.03 millions
Aubette/Robec (Darnétal)	- Sources de Saint-Aubin-Epinay et Branville (Aubette) - Sources de Fontaine-sous-Préaux et Saint-Martin-du-Vivier (Robec)	- Confluence partielle du Robec et de l'Aubette à Darnétal, sous la rue Charles-Benner	- Prélèvements AEP à Darnétal, Fontaine-sous-Préaux, Saint-Aubin-Epinay et Saint-Léger-du-Bourg-Denis. - Prélèvements industriels à Darnétal et Saint-Léger du-Bourg-Denis.	- Prélèvements AEP : 7.45 millions - Prélèvements industriels : ~0.04 millions -> induits des décrochages ponctuels du niveau piézométrique
Crevon (St-Germain-Des-Essourts)	- Source de Saint-Germain-Des-Essourts	-	- Prélèvements AEP à St-Germain-Des-Essourts pour les besoins d'une Cressonnière.	- Prélèvements AEP : ~0.42 millions
Andelle (Radepont)	- Sources de Lorleau, Héronchelles, Serqueux (Pays de Bray) et Saint-Germain-Des-Essourts (liste non exhaustive).	-	- Prélèvements AEP à Blainville-Crevon, Charleval, Fleury-Sur-Andelle, Lisors, Lorleau, Lyons-La-Forêt, Mesnil-Lieubray, Morville-sur-Andelle, Perruel, Radepont, Rouvray-Catillon, Ry, Saint-Germain-Des-Essourts et Sigy-en-Bray. - Prélèvements industriels à Charleval, Longuerue et Lorleau. - Prélèvements agricoles à Val d'Orger.	- Prélèvements AEP : ~4.87 millions - Prélèvements industriels : ~0.52 millions - Prélèvements agricoles : ~0.07 millions

Collecte des données

Un ensemble d'instruments, issu de la gamme de produits proposé par l'entreprise IJINUS, a été mis en place en mai 2021 à chaque station pour le suivi continu à haute fréquence (15 minutes) des paramètres hydrologiques, sédimentaires et chimiques. Cet ensemble comprend :

- (i) Des capteurs hydrostatiques CNR pour la mesure des hauteurs d'eau et l'établissement des courbes de tarage (excepté pour le Cailly et l'Andelle).
- (ii) Des capteurs Doppler UB-V pour la mesure des vitesses d'écoulement (excepté pour le Cailly et l'Andelle).
- (iii) Des capteurs numériques C4E pour la mesure de la conductivité et de la température (sonde CTN) et le calcul de la salinité des écoulements. La conductivité est la capacité d'une eau à transmettre un courant électrique. Elle s'exprime en $\mu\text{S}/\text{cm}$ et dépend de la température, de la nature des ions en solution et de leur concentration. La conductivité permet donc de suivre les évolutions (spatio-temporelles) de teneurs en substances dissoutes, qu'elles soient d'origine naturelle (calcium, magnésium, sodium, potassium) ou anthropique (hydrocarbures, métaux lourds, engrais, eaux usées), et ainsi de détecter tout apport se détachant du bruit de fond. Ainsi, les résidus d'hydrocarbures provenant de la combustion des huiles que contenaient les usines Lubrizol et Normandie Logistique pourront être potentiellement détectés.
- (iv) Des capteurs physico-chimiques NTU pour la mesure de la turbidité (néphélométrie) et de la température (sonde CTN) et le calcul des flux particuliers (MES). La mesure de la turbidité des eaux est motivée par le fait que de nombreux polluants, notamment les hydrocarbures et les métaux lourds, ont tendance à s'adsorber sur les matières en suspension. Ainsi, la connaissance de ce paramètre permettra d'approcher la dynamique de transfert des contaminants sous forme particulières, qu'ils soient issus de l'accident Lubrizol/Normandie Logistique ou non.

Les caractéristiques techniques des mesures continues réalisées au niveau des 5 sites (e.g. technique de mesure, plage de mesure, précision de la mesure) sont résumées dans le fichier « **metadonnees.xlsx** » accompagnant ce rapport.

Un ensemble de données auxiliaires a été récupéré pour valider et compléter le jeu de données. Des données de hauteurs d'eau et de débits acquises par 7 stations de la DREAL situées dans la zone d'étude, ont été récupérées et interpolées toutes les 15 minutes. Des séries journalières de piézométrie ont été extraites de la base de données ADES du BRGM pour 21 piézomètres (9 dans le bassin du Cailly, 7 dans le bassin de l'Aubette/Robec et 5 dans le bassin de l'Andelle ; Figure 5). Les données météorologiques (cumul pluviométrique, température de l'air, nébulosité, visibilité, humidité, point de rosée, Humidex, Windchill, vent moyen, rafales de vent sur 10min et pression), de résolution 15 minutes à 1 heure, ont été récupérées pour 10 stations Météo-France couvrant la zone d'étude (Figure 5). Ces données, qui sont soumises à des procédures de correction et de validation, seront employées pour évaluer la fiabilité de nos enregistrements (hydrologiques et chimiques) et corriger les valeurs lorsque des comportements anormaux sont détectés (cf. Détection des valeurs aberrantes). Elles permettront également de combler les lacunes dans les séries puisque les enregistrements bruts comportent des valeurs manquantes liées au dysfonctionnement des équipements (cf. Correction des valeurs aberrantes et comblement de lacunes). Elles serviront aussi à estimer les débits au niveau des stations de l'Andelle (Radepont) et du Cailly (Maromme), stations pour lesquelles les hauteurs d'eau n'ont pas été mesurées. Les données annuelles sur les prélèvements d'eau ont également été incluses dans la base, les ressources en eau du secteur d'étude étant exploitées à des fins agricoles, industrielles et domestiques.

II. Matériels et méthodes

Détection des valeurs aberrantes

Avant que les données acquises par les sondes puissent être utilisées pour les analyses, il est nécessaire de s'assurer de leur qualité. En effet, les capteurs sont parfois soumis à des conditions environnementales difficiles pouvant affecter la précision de leurs mesures. Les techniques de détection et de correction des erreurs dans les données haute fréquence sont généralement laborieuses et fastidieuses à mettre en place, peu ou pas automatisées, et

reposit souvent sur la subjectivité de l'opérateur. Pour surmonter ces difficultés, une approche semi-automatique, heuristique et statistique, basée sur celle de Jones et al (2022), est mise en œuvre pour valider les données acquises par les capteurs in situ.

Jaugeage et construction des courbes de tarage

Pour diverses raisons, la mesure directe et continue du débit est assez difficile, et l'enregistrement du niveau d'eau à l'aide d'enregistreurs automatiques, comme c'est le cas pour trois des cinq sites d'étude (Fontaine Nourrice, Crevon et Aubette/Robec), lui est préféré (cf. **Collecte des données**). La mesure ponctuelle du débit par jaugeage permet ensuite d'élaborer une courbe de tarage, c'est-à-dire une expression mathématique reliant le niveau d'eau au débit. La plupart du temps, cette expression mathématiques prend la forme suivante en raison de sa base théorique solide (équation 2 ; Lee et al., 2021) :

$$Q = C(h - a)^n \quad (\text{équation 2})$$

où C et n sont des constantes (-), Q est le débit (m^3/s), h la hauteur d'eau (m) et a la hauteur d'eau de référence pour laquelle le débit est nul (m). La spécification de a est nécessaire lorsque le zéro de la sonde limnimétrique ne coïncide pas avec un débit nul. Traditionnellement, des modèles linéaires ajustés sur des données logarithmisées sont utilisés pour obtenir ces courbes. Cependant, cette approche rend impossible l'estimation du coefficient a à partir des seuls couples de points Q et h . Ainsi, pour cette étude, l'estimation de a , ainsi que des constantes C et n , s'est faite par le biais d'une méthode plus récente et plus souple, la méthode des moindres carrés non linéaires.

Les jaugeages, menés sur les périodes avril-mai 2023 et septembre-novembre 2023, se sont appuyés sur deux techniques d'exploration du champ de vitesses : (i) le jaugeage avec le vélocimètre acoustique Flowtracker sur perche (ADV) de SonTek et (ii) le jaugeage avec le profileur acoustique Doppler StreamPro de RDI déployé selon la méthode mobile (ADCP). Ces deux appareils à ultrasons réalisent des mesures de vitesse d'écoulement par effet Doppler dont le principe est le suivant. Des impulsions ultrasonores sont émises par les transducteurs de l'appareil, et ré-émises par les particules en suspension dans l'eau. La vitesse d'écoulement est mesurée par effet Doppler, en évaluant le déphasage entre les impulsions émises et reçues par les transducteurs. Ces appareils sont également équipés de sondes de température pour permettre le calcul de la vitesse de propagation du son dans l'eau.

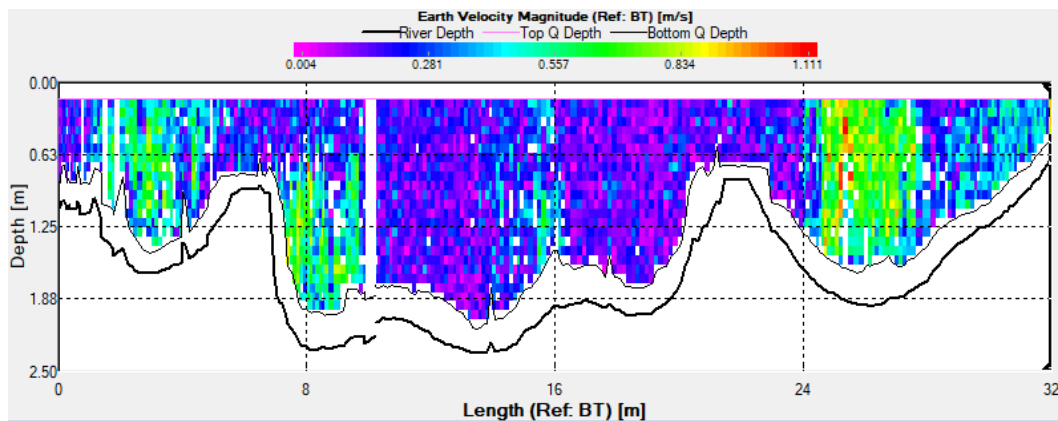


Figure 6 : Exemple d'un profil de vitesse ADCP obtenu le 17/11/2023 à proximité de la station de l'Andelle

Pour les sites de l'Andelle et du Cailly, où il n'y a pas de mesure continue de hauteurs d'eau, les débits ont été obtenus en établissant des relations entre les mesures ponctuelles de débit et les enregistrements continus de débits des stations amonts les plus proches (Vascœuil pour l'Andelle et Notre-Dame-De-Bondeville pour le Cailly ; Figure 5). De simples modèles de régression linéaires ont été considérés pour représenter les relations entre les variables. Afin de tenir compte du temps de déplacement des écoulements entre les stations de mesure, les enregistrements à Vascœuil et Notre-Dame-De-Bondeville ont été préalablement reculés de 3.75 et 0.5 heures respectivement. Ces temps de retard ont été estimés à partir de la distance séparant les stations (17339 et 1805 m) et la vitesse moyenne des écoulements mesurées lors des jaugeages (1.28 et 1.09 m/s).

III. Conclusion

Ces quelques pages ont permis d'introduire les données environnementales considérées dans le cadre des projets CIPHERL et ENVAHY pour appréhender le devenir dans l'environnement des contaminants issus de l'incendie des usines Lubrizol et Normandie Logistique.

La base de données est composée d'une part de données hydrologiques et chimiques acquises par 5 nouvelles stations de mesure déployées depuis mai 2021 dans les hydrosystèmes impactés par les retombées de suies. Les données disponibles pour ces sites sont les hauteurs d'eau, les vitesses d'écoulement, la température de l'eau, la turbidité et la conductivité. Les séries chronologiques sont disponibles à une résolution temporelle de 15 minutes. Ces données ont été soumises à des procédures de validation et d'évaluation méthodiques, afin de s'assurer de leur qualité. La détection des valeurs aberrantes ou douteuses s'est faite en utilisant conjointement des règles de filtrage, une analyse visuelle des chroniques et le deep-learning (BiLSTM). Ces approches se sont appuyées sur des séries temporelles de référence : (i) séries chronologiques de débit et de hauteur d'eau pour 7 stations DREAL de la zone d'étude, (ii) données piézométriques issues de 21 piézomètres et (iii) données météorologiques (cumul pluviométrique et température de l'air notamment) pour 10 stations Météo-France. Ces séries ont été rééchantillonnées à une résolution temporelle de 15 minutes avant leur ajout dans la base de données.

L'approche heuristique a permis de supprimer les valeurs manquantes et les valeurs se situant en dehors de la gamme de mesure des capteurs. L'analyse visuelle et comparative des chroniques a révélé l'existence de ruptures ou dérives dans les hauteurs d'eau notamment, pouvant être liées à des phénomènes d'encrassement ou d'enfouissement des capteurs par des débris. La correction de ces anomalies s'est faite en appliquant des coefficients de compensation, constants ou variables dans le temps. Enfin, l'emploi du modèle de deep-learning BiLSTM a permis de repérer, bien qu'en faible nombre, les valeurs aberrantes localisées. L'ajustement des paramètres du modèle pourrait être envisagée pour détecter un plus grand nombre d'anomalies.

Le modèle BiLSTM a aussi été utilisé pour corriger les données anormales et combler les lacunes. Ses performances ont été comparées à celles de 11 autres méthodes pour les variables Hauteur d'eau et Température de l'eau. Il ressort de ces analyses que le modèle BiLSTM produit les meilleurs résultats notamment pour la variable Hauteur d'eau. Ce modèle peine tout de même à reproduire précisément la dynamique hydrologique des sources (Fontaine Nourrice et Crevon). Il a malgré tout été employé pour la reconstruction des valeurs manquantes des séries restantes, à défaut d'un modèle prédictif plus satisfaisant.

L'estimation des débits pour chacune des 5 stations de mesure s'est faite en établissant des relations avec les hauteurs d'eau ou les débits des stations voisines. La construction de ces relations a nécessité la mise en œuvre de plusieurs campagnes de jaugeage, menées principalement durant le printemps et l'automne 2023. L'ajustement des lois puissance ou linéaire a été précédé d'une analyse des nuages de points afin d'éliminer les points aberrants.

4. Prélèvement des sols et sédiments

8 sols d'étude ont été prélevés, à Préaux (dans 1 champ cultivé par du maïs et 1 champ sans culture), Fontaine sous Préaux (1 champ sans culture), Isneauville (1 champ sans culture), Quincampoix (1 champ cultivé) et Petite Bouverie (prairie non cultivée), car ils étaient situés sous le panache de fumées lors de l'incendie Lubrizol et à moins de 12 km de la source d'émission. Parmi ces 8 sols, celui de la Petite Bouverie avait été collecté et conservé par le laboratoire ECODIV 4 mois avant l'incendie, puis il a été à nouveau prélevé 4 mois puis 9 mois après l'incendie. Ils serviront donc de comparaison pour évaluer un éventuel impact de l'incendie. Les autres sols ont tous été collectés 3 à 4 mois après l'incendie.

Une carotte sédimentaire a été prélevée dans la darse aux Bois à proximité immédiate du site Lubrizol en mars 2023 dans la partie techniquement échantillonnable par son accès et la présence de sédiments non remaniés par les hélices des bateaux (Figure 7). Elle a été sectionnée en section de 10 cm, telles que présentées en Figure 7. Chaque section a été analysée, et compte-tenu d'un modèle d'âge approximatif, il est fort probable que les sections 40-50 cm et 50-60 cm aient reçu les effluents liquides ayant ruisselé pendant l'incendie et peu après, à cause des précipitations les jours suivants et du débordement des eaux d'extinction. En effet, la carotte fait 70 cm de

profondeur et le curage de la darse a eu lieu en 2018, tandis que le prélèvement a été fait en mars 2023. Si on estime que le remplissage a été régulier, on peut en déduire la profondeur de sédiment qui a reçu les effluents de l'incendie Lubrizol en septembre 2019 (Figure 7).

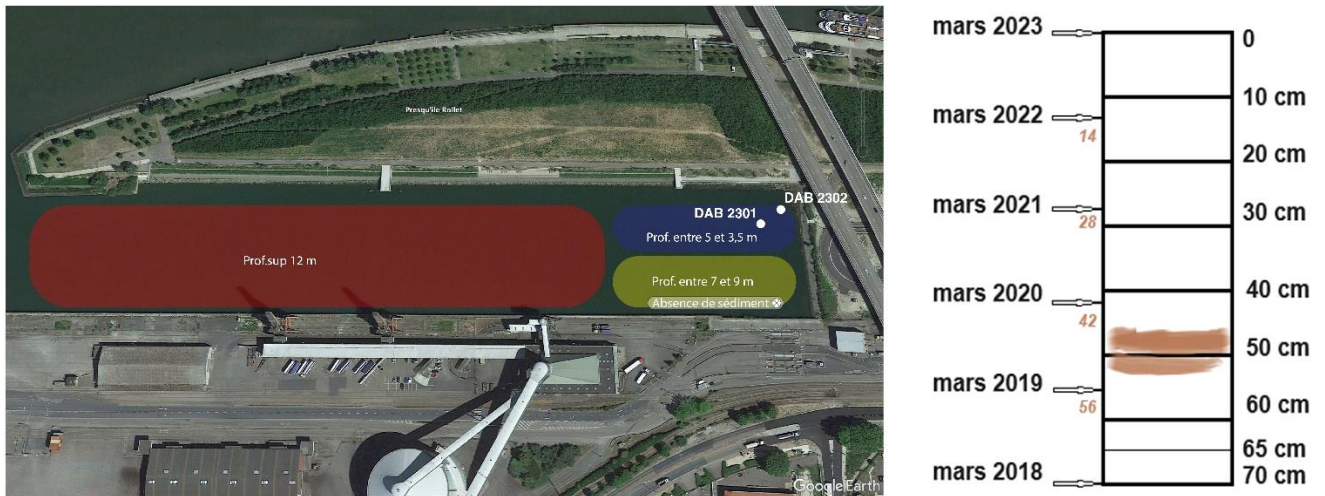


Figure 7 : Localisation du prélèvement de la carotte sédimentaire de la darse aux bois et schéma des différentes sections en foncé : sections ayant probablement reçu les effluents contenant les retombées issues de l'incendie

C. Mise au point d'une stratégie analytique pour les incendies en enceinte confinée de laboratoire

1. Description de l'enceinte confinée de laboratoire et mise en œuvre

De grandes quantités de matière particulaire et de gaz ont été émises lors de l'incendie Lubrizol et Normandie Logistique avec des signatures moléculaires probablement inhabituelles par rapport aux émissions générées de manière chronique, que l'on peut qualifier de contamination « habituelle » de l'atmosphère (qui constitue le fond de la ville de Rouen, suivi par Atmo Normandie). Cependant, nous avons peu de connaissances sur la composition des suies et gaz générés par la combustion d'additifs de lubrifiants, comme ceux ayant brûlé lors de l'incendie. Par conséquent, et en absence des produits natifs de Lubrizol, des essais de combustion ont été réalisés dans une enceinte confinée de laboratoire à partir d'huiles minérales sans additifs et d'huiles pour moteurs contenant des additifs (susceptibles de contenir des molécules identiques à celles produites sur le site de l'usine Lubrizol), afin de déterminer des familles moléculaires spécifiques générées lors de la combustion.

i. Dispositif expérimental

Tous les essais ont été effectués dans les mêmes conditions au laboratoire CORIA. L'enceinte utilisée est une enceinte fermée calorifugée de 1 m³, déjà utilisée pour des travaux antérieurs (Figure 8).

Dispositif de combustion confinée et mécaniquement ventilé

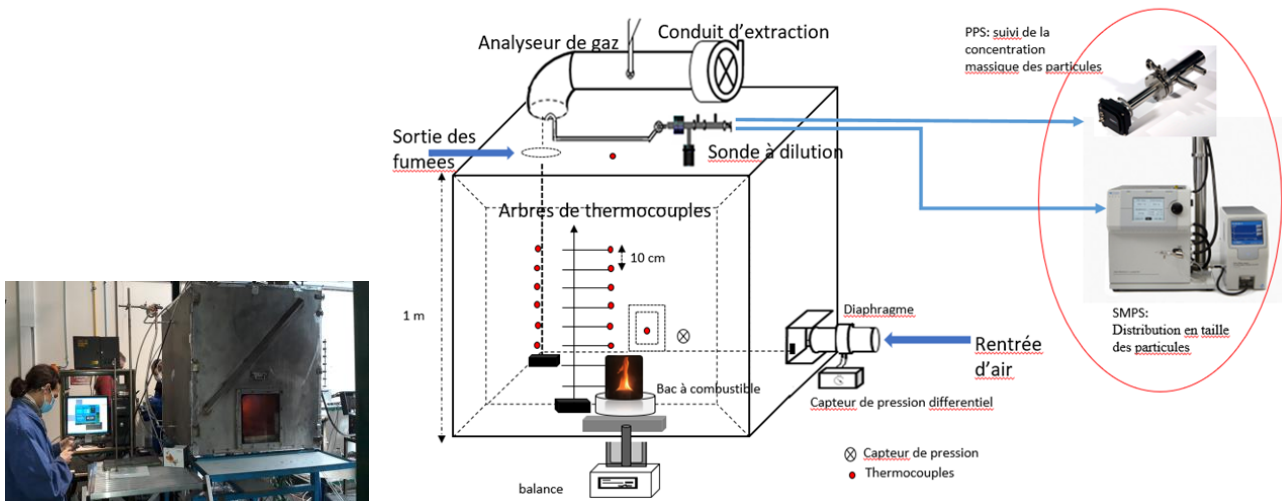


Figure 8 : Enceinte de combustion (1 m³) permettant de simuler un feu (photo et schéma de l'installation)

L'enceinte est munie d'un extracteur au sommet et d'une entrée d'air calibrée à la base. Des capteurs sont installés au niveau de l'extracteur afin de mesurer les gaz contenus dans les fumées. La vitesse de l'extracteur est réglée pour ajuster la ventilation de la chambre, c'est à dire à une valeur désirée du renouvellement horaire RH (1 fois par heure). Une sonde à dilution est installée en haut de la face arrière de la chambre, pour mesurer la concentration massique et la taille des particules contenues dans les fumées, grâce à des équipements PPS (système de mesure en temps réel de la concentration en particules) et SMPS (spectromètre de mobilité électrique mesurant la distribution de taille des particules, y compris les nanoparticules).

Deux arbres de thermocouples permettent l'acquisition des températures pendant la combustion. Le premier est placé dans l'angle postérieur gauche de l'enceinte, le premier thermocouple est situé à 10 cm du bas de la chambre, puis les autres sont espacés de 10 cm. Le second est positionné à la verticale du récipient et de la balance. Le premier thermocouple est placé à 20 cm du sol afin d'arriver au-dessus du bord du récipient, puis les autres sont espacés de 10 cm.

Les produits à brûler sont versés dans un récipient de 19 cm de diamètre placé sur une balance au centre de l'enceinte. Toutes les huiles, avant combustion, sont préchauffées à 200°C afin de faciliter leur inflammation. Une fois le produit enflammé, l'enceinte est fermée hermétiquement.

ii. Conditions expérimentales

Différentes références d'huiles ont été préalablement caractérisées par APCI(+) et ESI(-) FTICR MS au laboratoire COBRA afin de choisir celle ayant un maximum de composés similaires à ceux ayant brûlé lors de l'incendie du site Lubrizol. Deux carburants ont été finalement choisis pour les essais de combustion : une huile minérale brute de bonne qualité sans additif et une huile lubrifiante pour automobile additivée d'un mélange anti-usure, les additifs étant susceptibles de correspondre aux produits fabriqués et commercialisés par Lubrizol.

La combustion des deux types d'huile s'est déroulée dans les mêmes conditions. La pompe de l'extracteur a été calibrée de façon à obtenir le renouvellement (RH) du caisson de 9 fois par heure, ce qui revient à un débit d'extraction de l'air de 2,5 L/s. On a utilisé respectivement 250 g à 300 g de produit afin d'obtenir une durée de combustion de l'ordre de 30 min, temps nécessaire à l'exposition des cellules épithéliales dans le dispositif expérimental Vitrocell du laboratoire ABTE.

Différents systèmes ont été greffés en sortie de l'enceinte de combustion afin de récupérer les fractions gazeuses, solides (suies), et d'exposer directement des cellules épithéliales pulmonaires aux effluents (Figure 9).

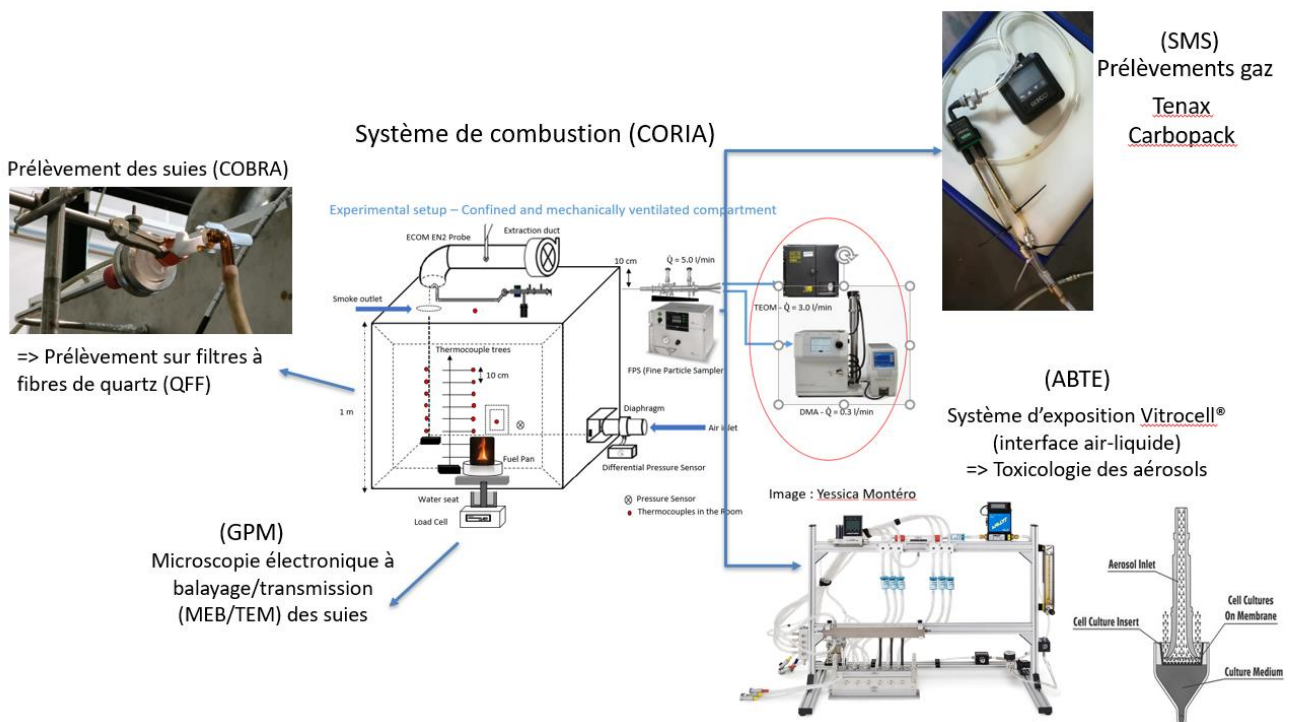


Figure 9 : Description de l'enceinte de combustion équipée de capteurs et de systèmes de prélèvement des effluents solides et gazeux

Les suies ont été récupérées sur des filtres à fibre de quartz : l'un était positionné en sortie de l'enceinte, l'effluent de sortie passant à travers le filtre à l'aide d'une pompe (mode actif) ; l'autre filtre était positionné à l'intérieur de l'enceinte, et les suies étaient récoltées par simple dépôt sur la surface des filtres (mode passif). Une autre dérivation du flux sortant de l'enceinte a permis de prélever la fraction gazeuse, sans particule, à l'aide de différents tubes d'adsorption. Enfin, un système d'exposition de cellules au flux de sortie a été installé : le système Vitrocell.

2. Contact avec des cellules pulmonaires

i. Culture cellulaire

Les cellules épithéliales bronchiques humaines BEAS-2B (ATCC® CRL-9609™, ECACC 95102433) ont été ensemencées dans des inserts Transwell de 1,12 cm² et incubées à 37 °C dans une atmosphère contenant 100 % d'humidité et 5 % de CO₂, avec un milieu de culture LHC-9 (Gibco, Thermo Fisher Scientific) sur les côtés basal et apical. Le système Vitrocell® à l'interface Air-Liquide (IAL) (Vitrocell GmbH, Allemagne) a été utilisé pour réaliser l'exposition cellulaire (Figure 10). L'appareil est composé de deux modules en acier inoxydable 12/3 CF : un pour l'exposition au flux de combustion d'huile et un pour l'exposition à l'air filtré. Les modules contiennent chacun 3 inserts Transwell et ont été maintenus à une température de 37°C avec un circuit d'eau chauffée. Avant chaque expérience, le milieu de culture apical a été retiré et les cellules BEAS-2B ont été exposées aux fumées pendant 35 minutes. Ensuite, le contrôle filtré à l'air et les inserts exposés aux aérosols ont été placés dans l'incubateur dans des conditions IAL pendant 3 ou 24 heures. En parallèle, 3 inserts ont été utilisés comme témoins et conservés dans l'incubateur sans exposition.

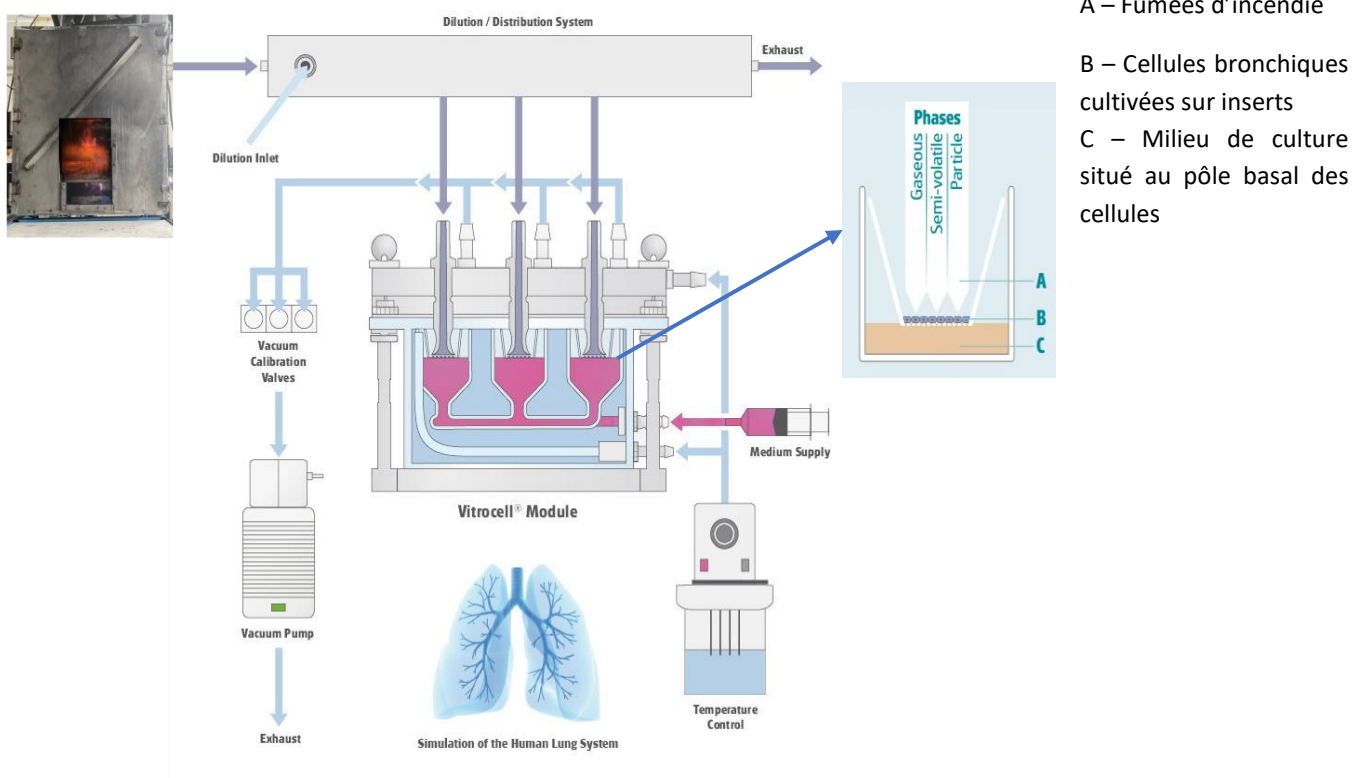


Figure 10 : Schéma d'exposition à l'interface Air-Liquide (système Vitrocell®)

III. RESULTATS

A. Simulation chronologique de la dispersion et du rabattement des particules présentes dans le panache de fumées

1. Contexte et Objectifs

L'objectif de cette sous tâche était de réaliser un calcul permettant de simuler la chronologie de la dispersion du panache de fumées de l'incendie de l'usine Lubrizol - Normandie Logistique de Rouen du 26 septembre 2019. Pour y répondre, nous avons choisi de réaliser une simulation aux grandes échelles (ou Large Eddy Simulation) avec le code de calcul YALES2 développé au laboratoire CORIA¹. Celui-ci résout les équations de Navier Stokes instationnaires 3D dans des géométries complexes. Il est massivement parallèle et capable de prendre en compte une grande variété de physiques (rayonnement, écoulement multiphasique, ...).

Pour traiter la problématique de la dispersion de polluants issus d'un incendie industriel, divers phénomènes physiques doivent être pris en compte. Ils sont représentés schématiquement sur la Figure 11. Le plus évident est le vent, qui influence majoritairement la direction de propagation des fumées. Ainsi, la modélisation du profil de vent incident et de la turbulence atmosphérique sont des paramètres de première importance pour ce type de calcul. La source des polluants (composition, température) est aussi primordiale, car elle pilote les phénomènes convectifs (élévation des gaz brûlés et dans l'atmosphère). Enfin, la topographie autour de l'incendie peut modifier l'écoulement et influencer la dispersion du panache de fumées et des polluants transportés.

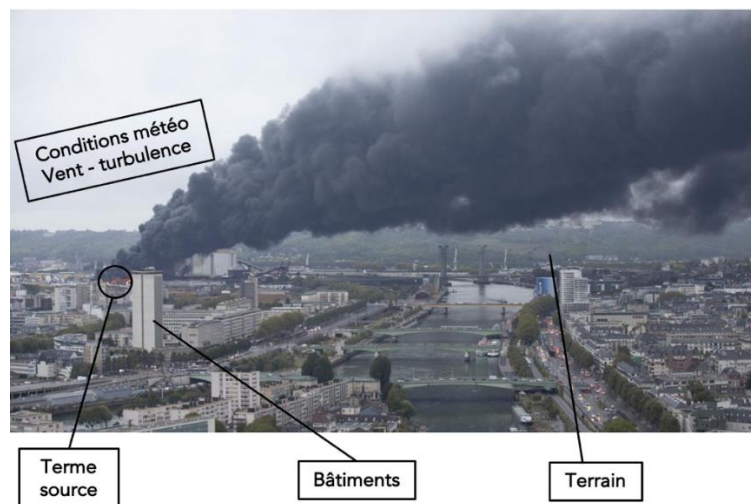


Figure 11 : Représentation schématique des phénomènes physiques à modéliser dans le cas d'une étude sur la dispersion de polluants

2. Résultats et analyses

Le coût de calcul nécessaire à l'obtention des résultats pour un des points de fonctionnement analysés dans la suite est résumé dans le Tableau 6.

Tableau 6 : Performances de calcul pour un point de fonctionnement

Super-calculateur	Myria
Architecture	CPU intel Xeon
Nombre de coeurs utilisés	112
Nombre d'heures de calcul	72h
Équivalent en heure CPU	8100
RCT moyenne	150 μ s/itération/noeuds
Temps physique simulé	3 615s

¹ <https://www.coria-cfd.fr/index.php/YALES2>

i. Comparaisons qualitatives

Dans un premier temps, nous avons réalisé une comparaison qualitative entre l'évolution du panache obtenu dans notre calcul et celui aperçu dans la réalité (Figure 12). Le comportement général que nous pouvons noter est tout à fait cohérent avec les observations réalisées le jour de l'accident. Ainsi, le panache est assez rabattu par les vents. De même, les quartiers survolés concordent avec ceux qui le furent dans la réalité. Si l'on s'intéresse désormais la zone d'injection des fumées, on peut observer la présence de deux structures distinctes (Figure 13). Celles-ci sont peut-être précurseuses de la séparation du panache en deux brins observée le jour de l'incendie, Figure 14. Cette analyse devra être confirmée ou infirmée en augmentant la distance maximale de simulation en aval de l'écoulement et en densifiant davantage le maillage autour du panache.

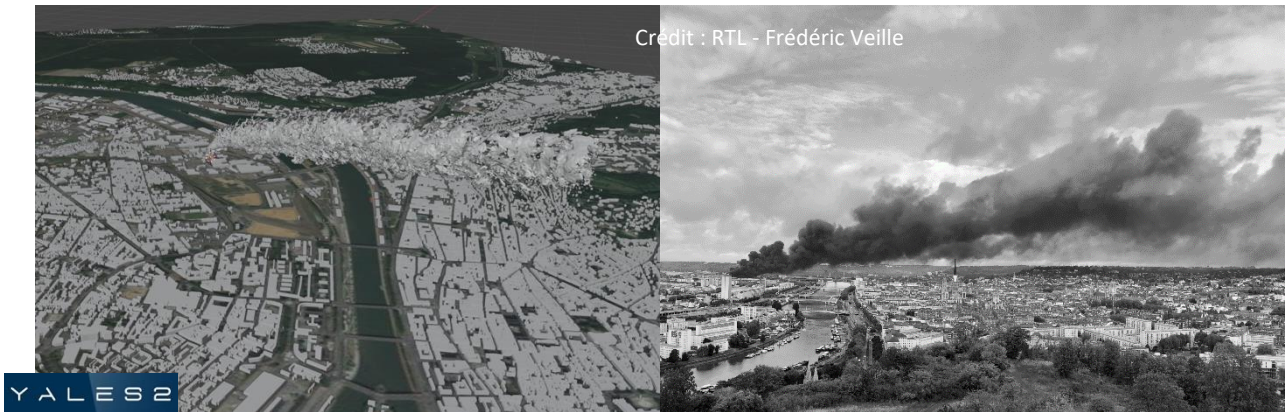


Figure 12 : Comparaison qualitative des panaches numérique et réel

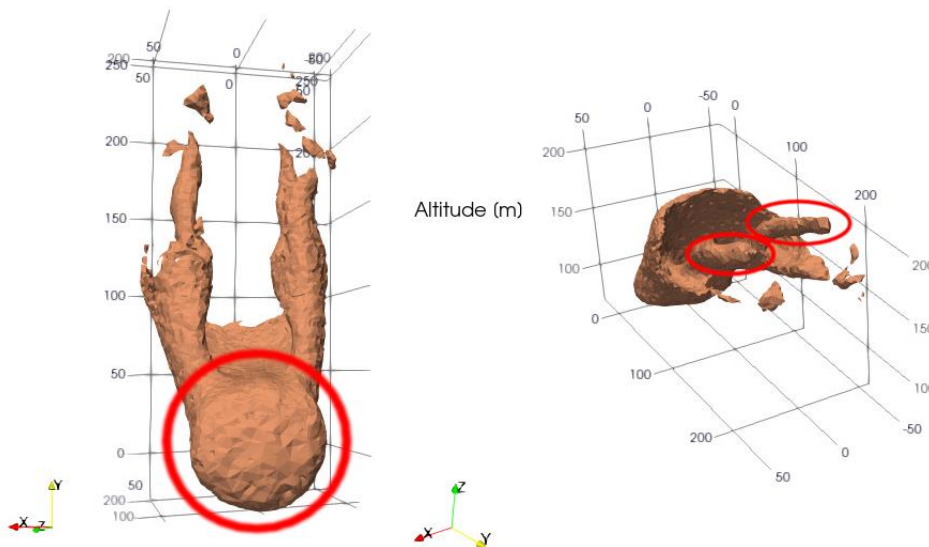


Figure 13 : Visualisation des deux structures au niveau de la source d'injection des fumées



Figure 14 : Photo du panache le jour de l'incendie

ii. Estimation de la trajectoire

Pour une comparaison plus quantitative, nous avons également estimé l'altitude du panache. Après environ 1h de temps physique simulé, on représente un isocontour de la valeur instantanée du scalaire Z défini dans la section précédente (ligne bleue) ainsi qu'un isocontour de la valeur moyenne de Z (ligne noire) (Figure 15). Cette figure nous permet de visualiser l'altitude du panache en fonction de la distance au point d'injection des fumées. Les observations qualitatives réalisées précédemment sont confirmées ici : la trajectoire devient assez rapidement quasi-horizontale.

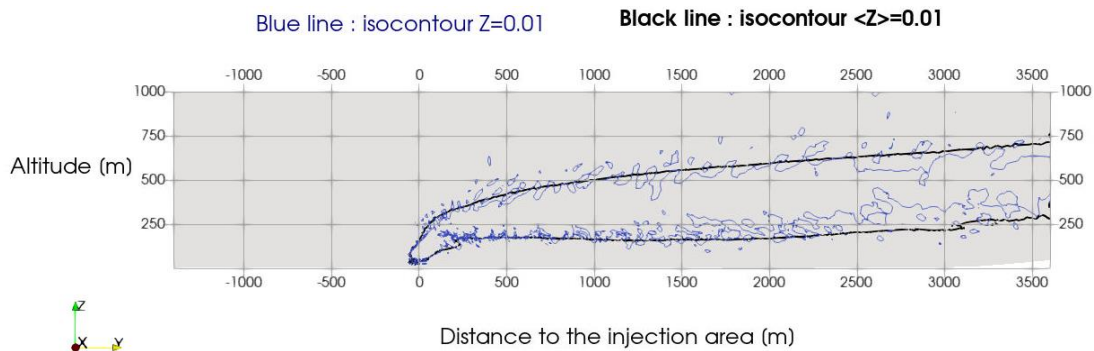


Figure 15 : Vue en coupe dans le plan X=0m

On peut également estimer l'altitude maximale du panache qui se stabilise aux environs de 700m (3500m en aval de l'incendie dans la direction de propagation) pour une épaisseur verticale moyenne de 400m. Cette valeur de l'altitude est supérieure à celle d'environ 400m rapportée par les pompiers². Nous attribuons cette surestimation à la valeur de puissance de l'incendie que nous avons sélectionné pour ce premier calcul (puissance maximale). Or cette puissance n'a été atteinte que pour une durée limitée comparativement à la durée totale de l'incendie. Nous avons donc réalisé le même calcul mais cette fois ci en dimensionnant le terme source pour une puissance moyenne de l'incendie. Afin de nous affranchir de la valeur de l'isocontour choisi pour Z, nous avons également adapté une méthode de calcul de trajectoire basée sur le maximum du gradient de Z^3 et utilisé celle-ci pour valider nos résultats précédents et estimer la nouvelle altitude du panache à cette puissance moyenne (Figure 16). Cette fois -ci, l'altitude maximale obtenue (d'environ 475m) est tout à fait cohérente avec les observations des pompiers.

² Colone J.Y. Lagalle rapporté par France Inter

³ C. GARCIA GUILLAMON, ICLASS 2021

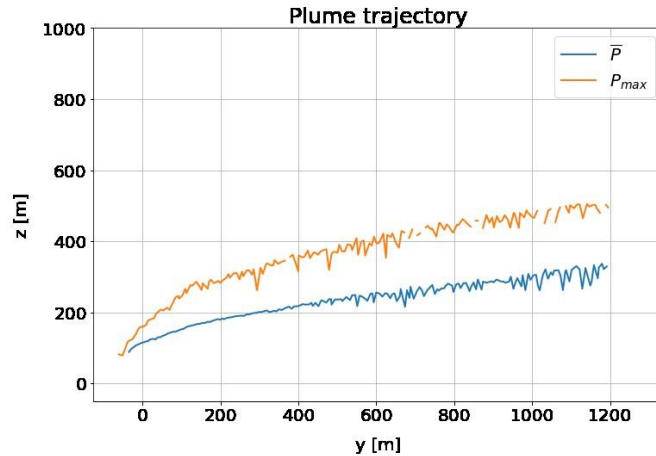


Figure 16 : Estimation de l'altitude du panache pour un terme source dimensionné sur la puissance maximale P_{max} et pour la puissance moyenne \bar{P}

iii. Influence de la topographie

On cherche maintenant à évaluer la capacité de notre simulation à reproduire l'influence de la présence d'un relief sur la propagation du panache turbulent. Pour cela, on trace les composantes longitudinale U_y et verticale U_z de la vitesse du panache dans une coupe le long de la direction de propagation (y) (Figure 17). Dans la zone géographique correspondant aux Hauts de Rouen ($y=3500$ m), la vitesse horizontale diminue en raison de l'obstacle représenté par le relief. Cette perte de vitesse horizontale est au moins partiellement compensée par une augmentation de la vitesse ascensionnelle dans cette zone (cf lignes de courant Figure 17). Cette initiation de la déviation de la trajectoire du panache est encore plus visible lorsque l'on représente une coupe transverse du panache à la position $y=3500$ m (Figure 18). Pour délimiter le panache, on s'appuie sur un scalaire Z qui indique le taux de présence des fumées (*ie* $Z=0$ reflète l'absence de fumées et $Z=1$ l'absence d'air ambiant). Les valeurs entre ces deux extrêmes reflètent le mélange entre l'air ambiant et les fumées. La représentation des isocontours des valeurs moyennes et instantanées de Z , nous permet de remarquer que le panache est légèrement excentré et semble dévié vers le Nord-Est.

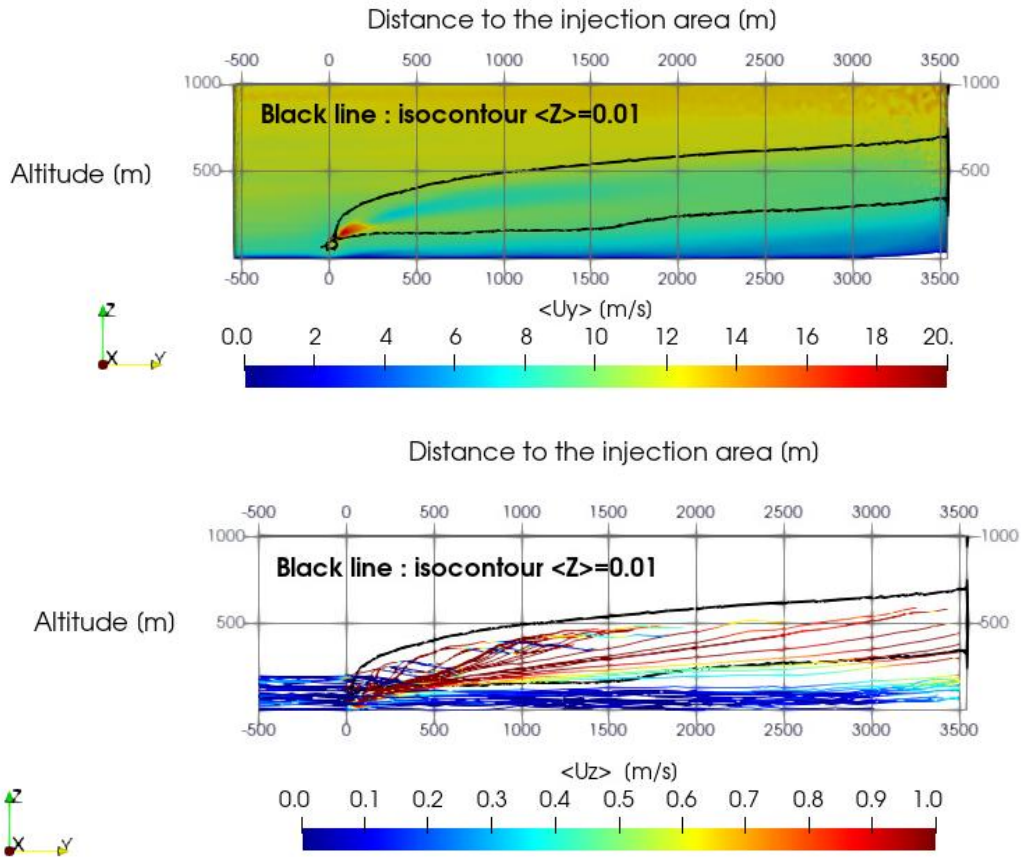


Figure 17 : Influence de la topographie sur les vitesses. Composante horizontale de la vitesse U_y (haut) et Composante verticale de la vitesse U_z (bas)

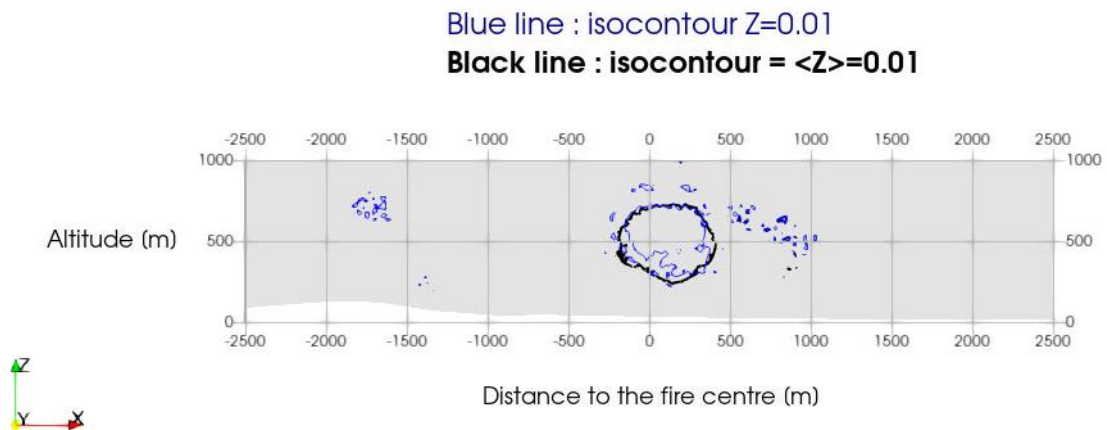


Figure 18 : Vue en coupe dans le plan Y=3500m de l'isocontour instantanée du scalaire Z (ligne bleue) et de sa valeur moyenne (ligne noire)

Il serait intéressant d'investiguer plus en profondeur notre capacité à capturer le changement de trajectoire du panache induit par la topographie sur des distances plus longues. Par exemple, en prolongeant le domaine de calcul pour des $y > 3500\text{m}$, on s'attend à observer une élévation du panache à l'approche du relief et à une modification de sa trajectoire.

3. Conclusions et perspectives

Dans cette tâche nous avons mis en œuvre des simulations aux grandes échelles pour étudier la propagation du panache issu de l'incendie Lubrizol-Normandie Logistique. Il est important de rappeler que de manière générale, les situations accidentelles comme celle-ci sont peu documentées, et que les grandeurs physiques qui permettent de définir le terme source sont très compliquées à obtenir avec exactitude lors d'un

accident. Bien-sûr, le terme source est capital et influence fortement les résultats. C'est pourquoi, il nous faut être précautionneux quant à l'interprétation de ceux-ci. Néanmoins, ces résultats sont satisfaisants dans la mesure où les analyses tant qualitatives que quantitatives semblent concorder avec les observations réalisées le jour de l'accident.

Cette étude étant la première du genre dans l'équipe, il existe de nombreuses perspectives d'amélioration plus ou moins immédiates de notre méthodologie. On peut évoquer par exemple une variation temporelle du terme source ou encore des conditions de vent. L'adaptation dynamique de maillage quant à elle nous permettrait de capter plus de physique et d'agrandir le domaine de calcul sans trop augmenter le temps de calcul. Enfin, il sera intéressant d'estimer les capacités prédictives en termes de concentration de polluants de notre solveur en confrontant notre calcul à des mesures expérimentales. Ceci nécessitera de repenser notre méthodologie, puisque jusqu'ici les fumées ont été modélisées par un scalaire unique ce qui ne nous permet pas de connaître la concentration de polluants.

B. Imprégnation des cheveux en HAP et métaux

1. Contexte et objectif

Les analyses effectuées pendant les journées du 26/09 et 27/09 par le SDIS et Atmo Normandie ne montraient aucune valeur significative en dehors d'un point ayant révélé la présence de benzène sur le site même. Les mesures réalisées par Atmo Normandie à la suite de l'évènement montraient également un indice de qualité de l'air comparable à celui d'avant l'incendie pour l'agglomération rouennaise, avec la réserve importante que ces analyses portaient sur les polluants usuellement mesurés, ce qui ne couvrait pas de nombreux composés organiques volatiles, des hydrocarbures aromatiques polycycliques, les polychlorodibenzodioxines ou de nombreux métaux, émis lors de l'incendie⁴. La demi-vie de nombreux polluants potentiellement émis lors de cet incendie ne permet pas, à distance, de rechercher dans les liquides biologiques (sang, urines) les substances mères ou leurs métabolites ce qui limite fortement l'évaluation du risque sanitaire. Toutefois, ceci ne s'applique pas aux dioxines, qui ont des demi-vies de plusieurs années, et à la matrice « cheveux », qui permet une analyse rétrospective de nombreux polluants, minéraux ou organiques.

Le cheveu constitue une excellente matrice biologique pour déterminer si un sujet a été exposé à un polluant, sachant que 1 cm de cheveu correspond généralement à un mois d'exposition des contaminants recherchés. Cependant si ce procédé ne permet pas d'évaluer la quantité de chaque polluant à laquelle la personne a été exposée, il permet de lister les produits auxquels la personne a été exposée, d'évaluer la période d'exposition et d'envisager un suivi et une surveillance particulière, si besoin. On dispose de données sur la présence d'HAP ou de leurs métabolites dans les cheveux d'enfants vivant à Paris ou sur l'île d'Yeu (Palazzi, 2019⁵) ou dans les cheveux de femmes chinoises (Palazzi, 2018⁶), ainsi que l'identification de polluants organiques persistants dans cette matrice (Iglesias-González, 2020⁷).

L'analyse des métaux et hydrocarbures aromatiques polycycliques dans les cheveux de personnes exposées aux diverses substances émises lors de l'incendie et des suites de celui-ci avait pour objectif de quantifier l'imprégnation de ces personnes à ces contaminants. Ces personnes ont été recrutées dans la région rouennaise, dans une zone d'habitation et/ou de travail située dans le panache des fumées. Le mode de recrutement est passé par le centre d'aide médicale à la procréation du CHU de Rouen, habilité à faire des prélèvements et menant une recherche sur l'impact de l'incendie de Lubrizol sur la fertilité dans le cadre d'un autre projet de recherche.

Il a été fait un dosage de 6 métaux (cadmium, chrome, mercure, plomb, vanadium et zinc) par ICP-MS avec élimination des interférences spectrales polyatomiques par le biais de la chambre de réaction dynamique (Dynamic Reaction Cell ou DRC). L'analyse a été réalisée dans le laboratoire du Pr Pascal KINTZ, au CHU de Strasbourg. Il a été fait un dosage des HAP et métabolites par GC-MS selon la méthode précédemment décrite (Palazzi, 2018). L'analyse a été réalisée dans le laboratoire du Dr Brice APPENZELLER (Human Biomonitoring Research Unit, 1A-B, rue Thomas Edison, 1445 Strassen, Luxembourg). Les paramètres analysés sont :

2. Résultats

Au total, 13 personnes ont été incluses, la survenue de la pandémie du COVID ayant mis un coup d'arrêt aux consultations dans le centre de prélèvement (service d'aide à la procréation médicalement assistée). La description de la population concernée est présentée dans le Tableau 7 et les résultats des analyses dans le Tableau 8 et le Tableau 9.

⁴ Rapport bureau Veritas D-031019-10365 du 3 octobre 2019.

⁵ Palazzi P, Hardy EM, Appenzeller BMR. Biomonitoring of children exposure to urban pollution and environmental tobacco smoke with hair analysis - A pilot study on children living in Paris and Yeu Island, France. *Sci Total Environ*. 2019 May 15;665:864-872.

⁶ Palazzi P, Mezzache S, Bourokba N, Hardy EM, Schritz A, Bastien P, Emond C, Li J, Soeur J, Appenzeller BMR. Exposure to polycyclic aromatic hydrocarbons in women living in the Chinese cities of BaoDing and Dalian revealed by hair analysis. *Environ Int*. 2018 Dec;121(Pt 2):1341-1354.

⁷ Iglesias-González A, Hardy EM, Appenzeller BMR. Cumulative exposure to organic pollutants of French children assessed by hair analysis. *Environ Int*. 2020 Jan;134:105332.

Tableau 7 : Description de la population * : entre la date de l'incendie et la date de prélèvement

Patiente	Date du prélèvement	Année de naissance	Habitation	Travail	Coloration*	Décoloration*	Permanente*
1	27/02/2020	1987	Notre Dame de Bondeville	Bois Guillaume	Non	Non	Non
2	17/02/2020	1964	Charleval	Rouen	Oui	Non	Non
3	17/02/2020	1990	Rouen	Rouen	Non	Non	Non
4	18/02/2020	1999	Rouen	Rouen	Non	Oui	Non
5	17/02/2020	1991	Rouen	Rouen	Oui	Non	Non
6	17/02/2020	1994	Rouen	Rouen	Non	Non	Non
7	17/02/2020	1997	Rouen	Rouen	Non	Non	Non
8	17/02/2020	1971	Bihorel	Rouen	Oui	Non	Non
9	17/02/2020	1995	Rouen	Rouen	Oui	Non	Non
10	17/02/2020	1985	Rouen	Rouen	Non	Non	Non
11	17/02/2020	1983	Rouen	Rouen	Non	Non	Non
12	17/02/2020	1985	Rouen	Rouen	Non	Non	Non
13	17/02/2020	1991	Rouen	Rouen	Non	Non	Non

PARTIE III : RESULTATS
Chapitre B : imprégnation des cheveux en HAP et métaux

i.dosages des HAP

Tableau 8 : Dosage des HAP et des métabolites (pg/mg)

Sample ID	Acenaphtylene	Acenaphtene	Fluorene	Phenanthrene	Anthracene	Fluoranthene	Pyrene	Benz a anthracene	Chrysene	B b fluoranthene	B k fluoranthene	B a P	I 1,2,3-cd pyrene	Dibenz a,h anthracene	Benzo g,h,i perylene
1_A	0.75 (<LOQ)	nd	3.18 (<LOQ)	34.24 (<LOQ)	2.46 (<LOQ)	29.21	11.48	0.61 (<LOQ)	1.29	1.61	1.18	1.08	3.71	nd	4.19
1_B	1.06 (<LOQ)	nd	nd	38.74 (<LOQ)	7.10	56.72	7.21 (<LOQ)	0.11 (<LOQ)	0.35	nd	0.12 (<LOQ)	0.08 (<LOQ)	0.75 (<LOQ)	nd	0.13 (<LOQ)
2_A	1.58 (<LOQ)	6.13 (<LOQ)	17.02 (<LOQ)	34.16 (<LOQ)	2.85 (<LOQ)	25.69	10.08	0.30 (<LOQ)	0.88	0.32 (<LOQ)	0.26 (<LOQ)	0.21 (<LOQ)	0.68 (<LOQ)	nd	1.31
2_B	0.48 (<LOQ)	nd	nd	7.06 (<LOQ)	0.76 (<LOQ)	24.68	4.91 (<LOQ)	0.32 (<LOQ)	0.92	0.35 (<LOQ)	0.52 (<LOQ)	0.47 (<LOQ)	0.85 (<LOQ)	nd	nd
3_A	nd	nd	nd	nd	2.74 (<LOQ)	9.86 (<LOQ)	nd	0.43 (<LOQ)	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd
3_B	1.90 (<LOQ)	nd	nd	nd	6.69	20.23	nd	1.38	1.06	0.65 (<LOQ)	0.21 (<LOQ)	0.56 (<LOQ)	1.37	nd	nd
4_A	1.17 (<LOQ)	nd	nd	nd	0.87 (<LOQ)	14.47	2.75 (<LOQ)	0.15 (<LOQ)	1.92	0.26 (<LOQ)	0.15 (<LOQ)	0.08 (<LOQ)	0.09 (<LOQ)	nd	0.37 (<LOQ)
4_B	1.62 (<LOQ)	8.51 (<LOQ)	17.97 (<LOQ)	62.17 (<LOQ)	1.26 (<LOQ)	21.65	13.35	0.48 (<LOQ)	2.53	0.42 (<LOQ)	0.17 (<LOQ)	0.20 (<LOQ)	0.19 (<LOQ)	0.30 (<LOQ)	0.06 (<LOQ)
5_A	0.83 (<LOQ)	2.98 (<LOQ)	4.02 (<LOQ)	22.05 (<LOQ)	1.44 (<LOQ)	6.19 (<LOQ)	6.30 (<LOQ)	0.28 (<LOQ)	0.78	0.18 (<LOQ)	0.08 (<LOQ)	0.25 (<LOQ)	0.26 (<LOQ)	0.32 (<LOQ)	1.38
5_B	1.02 (<LOQ)	5.70 (<LOQ)	12.56 (<LOQ)	20.35 (<LOQ)	1.88 (<LOQ)	9.03 (<LOQ)	8.25 (<LOQ)	0.25 (<LOQ)	1.22	0.32 (<LOQ)	0.20 (<LOQ)	0.27 (<LOQ)	0.24 (<LOQ)	0.28 (<LOQ)	2.30
6_A	1.39 (<LOQ)	5.80 (<LOQ)	8.44 (<LOQ)	56.09 (<LOQ)	2.31 (<LOQ)	20.30	20.08	1.08	5.54	1.30	0.85 (<LOQ)	0.68 (<LOQ)	0.56 (<LOQ)	0.33 (<LOQ)	2.57
6_B	1.26 (<LOQ)	8.76 (<LOQ)	5.52 (<LOQ)	31.12 (<LOQ)	2.81 (<LOQ)	14.52	14.59	0.78 (<LOQ)	3.96	1.07	0.78 (<LOQ)	0.43 (<LOQ)	0.86 (<LOQ)	0.60 (<LOQ)	1.74
7_A	1.68 (<LOQ)	10.38 (<LOQ)	26.17 (<LOQ)	59.46 (<LOQ)	2.91 (<LOQ)	18.05	16.38	0.45 (<LOQ)	4.19	0.87 (<LOQ)	0.36 (<LOQ)	0.38 (<LOQ)	0.36 (<LOQ)	nd	1.32
7_B	0.78 (<LOQ)	7.32 (<LOQ)	4.74 (<LOQ)	41.30 (<LOQ)	1.99 (<LOQ)	17.45	14.69	0.80 (<LOQ)	4.59	1.00 (<LOQ)	0.57 (<LOQ)	0.30 (<LOQ)	0.57 (<LOQ)	nd	2.57
8_A	0.74 (<LOQ)	nd	nd	nd	0.86 (<LOQ)	0.23 (<LOQ)	0.88 (<LOQ)	0.58 (<LOQ)	1.39	0.15 (<LOQ)	nd	0.06 (<LOQ)	0.06 (<LOQ)	0.59 (<LOQ)	1.03
8_B	1.73 (<LOQ)	10.02 (<LOQ)	32.07 (<LOQ)	83.15 (<LOQ)	6.18	14.48	18.00	0.71 (<LOQ)	4.26	0.46 (<LOQ)	0.14 (<LOQ)	0.48 (<LOQ)	0.34 (<LOQ)	0.72 (<LOQ)	2.42
9_A	0.84 (<LOQ)	nd	nd	12.70 (<LOQ)	3.64 (<LOQ)	8.66 (<LOQ)	4.90 (<LOQ)	0.37 (<LOQ)	0.66	0.26 (<LOQ)	0.21 (<LOQ)	0.15 (<LOQ)	0.09 (<LOQ)	nd	0.89 (<LOQ)
9_B	1.59 (<LOQ)	13.05 (<LOQ)	23.60 (<LOQ)	79.81 (<LOQ)	3.30 (<LOQ)	16.56	17.28	0.93 (<LOQ)	4.07	1.19	0.70 (<LOQ)	0.63 (<LOQ)	0.60 (<LOQ)	nd	3.35
10_A	1.94 (<LOQ)	20.83 (<LOQ)	7.99 (<LOQ)	nd	5.79	0.26 (<LOQ)	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd
10_B	0.47 (<LOQ)	0.58 (<LOQ)	nd	nd	1.55 (<LOQ)	6.89 (<LOQ)	8.49 (<LOQ)	0.29 (<LOQ)	2.32	0.48 (<LOQ)	0.30 (<LOQ)	0.24 (<LOQ)	nd	nd	nd
11_A	0.34 (<LOQ)	4.46 (<LOQ)	15.10 (<LOQ)	41.80 (<LOQ)	3.08 (<LOQ)	8.42 (<LOQ)	10.66	0.27 (<LOQ)	1.48	0.48 (<LOQ)	0.04 (<LOQ)	0.15 (<LOQ)	0.15 (<LOQ)	nd	1.52
11_B	1.12 (<LOQ)	11.55 (<LOQ)	nd	nd	0.88 (<LOQ)	24.49	nd	0.25 (<LOQ)	0.44	nd	0.30 (<LOQ)	nd	nd	nd	nd
12_A	1.30 (<LOQ)	nd	nd	nd	0.74 (<LOQ)	1.89 (<LOQ)	1.46 (<LOQ)	0.31 (<LOQ)	0.17	nd	0.03 (<LOQ)	0.00 (<LOQ)	0.23 (<LOQ)	nd	1.08
12_B	2.34 (<LOQ)	13.30 (<LOQ)	30.15 (<LOQ)	56.96 (<LOQ)	2.67 (<LOQ)	11.30	16.13	0.76 (<LOQ)	2.26	0.44 (<LOQ)	0.35 (<LOQ)	0.34 (<LOQ)	nd	0.55 (<LOQ)	2.63
13_A	0.67 (<LOQ)	4.41 (<LOQ)	9.94 (<LOQ)	42.18 (<LOQ)	1.44 (<LOQ)	10.98	6.73 (<LOQ)	0.34 (<LOQ)	1.75	0.69 (<LOQ)	0.39 (<LOQ)	0.26 (<LOQ)	0.40 (<LOQ)	0.24 (<LOQ)	0.90 (<LOQ)
13_B	0.97 (<LOQ)	4.68 (<LOQ)	12.58 (<LOQ)	87.38 (<LOQ)	2.10 (<LOQ)	15.50	10.16	0.36 (<LOQ)	2.21	0.69 (<LOQ)	0.25 (<LOQ)	0.09 (<LOQ)	0.31 (<LOQ)	nd	0.98 (<LOQ)
LOQ (pg/mg)	20	100	100	100	5	10	10	1	1	1	1	1	1	1	1

PARTIE III : RESULTATS
Chapitre B : imprégnation des cheveux en HAP et métaux

Sample ID	1-OH-Naphthalene	2-OH-Naphthalene	9-OH-Fluorene	3-OH-Fluorene	2-OH-Fluorene	4-OH-Phenanthrene	9-OH-Phenanthrene	1-OH-Anthracene
1_A	2.30	183.26	86.47	0.40	0.70	nd	nd	0.26 (<LOQ)
1_B	3.95	106.57	87.59	0.37	0.85	nd	nd	0.26 (<LOQ)
2_A	2.78	156.12	80.65	0.22	0.60	nd	nd	nd
2_B	3.94	162.64	80.49	0.26	0.74	nd	nd	nd
3_A	9.67	471.74	145.63	0.88	0.85	nd	nd	nd
3_B	9.15	428.75	126.37	nd	1.02	nd	nd	nd
4_A	1.57	77.70	161.55	nd	0.51	nd	nd	nd
4_B	2.26	105.19	173.63	nd	0.35	nd	nd	nd
5_A	1.47	110.02	31.29	nd	0.44	nd	0.24	nd
5_B	1.49	103.51	29.62	nd	0.34	nd	nd	nd
6_A	2.96	158.06	281.58	1.00	0.41	nd	nd	nd
6_B	2.30	144.40	355.01	0.60	0.54	nd	nd	nd
7_A	2.08	150.59	405.32	0.36	0.36	0.18 (<LOQ)	0.32	nd
7_B	1.78	146.10	613.27	0.62	0.29	nd	0.31	nd
8_A	2.42	150.95	83.52	nd	0.77	nd	nd	nd
8_B	2.75	165.92	115.14	0.42	0.71	nd	nd	nd
9_A	9.43	136.05	50.91	nd	0.40	nd	nd	nd
9_B	4.67	148.89	98.03	1.26	0.82	nd	nd	nd
10_A	2.85	170.85	158.32	1.19	0.27	nd	nd	nd
10_B	3.38	175.68	142.15	0.94	0.60	nd	nd	nd
11_A	2.54	120.71	122.04	0.79	0.30	nd	nd	nd
11_B	3.15	165.81	54.80	1.19	0.40	nd	nd	nd
12_A	2.48	138.32	281.47	0.89	0.46	nd	nd	nd
12_B	2.37	148.07	241.22	1.86	0.36	nd	nd	nd
13_A	0.85	46.85	48.95	0.38	0.36	nd	nd	nd
13_B	1.51	79.16	78.92	nd	nd	nd	nd	nd
LOQ (pg/mg)	0.50	2.00	10.00	0.10	0.1	0.2	0.1	0.5

PARTIE III : RESULTATS
Chapitre B : imprégnation des cheveux en HAP et métaux

Sample ID	3-OH-Phenanthrene	1-OH-Phenanthrene	2-OH-Phenanthrene	3-OH-Fluoranthene	1-OH-Pyrene	2-OH-BcPhe	1-OH-BaA	4-OH-Chrysene
1_A	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd
1_B	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd
2_A	nd	nd	0.86	nd	nd	nd	nd	nd
2_B	nd	nd	1.34	nd	nd	nd	nd	nd
3_A	nd	nd	nd	0.26	nd	nd	nd	nd
3_B	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd
4_A	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd
4_B	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd
5_A	nd	nd	nd	nd	nd	nd	0.05 (<LOQ)	nd
5_B	nd	nd	0.21	nd	0.06 (<LOQ)	nd	nd	nd
6_A	0.26	nd	nd	nd	0.06 (<LOQ)	nd	0.06 (<LOQ)	nd
6_B	0.35	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd
7_A	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	0.23
7_B	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd
8_A	nd	nd	2.06	nd	nd	nd	nd	nd
8_B	nd	nd	0.68	nd	0.07 (<LOQ)	nd	nd	nd
9_A	nd	nd	0.18	nd	nd	nd	nd	nd
9_B	0.22	nd	0.29	nd	nd	nd	nd	nd
10_A	nd	nd	nd	nd	0.06 (<LOQ)	nd	nd	nd
10_B	nd	nd	nd	nd	0.12	0.03 (<LOQ)	nd	nd
11_A	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd
11_B	0.25	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd
12_A	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd
12_B	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd
13_A	nd	nd	0.34	nd	nd	nd	nd	nd
13_B	nd	nd	0.29	nd	nd	nd	nd	nd
LOQ (pg/mg)	0.1	0.1	0.1	0.2	0.1	0.1	0.1	0.1

PARTIE III : RESULTATS
Chapitre B : imprégnation des cheveux en HAP et métaux

Sample ID	6-OH-Chry+11-OH-BaA	2-OH-BaA	3-OH-BcPhe+8-OH-BaA+5-OH-BaA	3-OH-Chrysene	1-OH-Chry+4-OH-BaA	10-OH-BaA	3+9-OH-BaA
1_A	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd
1_B	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd
2_A	nd	nd	0.16	nd	nd	nd	0.02 (<LOQ)
2_B	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd
3_A	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd
3_B	nd	nd	0.17	nd	nd	nd	nd
4_A	nd	nd	nd	nd	nd	nd	0.03 (<LOQ)
4_B	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd
5_A	nd	nd	0.07 (<LOQ)	nd	nd	nd	0.05 (<LOQ)
5_B	nd	0.05 (<LOQ)	0.11	0.07 (<LOQ)	nd	nd	nd
6_A	nd	nd	nd	0.07 (<LOQ)	nd	nd	nd
6_B	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd
7_A	nd	nd	nd	nd	0.04 (<LOQ)	nd	nd
7_B	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd
8_A	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd
8_B	0.07 (<LOQ)	nd	nd	nd	nd	nd	nd
9_A	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd
9_B	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd
10_A	nd	nd	nd	0.05 (<LOQ)	nd	nd	nd
10_B	nd	nd	nd	0.11	nd	nd	nd
11_A	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd
11_B	0.11	nd	nd	nd	nd	nd	nd
12_A	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd
12_B	nd	nd	nd	0.13	nd	nd	nd
13_A	nd	nd	nd	nd	0.02 (<LOQ)	nd	nd
13_B	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd
LOQ (pg/mg)	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.2	0.1

A : partie proximale du cheveu (0-4 cm) ; B : partie distale (4 derniers cm) / Résultats > à 125% du plus haut point de gamme / nd : non détecté

Remarque : Tous les résultats sont exprimés en pg/mg. Pour les métabolites non mentionnés dans le tableau, tous les dosages étaient inférieurs à la limite de détection.

ii. dosages de métaux

L'analyse du patient 8 n'a pu être réalisée en raison d'une quantité de cheveux considérée comme insuffisante par le laboratoire.

Seule la mèche de cheveux « Patient 13 » a été segmentée, du cuir chevelu à 3 cm et de 3 cm à la pointe. Les masses des autres mèches reçues n'étaient pas suffisantes pour permettre une segmentation et l'analyse a été réalisée sur la totalité de la mèche.

Tableau 9 : Dosage des métaux (concentrations en ng/mg)

Patient	Vanadium	Chrome	Zinc	Cadmium	Mercure	Plomb
1	0,032	0,09	103	0,007	0,72	1,77
2	0,004	0,04	102	0,003	0,29	0,33
3	0,027	0,18	137	0,084	0,56	1,77
4	0,022	0,14	113	0,024	0,03	1,43
5	0,032	0,07	272	0,022	0,35	7,64
6	0,018	0,06	118	0,006	0,62	0,34
7	0,032	0,08	132	0,022	0,25	1,56
9	0,027	0,21	113	0,011	0,06	0,40
10	0,059	0,08	218	0,011	0,28	0,39
11	0,008	0,06	142	0,001	0,63	0,12
12	0,026	0,14	146	0,028	0,03	1,23
13 (0-3 cm)	0,014	0,20	210	0,006	0,60	0,44
13 (3-pointe)	0,034	0,12	155	0,018	0,55	2,14
Références	0,001-0,051	0,11-0,52	129-209	0,004-0,17	0,31-1,66	0,13-4,57

3. Discussion et conclusion

Les prélèvements ont été réalisés 4 mois après l'incendie, ce qui a laissé le temps pour l'incorporation des produits et de leurs métabolites (pour les HAP), en cas d'exposition persistante, mais a pu engendrer une perte de sensibilité pour certains dosages.

Il existe un biais de sélection de la population (exclusivement féminine, consultant pour une aide à la procréation), lié au type de centre de prélèvement, choisi pour répondre aux contraintes de temps et d'existence d'un centre ayant déjà une autorisation pour les collections biologiques à des fins de recherche.

Les masses de cheveux prélevées ont été parfois trop faible pour une analyse précise en raison de la nécessité, en post-prélèvement, de scinder chaque mèche en deux, les analyses de métaux et d'HAP ayant dû être réalisées dans deux laboratoires différents.

Toutes les patientes travaillaient dans la zone du panache et toutes sauf une habitaient dans la zone couverte par le panache.

Concernant les HAP, les dosages des produits mères ne montrent pas d'exposition significative, et les comparaisons entre les analyses de la partie distale (B) et de la partie proximale (A) ne montrent pas d'évolution homogène, qui aurait pu marquer une exposition plus importante sur la période post-incendie par rapport à la période témoin (antérieure à la date de l'incendie).

Les dosages des métabolites des HAP sont le plus souvent inférieurs à la limite de quantification, sauf pour le 2-hydroxy-naphtalène et le 9-hydroxy-fluorène.

Certains individus ont des concentrations supérieures à ce qui a été retrouvé par la même équipe dans d'autres études (Palazzi 2018⁸ ; Palazzi 2019⁹). Toutefois, il n'existe pas de valeur guide biologique pour cette analyse et la faible masse d'échantillon rend aléatoire la comparaison avec d'autres études.

La comparaison, pour un même individu, de l'analyse de la partie proximale (exposition récente) et de la partie distale (exposition ancienne) prend alors toute son importance. On ne trouve pas, dans ce domaine, de tendance franche dans nos résultats, les évolutions étant parfois discordantes entre deux composés.

L'analyse des métaux n'a pu, pour des raisons techniques, être réalisée en dissociant la partie proximale de la partie distale des cheveux.

Elle ne montre toutefois globalement pas de niveau d'exposition supérieur aux niveaux de références, qui sont issus d'une étude menée dans la région du Havre sur 45 volontaires (Goullé, 2005). La seule exception est la patiente 5, pour laquelle le taux de plomb dans les cheveux est notablement supérieur au 95ème percentile, ce qui s'associe à une discrète élévation du zinc. La patiente sera vue en consultation pour distinguer une contamination externe d'une contamination interne, et en trouver si besoin la cause.

Cette étude, de portée limitée par le nombre de sujets inclus et les difficultés techniques, ne montre pas de signal évident d'une contamination des sujets inclus suite à l'incendie du 26 septembre 2019.

⁸ Palazzi P, Hardy EM, Appenzeller BMR. Biomonitoring of children exposure to urban pollution and environmental tobacco smoke with hair analysis - A pilot study on children living in Paris and Yeu Island, France. *Sci Total Environ*. 2019 May 15;665:864-872.

⁹ Palazzi P, Mezzache S, Bourokba N, Hardy EM, Schritz A, Bastien P, Emond C, Li J, Soeur J, Appenzeller BMR. Exposure to polycyclic aromatic hydrocarbons in women living in the Chinese cities of BaoDing and Dalian revealed by hair analysis. *Environ Int*. 2018 Dec;121(Pt 2):1341-1354

C. Analyse comportementale durant l'incendie

1. Circulation des populations lors de l'incendie

i. Les enquêtes

Réalisées en 2020, deux enquêtes portent sur l'analyse des comportements de la population de la métropole et de celle située dans le périmètre des 500 mètres des sites Lubrizol et Normandie-Logistique. Diffusées, l'une principalement en ligne en raison du contexte épidémique a permis de récolter plus de 1600 réponses, et l'autre en mode porte-à-porte a permis de questionner près d'une centaine de personnes. Plusieurs objectifs étaient recherchés, portant notamment sur la connaissance des modes de diffusion de l'alerte et de circulation de l'information la journée du 26 septembre 2019 et l'identification de profils de comportements selon des critères démographiques et géographiques.

ii. Les chiffres

- 26% des répondants ont vu l'incendie, 39% ont entendu les explosions et 90% ont vu le panache de fumée;
- 75 % des répondants ont été alerté avant les sirènes, celles-ci n'ayant alerté que 4% des répondants ;
- Près de 20% des répondants ont été informés de l'incendie avant 6 heures (dont les 3/4 en entendant les explosions) ;
- Près de 80% avant 8 heures (dont les 3/4 par un proche, et la radio) ;
- Au pic de l'évènement, entre 8:00 et 10:00 du matin, près de 80% des répondants sont restés à leur domicile, contre 35% un jeudi ordinaire ;
- Dans le périmètre des 500 mètres autour de l'incendie, plus de 65% des personnes ont fui sans avoir reçu d'alerte ni d'information concernant un confinement. À l'échelle de la MRN, ce sont 15 à 20% des répondants qui ont décidé de fuir pour se protéger ;
- Deux ans après l'incendie, ils sont près des deux tiers à n'avoir engagé aucune démarche relative à cet incendie (au terme de l'enquête autour du site, 72% ne sont pas inscrits au système d'alerte SMS de la métropole par exemple).

iii. Les enseignements saillants

- Les résultats de cette enquête mettent en évidence la multiplicité des modalités de diffusion de l'information hors des alertes officielles et de la recherche d'informations en l'absence d'une communication officielle rapide, sans ambiguïtés et continu tout au long de l'évènement ;
- Cette enquête montre que si le conseil donné à la population de rester à l'abri a globalement été respecté, un évènement de cette nature commençant en plein jour pourrait entraîner des départs massifs.

iv. Une illustration

Si on observe globalement des départs, ils n'ont pas été massifs car ils n'ont concerné que 14% des répondants le jeudi 26 septembre, total qui est monté jusqu'à 23% si on étend la période d'observation sur le week-end. Les premières personnes à avoir quitté leur domicile résident au Petit-Quevilly et à Rouen, soit à proximité du foyer de l'incendie. Pour ces 2 communes, 22% des répondants sont partis. Une autre étude menée auprès de résidents de la zone de confinement des 500 mètres autour de Lubrizol a montré que 67% d'entre eux avaient fui leur domicile avant 5 heure du matin, alertés par les explosions et les sirènes des pompiers (Figure 19).

La base de données (données tabulaires et questionnaire) relative à cette enquête est disponible sur l'entrepôt de données de [Recherche Data Gouv](#).

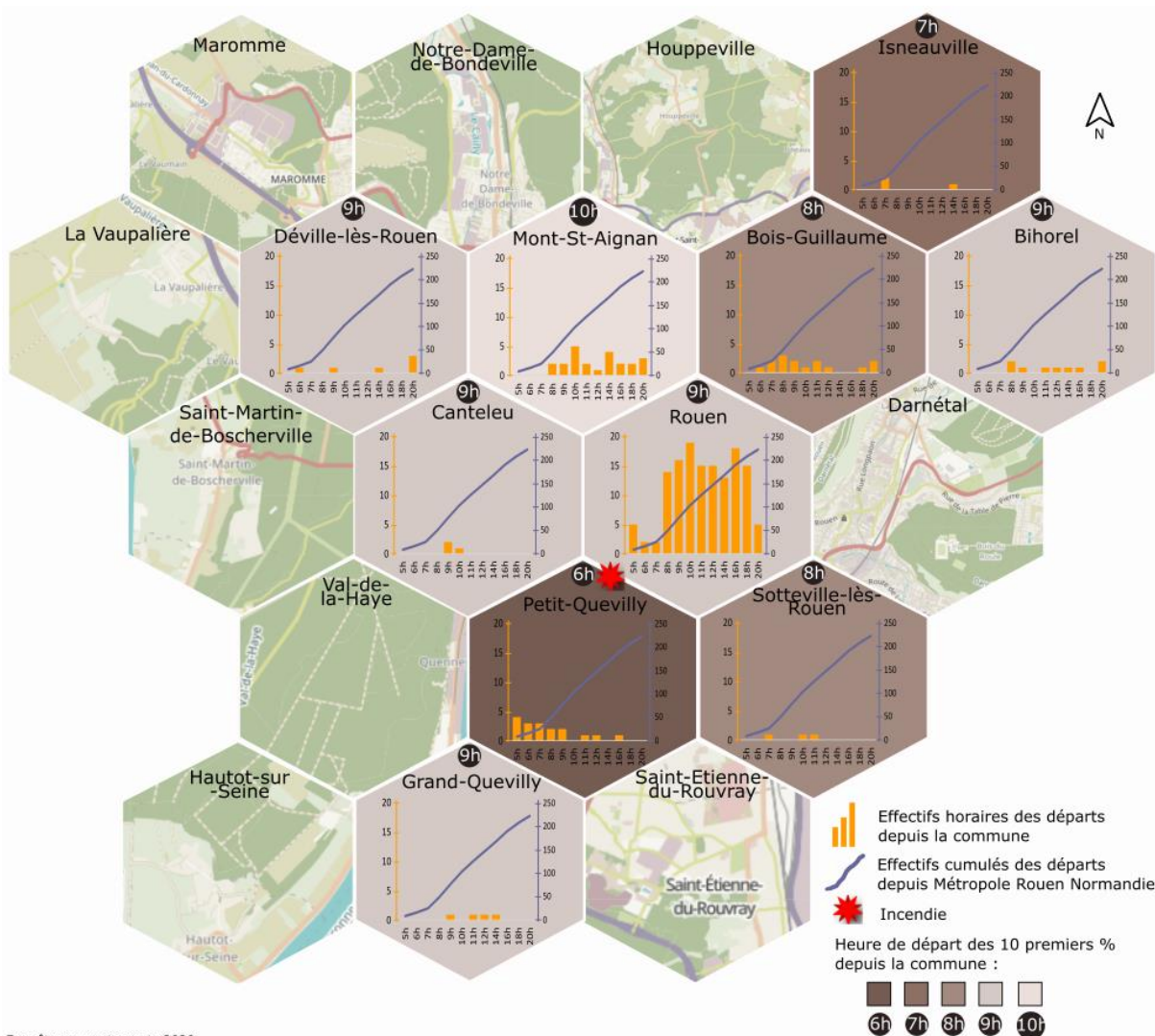


Figure 19 : Les départs de population au sein de la Métropole Rouen Normandie le 26 septembre 2019

2. Informations et réseaux sociaux en temps de crise

i. Les données collectées

Dès les premières heures de l'incendie le 26 septembre 2019, nous avons enregistré de manière automatique l'ensemble des messages qui ont circulé dans le réseau social Twitter et qui mentionnaient l'incendie. Plus de 12 000 messages ont ainsi été analysés et donnent un éclairage original sur la manière dont une crise réelle "vit" dans le monde des réseaux sociaux.

ii. Les chiffres

- 12 992 tweets concernant l'incendie de Lubrizol et Normandie Logistique sur la journée du 26/9/2019 ;
- Pic du nombre de tweets (1 042), à 9h ;
- 3 thématiques ressortent des tweets :
 - 45% des tweets portent sur les conséquences de l'incendie (nuage, pollution...)
 - 35% des tweets portent sur la gestion de crise ;
 - 20% parlent des médias et du décès de Jacques Chirac qui occulte l'événement.
- Seulement 1% des tweets recensent des symptômes physiques pouvant être liés à l'événement (maux de tête, difficultés respiratoires...) et 3% de symptômes psychologiques (inquiétude, anxiété) ;

➤ Les comptes des médias n'ont représenté que 4% des tweets produits, dont 57% provenant de médias locaux, 8% de médias régionaux et 35% de médias nationaux.

iii. Les enseignements saillants

➤ L'analyse des tweets lors de l'incendie du 26 septembre 2019 montre la défiance ressentie par les populations envers le gouvernement et la préfecture, dont les mots sur la non toxicité de l'incendie et le manque de communication n'ont pas rassuré ;

➤ Un sentiment de mise sous silence a également émergé suite à la mort de Jacques Chirac (annoncée à 12h), seuls les médias locaux ont continué à diffuser de l'information sur l'incendie durant l'après-midi ;

➤ L'usage de twitter lors de l'événement a moins porté sur la perception des populations que sur leur déception à l'égard des gestionnaires.

iv. Une illustration

La classification (CAH) du contenu des tweets a mené à trois thématiques différentes : les conséquences de l'incendie (la toxicité, le panache de fumée...), la gestion de crise (la préfecture, les pompiers...) puis les médias et la mort de Jacques Chirac, chacune présentant une chronique différente. La gestion de crise est la thématique la plus importante en début de matinée et diminue au fil de la journée. Les tweets concernant les conséquences de l'incendie sont importants le matin, mais perdurent en fin de journée. Au contraire, la thématique des médias émerge en fin de matinée, avec l'annonce du décès de l'ancien Président Jacques Chirac.

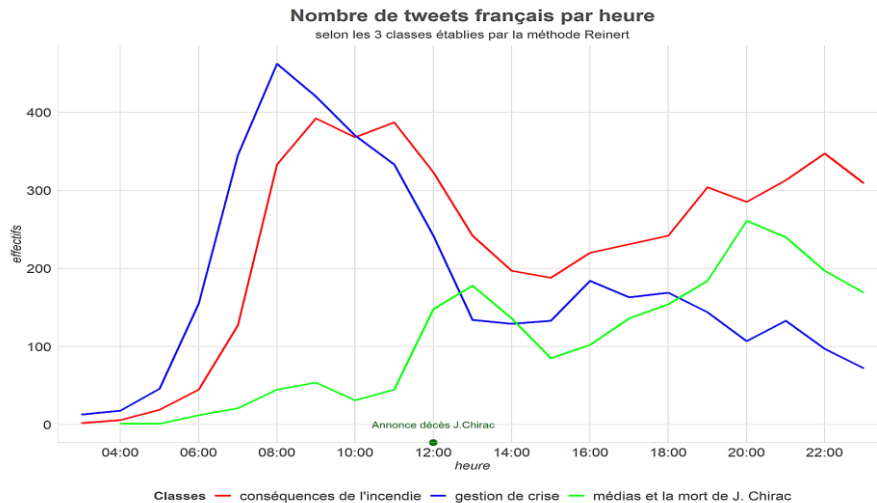


Figure 20 : Classification et heure de publication des tweets français le 26 septembre 2019

3. Les médecins généralistes face aux événements

i. Naissance d'un collectif pluridisciplinaire : une rencontre entre la recherche en médecine générale et les sciences sociales de la santé

Le collectif associe des chercheurs de médecine générale (Département Universitaire de Médecine générale – DUMG) et de sciences humaines et sociales (sociologie et anthropologie – laboratoire DySoLab/EA 7476/IRHIS) de l'Université de Rouen-Normandie. Cet incendie soulève de nombreux enjeux relatifs aux questions de santé sur lesquels les membres du collectif ont travaillé, comme praticiens ou comme chercheurs. La recherche en sciences humaines et sociales infuse la recherche en médecine générale et le collectif s'inscrit dans cette originalité.

Une campagne d'entretiens avec des médecins généralistes (MG) a été réalisée pour comprendre leurs rôles joués à la suite de l'incendie, tout en laissant ouvert des questionnements qui viendraient à être soulevés par cette première confrontation au terrain. L'enjeu était d'enquêter sur les effets de l'incendie dans la pratique médicale avant qu'ils ne perdent en pertinence et en évidence et que l'actualité brûlante de l'incendie ne s'efface.

D'une crise à l'autre : l'évolution lucide du collectif

Or, la fumée noire de Lubrizol s'est rapidement estompée à mesure que le coronavirus entrainait dans le cabinet médical. La pandémie a fait irruption dès la phase exploratoire de notre enquête. Comment enquêter sur un incendie local sans qu'il soit relativisé voire écrasé par la pandémie (Figure 21) ? Intégrer la Covid dans notre objet est apparu évidente et de cette lucidité naquit le collectif du même nom : LuCid (Lubrizol et Covid-19).

L'approche pluridisciplinaire a permis de transformer la difficulté conceptuelle de l'enchaînement des crises en un questionnement original au croisement de perspectives médicales et sociales. Ce questionnement a une double dimension : comprendre ce que le contexte singulier fait à l'exercice d'une médecine générale ; comprendre les enjeux spécifiques de l'enchaînement de ces deux crises et identifier une gestion de la première vague de la Covid-19 propre aux médecins ayant d'abord été confrontés à l'incendie de Lubrizol.

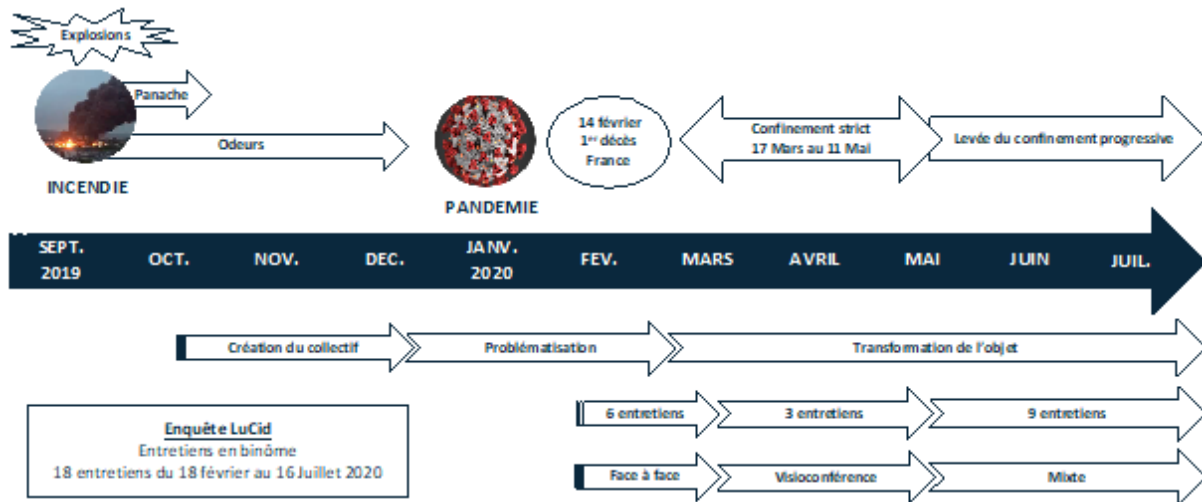


Figure 21 : Frise chronologique de septembre 2019 à juillet 2020. Au-dessus de la flèche, les événements liés à l'incendie et la pandémie et en dessous, les différentes étapes de construction de l'étude

Les vertus de l'approche pluridisciplinaire en tandem de l'enquête

Chaque entretien s'est déroulé en tandem de chercheurs issus de chaque discipline : un sociologue, un médecin. Cette organisation a des vertus heuristiques dont la plus originale tient à l'approche disciplinaire de l'entretien (Galembert et Belbah, 2004¹⁰). D'un côté, les enquêtés se sont toujours adressés à deux chercheurs, dont un pair. Avec ce dernier, l'échange peut être précis, technique et instaure un dialogue de confiance entre MG sur des aspects éprouvés par l'enquêté et par l'enquêteur. Les réseaux d'interconnaissance permettent aux MG (enquêté et enquêteur) d'échanger sur des enjeux locaux, décisionnels, et pragmatiques du terrain. De l'autre, le sociologue, naïf du milieu professionnel, découvre un environnement complexe et questionne sur la pratique dans des termes plus explicites pour sa compréhension.

Interroger des professionnels de santé en première ligne pour gérer les conséquences de ces événements sur leurs patients invite à explorer la dimension proprement sanitaire de ces deux crises, plutôt que leur aspect politique et organisationnel, ou que sa dimension citoyenne – même si ces dimensions sont en perpétuelle interaction (Bergeron et al., 2020¹¹). Ces crises définies comme « sanitaires » fonctionnent ici comme des « épreuves » (Lemieux, 2018¹²) à la fois pour les patients – dont la santé s'en trouve altérée ou l'inquiétude accrue – et pour les médecins – dont les cadres habituels de la pratique sont mis à mal (Fournier et Clerc, 2021¹³).

¹⁰ GALEMBERT C. DE, BELBAH M., 2004, « Vertus heuristiques d'une recherche en tandem », *Terrains travaux*, n° 7, 2, p. 127-145.
¹¹ BERGERON H., BORRAZ O., CASTEL P., DEDIEU F., 2020, *Covid-19 : une crise organisationnelle*, Presses de Sciences Po (Essai), 136 p.
¹² LEMIEUX C., 2018, *La sociologie pragmatique*, La Découverte, (Repères), 128 p.
¹³ FOURNIER C., CLERC P., 2021, « La construction d'une organisation territoriale des acteurs de soins primaires face à l'épidémie de Covid-19 : apports d'une étude de cas à l'échelle d'un canton », *Revue francophone sur la santé et les territoires*.

La littérature en sciences sociales comme en science médicale a depuis longtemps cherché à éclairer le lien entre l'exercice de la médecine et le problème de l'incertitude constitutif de la médecine générale (Allen et al., 2002¹⁴ ; Bloy, 2008¹⁵ ; Fox, 1988¹⁶ ; Gocko et al., 2017¹⁷ ; Han, Klein et Arora, 2011¹⁸ ; Motte et al., 2020¹⁹). Les « omnipraticiens » « par leur place dans le système de soins et les caractéristiques de leur exercice, [...] sont confrontés à plusieurs formes d'incertitude » (Bloy, 2008¹⁵, p. 68). Or, les généralistes normands étudiés, s'ils n'ont pas attendu 2019 pour travailler dans un contexte incertain, ont été confrontés à une incertitude qui s'est trouvée ici amplifiée.

Questionner l'incertitude en médecine dans le cadre de crises sanitaires permet de décrire les formes plurielles de pratiques et de conceptions à l'œuvre en médecine générale comme dans d'autres spécialités (Vega, 2009²⁰). Dans le cas des crises sanitaires, la question de l'incertitude permet également de réfléchir au rôle de ces MG entre la confrontation aux attentes inédites des patients et les positionnements des pouvoirs publics (Moyal, 2019²¹ ; Todeschini, 1999²²), mais aussi à la manière dont ces crises participent à renouveler les relations médecins-patients (Todeschini, 1999⁴⁸) ou l'organisation au sein du cabinet (Moyal, 2019⁴⁷ ; Pedrot et al, 2019²³).

ii. De l'incendie d'une usine Seveso à la Covid-19 : le médecin généraliste en situation de crise ? Méthodologie

L'irruption de la pandémie dès la phase exploratoire de l'enquête a bouleversé et transformé notre objet d'étude. Une enquête par entretiens semi-directifs auprès de médecins généralistes (n = 19) a été conduite en Normandie entre octobre 2019 et septembre 2020. Les médecins ont été inclus selon leur lieu d'exercice et la zone touchée par l'incendie de Lubrizol et Normandie Logistique définie par la Préfecture puis par Santé Publique France (Empereur-Bissonnet et al., 2021²⁴).

Les entretiens ont été enregistrés, après consentement oral, retranscrits intégralement et anonymisés. La phase d'analyse a été réalisée en trois niveaux : analyse thématique individuelle – par carte heuristique et codage manuel –, échange et confrontation en binôme puis restitution à l'ensemble du collectif. L'ensemble des résultats issus du collectif LuCid est inscrite sous le numéro 2020.043 au registre du RGPD de l'Université Rouen Normandie. L'étude ne relève pas de la loi N°2012-300 du 05 mars 2012 relative à la recherche impliquant la personne humaine selon l'avis du Comité d'Éthique pour la Recherche sur Données Existantes du CHU de Rouen (protocole E2020-33).

Des médecins dans le brouillard ? Les généralistes rouennais face à l'accident industriel de Lubrizol

Par le positionnement géographique de leurs cabinets comme de leurs domiciles, les médecins interrogés ont pour la plupart été confrontés à la vue du nuage et/ou à ses retombées odorantes. Il s'agit donc d'observer comment cette expérience personnelle est mobilisée ou mise à distance, lorsque ces professionnels de santé se retrouvent

¹⁴ ALLEN J., GAY B., CREBOLDER H., HEYRMAN J., SVAB I., RAM P., EVANS P., 2002, « La définition européenne de la médecine générale - médecine de famille. WONCA Europe »,

¹⁵ BLOY G., 2008, « L'incertitude en médecine générale : sources, formes et accommodements possibles », *Sciences sociales et sante*, Vol. 26, 1, p. 67-91.

¹⁶ FOX R.C., 1988, *L'incertitude médicale*, Paris, L'Harmattan.

¹⁷ GOCKO X., PERDRIX C., COMPAGNON L., GHASSAROSSIAN C., RENARD V., 2017, « Socialisation professionnelle et futur DES de médecine générale », *exercer*, 131, p. 140-142.

¹⁸ HAN P.K.J., KLEIN W.M.P., ARORA N.K., 2011, « Varieties of uncertainty in health care: a conceptual taxonomy », *Medical decision making : an international journal of the Society for Medical Decision Making*, 31, 6, p. 828-838.

¹⁹ MOTTE B., AIGUIER G., PEE D.V., COBBAUT J.P., 2020, « Mieux comprendre l'incertitude en médecine pour former les médecins », *Pédagogie Médicale*, 21, 1, p. 39-51.

²⁰ VEGA A., 2009, « Les déterminants de la décision médicale », *Médecine*, 5, 6, p. 282-286

²¹ MOYAL A., 2019, « RATIONALISATION DES PRATIQUES PROFESSIONNELLES EN MAISONS DE SANTE PLURIPROFESSIONNELLES », *REVUE FRANCAISE DE SCIENCE POLITIQUE*, VOL. 69, 5, p. 821-843.

²² TODESCHINI M., 1999, « ILLEGITIMATE SUFFERERS: A-BOMB VICTIMS, MEDICAL SCIENCE, AND THE GOVERNMENT », *DAEDALUS*, 128, 2, p. 67-100.

²³ PEDROT F., FERNANDEZ G., BORGNE-UGUEN F.L., 2019, « LES MAISONS DE SANTE PLURIPROFESSIONNELLES : DES ESPACES DE COORDINATION DU SOIN ENTRE PROFESSIONNELS DE SANTE, PATIENTS ET PROCHES-SOUTIENS », *JOURNAL DE GESTION ET D'ECONOMIE DE LA SANTE*, N° 1, 1, p. 110-126

²⁴ EMPEREUR-BISSONNET P., RICHARD J.-B., MOTREFF Y., ZEGHNOUN A., SAOUDI A., PERRINE A.-L., BLANCHARD M., MOREL P., COLLEVILLE A.-C., MARTEL M., LE LAY E., GOLLIOT F., 2021, « IMPACT SANITAIRE A COURT ET MOYEN TERMES DE L'INCENDIE INDUSTRIEL DE ROUEN EN 2019 : MATERIELS ET METHODES D'ENQUETE », *ENVIRONNEMENT RISQUES SANTE*, 20, 2, p. 185-190.

face aux plaintes et interrogations de leur patientèle. Pour cela, nous prenons appui sur les travaux sociologiques et anthropologiques constitués autour de l'appréhension des pollutions atmosphériques (Arnodin, 2009²⁵ ; Charvolin et al., 2015²⁶ ; Faugere, 2002²⁷).

Cette analyse débouche sur l'observation de positionnements professionnels différenciés. Il s'avère que les médecins interrogés accordent plus ou moins de crédit à leurs propres perceptions sensorielles et corporelles de l'incident - et celles de leurs patients - en fonction d'attributs variés tels que le genre, la parentalité, la proximité géographique à l'incident, leur mode d'habitat (présence ou non d'un jardin à leur domicile), ou encore en fonction des caractéristiques de leur patientèle.

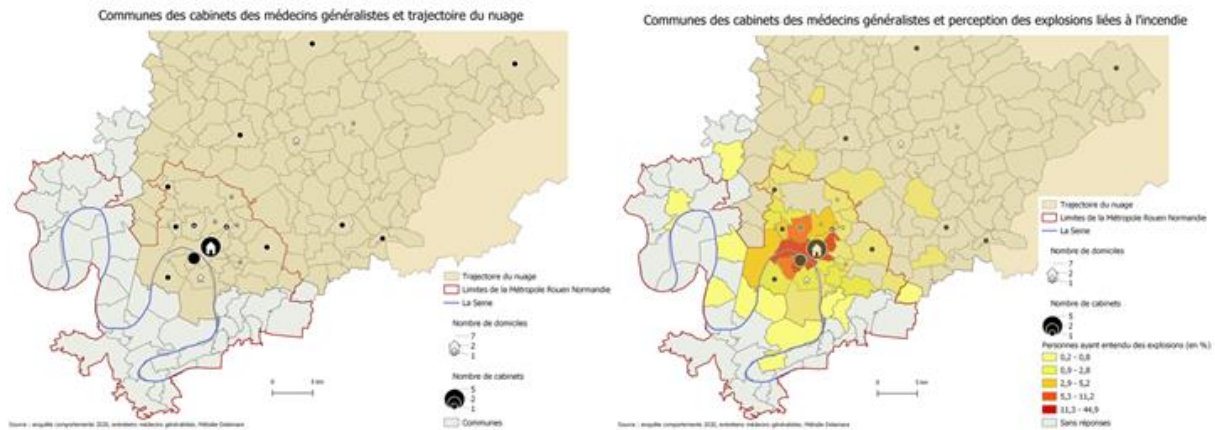


Figure 22 : Répartition des enquêtés selon leur lieu de vie, de cabinets

Expérience sensorielle de soi et des patients, le brouillard diagnostique

Les plaintes des patients durant l'incendie semblent entrer en contradiction avec la crise sensorielle initiale. Tout d'abord, à l'opposé des fumées noires, cette fois-ci il n'y a « rien à voir » comme le dit un médecin. Certains patients témoignent avoir eu des répercussions physiologiques, donc des expériences corporelles. Ils désirent alors bien souvent que les médecins attestent de cette expérience en demandant des arrêts de travail, des prises de sang et autres diagnostics pour apporter la preuve scientifique de leur exposition. Or les symptômes sont aspécifiques donc difficilement observables et difficilement imputables à l'incendie : maux de têtes, difficultés respiratoires, gênes... Ce sont des expériences ordinaires.

Les plaintes sont alors jugées plus ou moins recevables en fonction de catégorisations effectuées par les médecins. Trois catégories se dégagent de façon récurrente dans les discours : les patients somatiques, les patients anxieux et les non anxieux.

1. Les « somatiques » sont ceux dont la demande paraît la plus légitime : ils auraient bel et bien été confrontés à certaines conséquences de l'incendie. Y sont classés les individus dont l'activité professionnelle implique une proximité géographique et une exposition aux fumées : les chauffeurs de bus, les policiers, les barmans ou professeurs de sport travaillant sur les quais et les pompiers intervenus lors de l'incident. On y trouve également les personnes considérées comme vulnérables : les asthmatiques, les femmes enceintes, les femmes allaitantes ou les jeunes enfants.

2. Les « anxieux » sont au contraire ceux dont les demandes paraissent les moins légitimes, voire abusives. Ici sont classés des patients plutôt jeunes, décrits comme habitant « rive droite ». Cette catégorisation spatiale rejoint une catégorisation sociale : ce sont les habitants considérés comme ayant un niveau de vie plus élevé. Ils sont ainsi qualifiés parfois de « cadres » ou parfois d'« écolos » ou encore de « néo-ruraux ». Ce sont des personnes qui sont globalement jugées comme non habituées aux pollutions de la ville, ou désirant échapper à cet

²⁵ ARNODIN L., 2009, « Imaginaires du brouillard », *Ethnologie française*, Vol. 39, 4, p. 609-622.

²⁶ CHARVOLIN F., FRIoux S., KAMOUN L., MELARD F., ROUSSEL I., 2015, *Un air familial ? Sociohistoire des pollutions atmosphériques*.

²⁷ FAUGERE E., 2002, « Percevoir ou mesurer ? Approche anthropologique de la qualité de l'air », *EUROPAEA-Journal des Européanistes*, VIII, 1, 2, p. 19.

environnement urbain, et par conséquent très facilement gênées par des nuisances. De plus, ils ont accès à l'information et en font part dans les consultations, ce qui met en difficulté certains médecins : « *ils en savent plus que nous* » ironise l'un d'eux.

3. Ils sont alors opposés au « non anxieux ». Au contraire, ces derniers sont décrits comme étant situés « rive gauche » et catégorisés comme une population « ouvrière » voire « populaire ». On y retrouve également classés les employés de l'usine Lubrizol et les personnes âgées. Ces individus semblent avoir accepté la pollution dans leur cadre de vie et leurs habitudes, ce qui expliquera selon les médecins leur absence de plaintes. Les personnes âgées quant à elles sont peu inquiètes des potentiels risques à long terme de l'incendie.

Dans la continuité de l'anthropologue Mary Douglas, la pollution peut être définie comme un élément hors de sa place (Douglas et Wildavsky, 1983²⁸). L'expérience sensorielle ne suffit pas en elle-même pour faire surgir la perception d'un trouble. Il faut qu'elle soit jugée comme une perturbation d'un ordre et d'un environnement habituel. Ainsi, lorsque les habitants acceptent la pollution comme étant inhérente à leur cadre de vie, l'incendie de Lubrizol peut-elle être encore perçue comme une pollution ?

Replacer la pollution dans l'environnement de la région devient alors parfois un moyen utilisé par les médecins eux-mêmes pour répondre aux plaintes des patients considérés comme anxieux : « *de toute façon Rouen on vit à côté des usines soit, il faut vivre avec, soit vous ne voulez pas vivre avec* ».

Dans ce brouillard diagnostique, les médecins ne se limitent pas à des réponses strictement médicales mais ont parfois eu recours à des réponses très pragmatiques, relevant du sens commun. Face à l'urgence et par défaut d'informations, ils s'appuient sur leur « *bon sens* », comme le répètent plusieurs d'entre eux. Ils entendent avoir prodigué des préconisations s'appuyant sur les perceptions sensorielles et corporelles de l'incendie : ne pas manger les fruits et légumes souillés, aérer la maison, laver sa terrasse, boire l'eau du robinet ou non.... Chaque médecin prodigue des conseils qui se veulent pragmatiques, et dépendent pour beaucoup de leur propre attitude face à l'incident. L'expérience personnelle du médecin devient alors une des premières sources informationnelles et une ressource professionnelle.

[La médecine générale en contexte singulier : une analyse des logiques informationnelles en période de crises environnementales et sanitaires](#)

En contexte d'incertitude majeure, les médecins généralistes mobilisent à la fois des ressources informationnelles professionnelles ordinaires (institutions nationales ou régionales, CHU, URML, groupes de pairs) et d'autres qui apparaissent par contraste comme extra-professionnelles (réseaux amicaux et conjugaux, presses nationales ou régionales, réseaux sociaux, etc.). La comparaison des deux crises sanitaires permet de comprendre plus finement ces différentes ressources et comment les médecins recherchent, traitent et mobilisent les informations disponibles.

Les MG font face à un premier ressort de l'incertitude relatif aux limites des savoirs à mobiliser (Fox, 1988⁴²). Cette incertitude liée à l'accès et à la maîtrise du savoir médical est décrite par les praticiens rencontrés comme particulièrement prégnante en contexte de crises sanitaires. Elle a alors suscité des formes d'accommodements singulières permettant de questionner leur positionnement à l'égard de l'« *objectivité scientifique* » et de la médecine des preuves (Bloy, 2008⁴¹ ; Dodier, 2003²⁹).

Dans le cas de l'incendie de Lubrizol, c'est le manque de savoir scientifiquement étayé qui s'impose comme le principal défi et avec lui la faiblesse des informations institutionnelles communiquées aux médecins : « *C'était le silence* ». Dans la crise de la Covid-19, l'incertitude des savoirs se déploie de manière radicalement différente, les médecins étant noyés sous la profusion d'information.

²⁸ DOUGLAS M., WILDAVSKY A., 1983, *Risk and Culture: An Essay on the Selection of Technological and Environmental Dangers*, 224 p.

²⁹ DODIER N., 2003, *Leçons politiques de l'épidémie de sida*, Paris, Editions de l'Ecole des hautes études en sciences sociales (Cas de figure), 359 p.

« Avec Lubrizol on avait un défaut d'informations : on ne savait pas [...]. Avec le COVID, on est noyé sous les informations. Ce qui fait qu'on n'a pas le temps de retenir l'information essentielle. Tous les jours, nos boîtes mails, c'est une trentaine d'informations ».

Devant ce silence, ou le surplus d'information, les MG ont cherché des informations par différentes manières. Suivre l'actualité « grand public » (TV, presse écrite, radio) devient alors un enjeu afin d'avoir le même niveau d'information que les patients.

Aux réseaux strictement professionnels s'entremêlent des relations amicales voire conjugales. La plupart des enquêtés compte des professionnels de santé parmi leurs proches, parmi lesquels les sources hospitalières sont privilégiées. Les informations venant du CHU sont signalées comme légitime et faisant autorité.

« [à propos de Lubrizol] Je contacte mon meilleur ami [médecin hospitalier] : est-ce que tu es au courant ? Est-ce qu'il y a un plan blanc ? Et il me renvoie le premier message envoyé aux employés du CHU qui dit ne vous inquiétez pas, venez travailler normalement »

Cette expertise par les proches peut également – mais dans des cas relativement rares – être allouée à des professionnels hors du monde médical, comme un médecin sollicitant une connaissance ingénieure en dépollution pour décrypter certaines données de l'incendie.

C'est finalement cette situation d'absence de savoir officiel diffusée de façon homogène dans la profession médicale qui enjoint un report sur l'expérience personnelle, et conduit alors à des postures différenciées.

Ces différents cas nous amènent à plusieurs hypothèses que nous désirons explorer dans la suite de nos travaux pour comprendre ces différents positionnements. Il nous semble observer une différenciation générationnelle voire genrée, les jeunes femmes apparaissant plus sensibilisées à cette pollution et davantage remettre en cause les discours rassurants ou les enquêtés ayant un potager, sensibles aux répercussions environnementales. Les parents de jeune enfant semblent inquiets, au contraire des médecins au-delà de la cinquantaine. D'autres facteurs doivent être croisés afin de permettre de conclure : situation géographique, exposition sensorielle, présence ou non d'experts dans les réseaux informels, etc.

iii. Enrichir la compréhension de l'incertitude dans l'exercice de la médecine générale

Le modèle de l'incertitude développé par G. Bloy identifie deux axes majeurs : l'incertitude relative aux savoirs médicaux et celle relative aux plaintes singulières des patients (Allen et al., 2002⁴⁰ ; Bloy, 2008⁴¹ ; Fox, 1988⁴² ; Gocko et al., 2017⁴³ ; Han, Klein et Arora, 2011⁴⁴ ; Motte et al., 2020⁴⁵). Nous avons mis au jour ce modèle sous les effets de ces contextes d'exercices singuliers de la médecine générale. L'enrichissement de ce modèle – comme cela a déjà été fait pour prendre en compte la place croissante de la dimension pluri-professionnelle dans le système des soins primaires (Pedrot, Fernandez et Borgne-Uguen, 2019⁴⁹) –, a été envisagé d'une part en pensant ces deux formes d'incertitudes à travers leurs imbrications, et, d'autre part, en explorant une troisième variable, celle de l'articulation entre l'expertise professionnelle des MG et leurs expériences personnelles de ces crises.

Une incertitude amplifiée en temps de crise : savoirs distants, patients insistants et information difficilement accessible

D'une part, le rapport que le praticien entretient au savoir médical est à la fois trop vaste pour être maîtrisé et inadéquat aux formes d'objectivité « dans la proximité » (Dodier, 2003⁵⁵). Or, cette incertitude est amplifiée dans le contexte de crise(s). À mesure que la maîtrise d'un savoir objectif s'étioloit soulevant des questions complexes et parfois nouvelles, les plaintes et les questions des patients prennent davantage de place dans le cabinet médical.

D'autre part, et c'est en partie la conséquence de cet usage complexe d'un savoir médical incertain, les patients expriment dans le cabinet des plaintes difficiles à résorber. Ce deuxième ordre d'incertitude pointé par Bloy connaît, dans le contexte de Lubrizol comme de l'épidémie de la Covid-19, une extension potentiellement problématique. Le contexte de crise sanitaire engage ici non seulement une expression accrue des attentes des patients dans le cabinet, mais également l'idée que la variété de leurs motifs d'interrogation s'efface au profit de questionnements répétés. Ces questions standards et récurrentes de la part de patients confrontés aux problématiques de ces crises ne sont pas simples à gérer pour autant du fait de leur nouveauté.

Au croisement de ce double problème pratique – savoirs instables et plaintes récurrentes –, notre enquête a montré que cette tension classique de la médecine générale a épousé ici la forme d'une problématique informationnelle. Or, celle-ci est de nature à enrichir le modèle de Bloy en tant qu'elle invite à penser de manière interactive les deux dimensions de l'incertitude en médecine générale. Par la recherche d'information, les praticiens ambitionnent d'atténuer le problème de l'étendue infinie et en expansion des savoirs à maîtriser, et à résorber l'expression des plaintes qui s'expriment au cours des consultations. Mais le problème en matière d'information est double : il concerne la qualité des informations et les voies d'accès à celles-ci. La recherche d'une information étant ici indissociable de la recherche d'un informateur, et celui-ci a tendance à disparaître derrière les fumées noires de Lubrizol et les aérosols de la Covid-19.

Expertise professionnelle des généralistes et expérience personnelle des crises

Les deux crises étudiées ont pour caractéristiques de ne pas épargner les médecins. Eux aussi ont été saisis par les odeurs de l'incendie, et certains ont fui Rouen au petit matin. L'épidémie de la Covid-19 et les inquiétudes relatives à sa diffusion et à ses symptômes ont pu les inquiéter. C'est pourquoi notre enquête éclaire également la façon dont l'expérience personnelle de ces épreuves sanitaires s'articule aux pratiques professionnelles. Avancer ici que les patients partagent un certain nombre d'interrogations avec les médecins eux-mêmes revient à dire que l'épreuve sanitaire constitue pour ces derniers une épreuve professionnelle autant que personnelle. Les enquêtés ont mobilisé des ressources fortes différentes, empruntées à leurs expériences passées pour gérer - par empirisme - ces situations de crise dans leur cabinet médical. Dans les limites de cette enquête, il a été noté un biais d'« horizontalisation » des relations patients-médecins, vécue au moins par certains de ces médecins. Les conséquences à long terme, difficiles à appréhender pour les enquêtés, ont ainsi parfois pu donner lieu à des formes de rapports plus égalitaires avec les patients, lesquelles sont valorisées en contexte d'incertitude, dans un modèle relationnel oscillant entre « l'expert-guide » et le « médecin partenaire » (Lussier et Richard, 2008³⁰ ; Richard et Lussier, 2016³¹). Un second levier de ce processus, dont on peut faire l'hypothèse qu'il découle de la situation de crise sanitaire, provient du fait que les événements ont pu les saisir comme n'importe quel citoyen, avant de les mobiliser comme médecin. C'est par exemple le cas de l'incendie de Lubrizol qui se donne à voir, à entendre et à sentir comme une épreuve personnelle avant d'être une épreuve professionnelle.

4. La gestion de la crise dans les collèges de l'agglomération rouennaise

i. Méthodologie et objectif

Nous avons réalisé des entretiens semi-directifs, voire non directifs, cherchant à laisser la parole la plus libre possible aux interviewés. L'objectif était à la fois de recueillir des informations factuelles pour documenter l'accueil des élèves suite à l'incendie, tout en laissant la possibilité aux interviewés de s'exprimer sur leurs éprouvés au moment de l'incendie. Trois des quatre entretiens ont été réalisés en ligne et nous avons choisi de travailler sur la transcription de l'enregistrement audio de ces entretiens. Après une courte présentation de leur itinéraire professionnel, les interviewés ont été invités à réagir à une image de l'incendie que nous leur avons montrée. Voici quelques extraits de verbatim en réponse à la question : « qu'est-ce que cette image évoque pour vous, sur le plan professionnel ? » L'image a une importante puissance évocatrice. Ce point fait partie de nos réflexions actuelles sur la méthodologie dans deux directions : quels effets sont induits par le choix de cette image sur le discours des interviewés ? Quel est le lien entre l'image et la remémoration, notamment le souvenir des affects éprouvés ?

Notre échantillon se compose de quatre Conseillers principaux d'éducation (CPE) dans quatre collèges qui travaillent avec 2062 élèves. Ils sont tous dans l'agglomération rouennaise, plus ou moins loin de l'incendie. L'un est en réseau d'éducation prioritaire, un autre est en centre-ville et accueille une population plutôt favorisée. Les CPE ont été confrontés à deux types de situations : dans deux collèges, les élèves étaient présents dès 8 h à l'ouverture de l'établissement, alors que dans les deux autres, il y avait très peu d'élèves à l'ouverture et ils sont ensuite rentrés à leur domicile dans la journée. Dans ces établissements, l'accueil des élèves s'est fait le lundi suivant l'incendie. Dans deux collèges, les professionnels ont décidé de faire grève, utilisant leur droit de retrait, inquiets pour leur santé. Tous les CPE interviewés évoquent l'odeur d'hydrocarbure très forte dans les jours qui ont

³⁰ LUSSIER M.-T., RICHARD C., 2008, « En l'absence de panacée universelle », *Canadian Family Physician*, 54, 8, p. 1096-1099.

³¹ RICHARD C., LUSSIER M.-T., 2016, *La communication professionnelle en santé 2e édition*, PEARSON, 828 p.

suivi l'incendie : « l'odeur était insupportable » ; « l'odeur était tout de même très présente / je ne sais pas si vous vous souvenez de cette odeur / elle était quand même très très présente et elle imprégnait les murs / enfin bon c'était quand même particulier».

ii. Principaux résultats

La gestion de la crise par les conseillers principaux d'éducation

Dans les quatre établissements enquêtés, les CPE ont témoigné de l'absence de système d'alerte interne à l'Éducation nationale. Les consignes ont été diffusées par la Préfecture. D'après les interviewés, les chefs d'établissement s'attendaient à recevoir des consignes du Rectorat pour gérer la situation. La décision de fermer les établissements scolaires du second degré n'a été diffusée par la hiérarchie de l'Éducation nationale qu'à 11 h le 26 septembre. De 7 h à 11 h, ce fut donc l'attente. Dans l'attente, certains chefs ont communiqué avec les enseignants, les parents, les élèves ; d'autres non. Les interviewés expliquent qu'il n'y avait pas de système d'alerte efficace, par exemple pour envoyer un message sur les téléphones des personnels ou des familles pour les informer de la fermeture des établissements. Chacun a cherché l'information par lui-même sur les réseaux sociaux, les médias en ligne, la télévision ou la radio.

Au cours de cette recherche, il nous est apparu que les CPE ont joué un rôle clé dans la gestion de la crise Lubrizol dans les collèges de l'agglomération rouennaise. Ils ont été "sur le front" très tôt pour prendre en charge les élèves et préparer leur accueil. Assurer la sécurité physique et affective des élèves fait partie de leur mission et ils l'ont assurée le 26 septembre 2019. Les CPE sont des personnels d'éducation habitués à la gestion des urgences (Condette, 2013). Plusieurs interviewés évoquent le bon sens le jour J : les issues sont calfeutrées, les élèves confinés à l'intérieur des locaux. Ils soulignent l'importance des exercices (PPMS) qui sont faits régulièrement dans les collèges et ont été très utiles lors de l'incendie de Lubrizol.

Dans plusieurs entretiens, les CPE font le lien entre la crise Lubrizol et la crise Covid, notamment la gestion du premier confinement. Ils estiment que la crise Lubrizol a constitué une forme de préparation pour faire face à l'incertitude qui a caractérisé la période suivante. De notre point de vue, il nous semble que l'incertitude est devenue un des traits caractéristiques du travail des CPE. C'est un de nos axes de travail actuellement : quels sont les effets de l'incertitude sur les professionnels de l'éducation et sur leurs prises de décision en situation ?

Un sentiment d'abandon, voire de détresse

Si en situation, au moment de l'incendie et dans les jours qui ont suivi, les CPE interviewés disent avoir réussi à faire face à la situation de crise, dans un après coup de plus d'un an, ils disent avoir le sentiment d'avoir été abandonnés par leur hiérarchie. L'incendie a un caractère traumatique : à posteriori, les interviewés font preuve d'une hypermnésie caractéristique des événements traumatiques. Ils se souviennent avec une très grande précision de la manière dont ils ont appris la nouvelle de l'incendie, s'attachant à des détails très précis. Ils rapportent aussi comment ils ont clivé leur vie professionnelle et leur vie personnelle au moment de prendre en charge les élèves dans les collèges.

La peur ressentie par les professionnels, les angoisses pour leur vie, semble avoir été inhibée dans l'action dans les premières heures de l'accident.

5. Perception et vécu des adolescents et jeunes adultes face aux risques industriels suite à l'incendie

i. Objectifs

Les objectifs de la phase 2 ont consisté à recueillir et analyser la perception et le vécu d'une population de jeunes adultes étudiants de l'agglomération rouennaise à 28 mois de l'incendie. Ce travail s'inscrit dans la suite de la phase 1 au cours de laquelle ces mêmes objectifs ont porté sur une population de collégiens et de lycéens (questionnaire en ligne en juin 2020) puis d'étudiants (entretiens individuels et focus groups au premier semestre 2021) de l'agglomération rouennaise, confrontés à l'incendie.

ii. Résultats

Le registre de la sensorialité

On note que le fait de se déclarer sous ou hors passage du nuage n'a pas d'impact sur la production de réponses sensorielles. On avait déjà noté dans la première phase de recueil de données (questionnaire collégiens et lycéens) un écart très faible dans la production de ce type de réponse entre les personnes qui étaient sous le passage du nuage et celles qui étaient hors du passage du nuage, avec respectivement 18% et 20%.

Par contre, la fait d'avoir été confronté aux odeurs impacte la production de réponses sensorielles. En effet, 78 % des personnes qui ont senti des odeurs suite à l'incendie de Lubrizol ont produit des réponses texte convoquant le registre de la sensorialité. Par ailleurs, 75% des répondants déclarant avoir été confronté à des retombées de suie produisent des réponses sensorielles. Enfin, 19% évoquent avoir ressenti des symptômes suite à l'incendie.

Les réponses sensorielles sont donc très présentes dans les textes produits. Cela n'est pas étonnant, dans la mesure où les représentations à l'égard des risques industriels diffèrent entre les « experts » (ingénieurs, scientifiques, etc..) et les « profanes ». « Si les premiers voient par exemple les dangers potentiels d'une centrale nucléaire en termes de probabilités et de risques physiques, les seconds les évaluent à l'aune des troubles qui affectent leur santé ou de ceux qui les toucheraient de plein fouet en cas d'accident. » (Le Breton, 2017, p.48). Ainsi, l'évaluation des dangers potentiels ne se fait pas au travers des mêmes filtres. Tandis que les experts mobilisent les statistiques, les tests et les mesures, la population perçoit le danger au travers de filtres sensoriels.

On note donc que le risque est d'abord appréhendé au travers de perceptions sensorielles. Les jeunes ont fait une expérience empirique de l'incendie. Le danger représenté par l'incendie de Lubrizol a été perçu de façon olfactive et visuelle, que les personnes soient exposées, ou non, au nuage. Par ailleurs, les réponses produites, aussi bien dans le questionnaire 2020 que 2022, témoignent d'un mode de représentation des risques industriels qui procède par une assimilation du dérangeant au dangereux. Cette assimilation dérangeant-dangereux avait déjà été mise en avant dans les travaux de Chauvier (2007) qui établit un lien entre « l'empirique industriel et un vécu négatif et anxiogène ».

Les réponses sensorielles ne font pas uniquement références à l'olfactif et au visuel, mais renvoient également aux perceptions corporelles. En effet, le nuage et les odeurs sont fréquemment évoqués en y associant des désagréments physiques (maux de tête, toux, difficulté à respirer, etc.). Les nuisances olfactives ou les nuisances visuelles sont donc mentionnées en les associant à la gêne qu'elles provoquent. Beaucoup font le lien entre les fumées, par exemple, et les conséquences que celles-ci peuvent entraîner sur leur santé.

Anxiété et dépression

Les scores d'anxiété à l'échelle HAD varient entre 0 et 15 (avec une concentration entre 6 et 9). Les scores de dépression se situent, quant à eux, entre 0 et 11 (avec une concentration de 1 et 2).

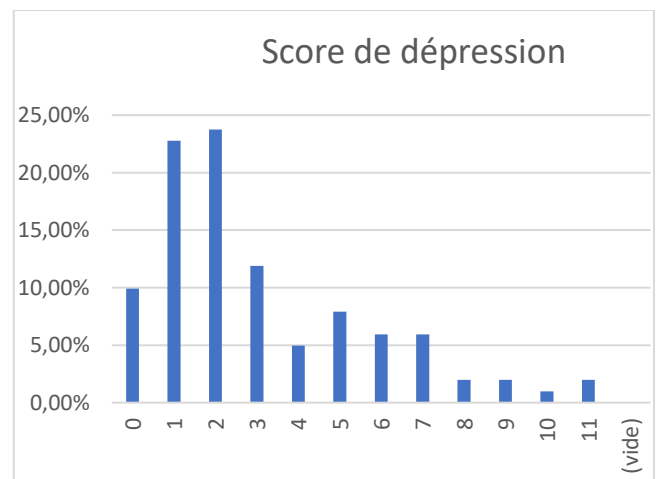
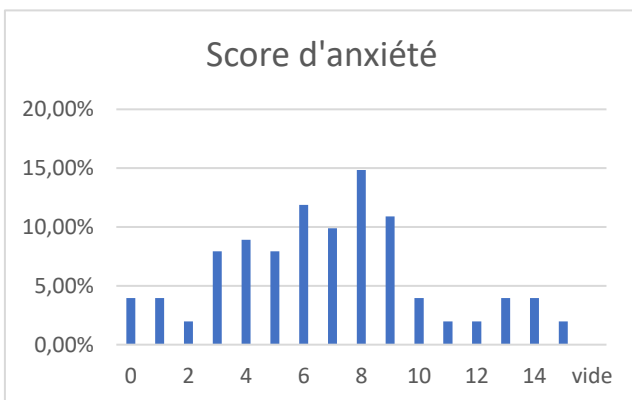


Figure 23 : Score d'anxiété

Figure 24 : Score de dépression

68% des répondants déclarent que ces scores correspondent à leur situation actuelle.

Ainsi, on note que dans 32% des cas, l'incendie de Lubrizol a pu avoir un impact sur les scores d'anxiété et de dépression déclarés par les étudiants. Ce résultat va dans le sens de l'enquête menée par Santé Publique France publié en décembre 2021. En effet, le deuxième volet du dispositif « Santé Post Incendie 76 » (SPI76) souligne « l'impact de l'accident sur la santé mentale (trouble de stress post-traumatique, anxiété généralisée et dépression) des populations vivant dans les zones exposées. (...). Les résultats confirment l'impact de l'accident sur la santé mentale (trouble de stress post-traumatique, anxiété généralisée et dépression) des populations vivant dans les zones exposées (...). La prévalence des troubles psychologiques était plus élevée à proximité du lieu de l'incendie. Les résultats obtenus montrent l'existence d'un lien entre l'exposition à l'incendie et la santé mentale des personnes exposées, ainsi : 6% de la population de la zone exposée présentait un trouble de stress post-traumatique probable et attribué à l'incendie ; 15% de la population de la zone exposée présentait une anxiété généralisée probable (contre 9% en zone témoin) ; 18% de la population de la zone exposée présentait une dépression probable (contre 12% en zone témoin). Au total, les résultats indiquent que 23 % des répondants de la zone exposée présentaient au moins un trouble de santé mentale, et que 5% présentaient à la fois un trouble de stress post-traumatique probable et une dépression probable. »

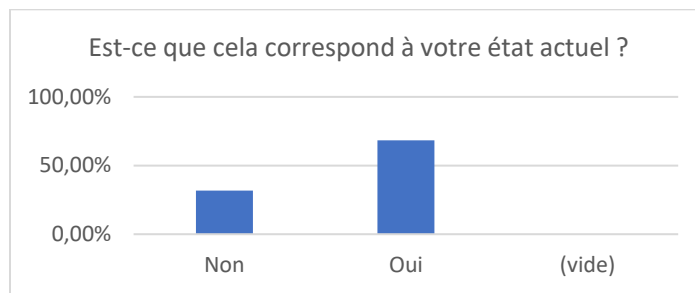


Figure 25 : Expression et anxiété au prisme de la situation actuelle des adolescents et jeunes adultes

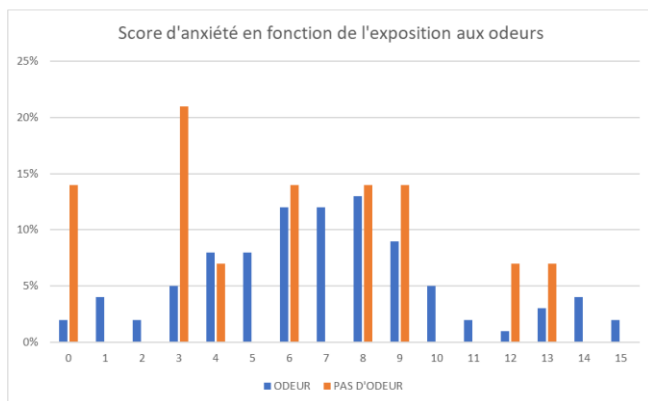


Figure 26 : Score d'anxiété en fonction de l'exposition aux odeurs

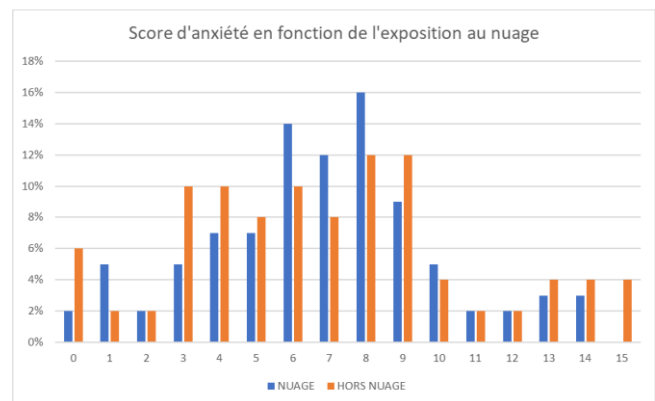


Figure 27 : Score d'anxiété en fonction de l'exposition au nuage

Les émotions dans les réponses textes

69% des réponses texte convoque un registre émotionnel.

Parmi ces réponses, 86% font référence à la peur, viennent ensuite les réponses convoquant le registre de la colère (25%), puis celle traduisant de l'ambivalence (alternance de joie et d'inquiétude liée à l'incompréhension d'un évènement extraordinaire). L'incendie semble ainsi avoir produit un choc émotionnel avec anxiété et animosité.

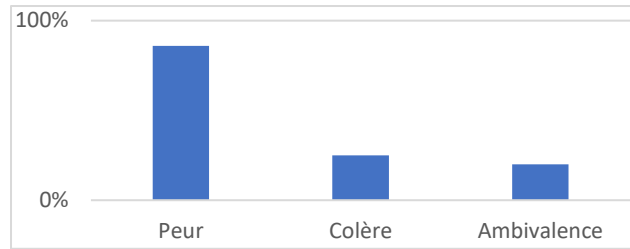


Figure 28 : Le registre émotionnel évoqué dans les réponses texte

L'euphémisation

Dans 25% des cas les réponses manquent de précision (« je ne me souviens plus », « journée banal ») : Ce résultat est proche de celui de l'enquête par questionnaire de 2020 où les réponses « euphémisantes » représentaient près de 20% des réponses produites par les collégiens et lycéens. Par ailleurs, il convient de noter que le fait de se trouver sous le passage du nuage ou hors du passage du nuage ne semble pas avoir d'incidence sur ce type de réponse.

Cette tendance à minimiser le risque est également apparue dans les discours recueillis lors de la phase de recueil de données par entretiens et focus groups. Il convient de noter que l'euphémisation des risques est un aspect que l'on retrouve fréquemment dans la littérature sur la perception des risques industriels et nucléaires. Ainsi, Duclos (1987) constate un déni du risque face aux dangers industriels récurrent dans les entretiens qu'il a mené avec les ouvriers de la chimie. Plus récemment, les travaux de Flanquart (2019) se sont intéressés aux processus qui conduisaient à nier, ou du moins à euphémiser, les risques industriels ou nucléaires.

En plus de la relativisation de l'évènement on note une absence de souvenir précis : « Je ne me souviens plus exactement. Mais je me souviens que ma famille avait peur des évènements, ensuite des retombées odeur nuage »

A l'inverse des étudiants se plaçant dans une posture euphémisante, nous notons que la plupart conserve un souvenir vivace de leur journée du 26 septembre.

L'impact émotionnel et la précision du souvenir

75% des réponses produites aux deux questions ouvertes sont codées comme des réponses précises (la personne se remémore et relate sa journée du 26 septembre). Il semble intéressant de noter que la précision des réponses produites peut être mise en lien avec les souvenirs flash. Les souvenirs flash correspondent au « souvenir détaillé et vivace des circonstances dans lesquelles un individu est informé de la survenue d'un évènement particulièrement surprenant ou ayant sur lui un fort impact émotionnel et présentant des conséquences immédiates sur le plan individuel et/ou social » (Brown et Kulik, 1977 : 73).

Il semblerait que l'impact émotionnel généré par l'incendie Lubrizol, à favoriser la formation d'un souvenir vivace. Il est important de noter que les personnes exposées aux odeurs ont produit des réponses davantage précises que celles déclarant ne pas avoir été exposées aux odeurs.

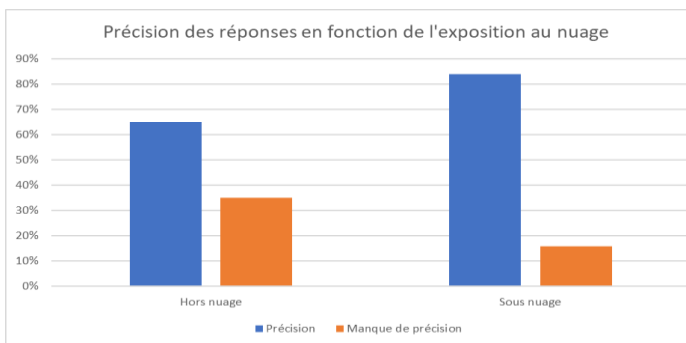


Figure 29 : Précision des réponses en fonction de l'exposition au nuage

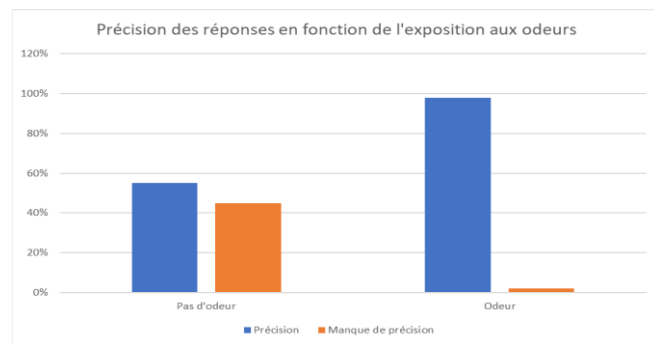


Figure 30 : Précision des réponses en fonction de l'exposition aux odeurs

La famille dans les réponses textes

Dans 51% des réponses texte, les étudiants évoquent leur famille (la plupart de temps les parents). Parmi ces réponses, 75% des réponses font référence aux appels à la famille et 47% déclarent un départ chez les parents.

On note que la référence à la famille est impactée par le fait d'être sous ou hors passage du nuage. En effet, 57% des personnes qui se déclarent sous le nuage ont évoqué leur parent dans les réponses textes qu'ils ont produits. Cela témoigne de la peur ressentie à la perception directe du nuage et de ses effets (suies, toux, etc.).

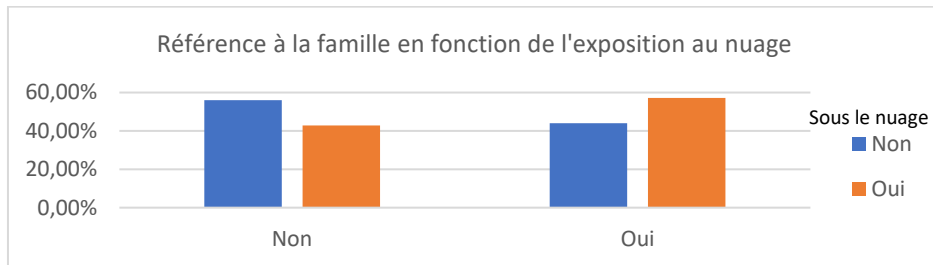


Figure 31 : Référence à la famille en fonction de l'exposition au nuage

Ce comportement de protection qui révèle l'intensité du stress vécu par la famille est plus caractéristique des répondants sous le nuage. Ainsi, les comportements de fuite se sont retrouvés dans les trois phases de recueil de donnée de notre étude. Quand ils en avaient la possibilité, les jeunes ont quitté leur domicile pour se réfugier chez leur parent, espace qu'ils ont considéré comme sécurisant. « La famille quand elle existe est le premier environnement ressource, le premier à recevoir la souffrance du sujet et le récit de ses expériences, le premier à pouvoir contenir et permettre la reprise du développement du monde interne. » (Delage, 2004 : 344).

iii. Conclusion

On note une production de réponses « précises » dans l'enquête qualitative et dans le questionnaire 2022 :

- La vivacité des souvenirs témoigne de l'impact émotionnel de l'évènement.
- L'exposition aux odeurs semble jouer un rôle essentiel dans la formation du souvenir.
- Scores d'anxiété et de dépression supérieurs suite à l'incendie pour 32% des répondants.

D. Les marqueurs de l'incendie issus des retombées de l'incendie

Certaines substances spécifiques issues de l'incendie (issues de déversements, de volatilisation/vaporisation, de processus de transformation par combustion des produits stockés sur site, ...), n'ont pas été recherchées par les organismes d'Etat peu après l'incendie, car non réglementées et/ou ne présentant pas de caractère d'urgence de protection des populations et/ou inconnues. Cependant, elles ont pu être disséminées sur une large zone géographique correspondant approximativement à l'étendue du nuage de fumées. Ces substances, non connues d'avance, ont été recherchées de manière ciblée par rapport aux stocks de produits dans les deux usines et de manière non ciblée tout d'abord dans l'air, les dépôts solides carbonés (suies), dans l'eau déversée dans la darse aux Bois et même dans des effluents liquides issus des ruissellements de surface (dus à des précipitations) à proximité du site de Lubrizol. Par ailleurs, afin de conforter l'hypothèse que certaines de ces substances spécifiques ont bien été générées lors de l'incendie, des expériences originales de simulation de feu ont été réalisées dans une enceinte confinée en laboratoire. Des huiles minérales brutes et additivées (contenant des additifs) ont été brûlées, à défaut d'avoir pu obtenir des produits natifs de Lubrizol, et les effluents gazeux et solides (suies) analysés avec les mêmes méthodologies que celles utilisées pour l'analyse des échantillons collectés peu après l'incendie.

La méthodologie analytique d'identification de marqueurs moléculaires de l'incendie des usines Lubrizol et Normandie Logistique combine plusieurs techniques d'identification depuis la composition atomique jusqu'à la conformation des molécules. Elles ont été utilisées sur les échantillons collectés durant l'incendie. Les nombreuses techniques et la très grande diversité moléculaire des échantillons ont nécessité l'emploi d'une échelle de confiance dans l'identification des molécules candidates au statut de marqueurs de l'incendie. L'échelle de Koelmel³² a été utilisée. La confiance sur l'identification des molécules proposées varie alors de niveaux 1 à 5 :

Niveau 1 : structure confirmée utilisant la bibliothèque de spectres interne constituée par l'analyse des substances étalons purs analysées dans les mêmes conditions chromatographiques, dans la même matrice avec le même appareil. Les coefficients de variation calculés sur les temps de rétention ne doivent pas excéder 1 %. L'indice de similarité inverse (RSI) > 600 avec la bibliothèque interne.

Niveau 2 : structure probable ou isomère proche utilisant des bibliothèques externes, c'est-à-dire une correspondance en indice de rétention RI (RI < 50), un RSI > 600 et un score de filtre de masse haute résolution inverse (RHRMF) > 75 par rapport aux données de la bibliothèque de spectres NIST (2.2, 2014) et Orbitrap (thermofisher, 2015).

Niveau 3 : Candidat provisoire utilisant les bibliothèques externes : correspondance des spectres avec un indice de similarité des spectres SI > 500, RSI > 600, RHRMF > 75, mais aucun RI spécifié dans la bibliothèque.

Niveau 4 : Groupe chimique ou formule chimique brute exacte.

4.a : Identification de la formule chimique sans équivoque. Correspondance exacte de la masse pour plusieurs fragments. Des isomères ont souvent été trouvés (un spectre correspondant mais plusieurs pics dans le chromatogramme avec les mêmes fragments, leur confiance d'identification est donc de niveau 4.a).

4.b : Séries chimiques possibles : non utilisées dans cette étude.

4.c : Classe chimique possible (produits chimiques regroupés en fonction de la structure ou des motifs ou de la similitude)

Niveau 5 : Caractéristiques inconnues. Ne répond à aucun des critères des niveaux 1, 2, 3 ou 4.

1. Analyse et choix des huiles brûlées en enceinte de laboratoire

Dans un premier temps, il a été choisi de brûler une huile minérale brute sans additif, car ce type de produits bruts était présent sur le site de Lubrizol le jour de l'incendie. Mais un grand nombre d'additifs de spécialité, produits par Lubrizol, étaient également présents sur site et il a fallu trouver un combustible suffisamment représentatif des formulations d'additifs ayant brûlé lors de l'incendie.

³² Koelmel et al., Exposome, Volume 2, Issue 1, 2022, osac007, <https://doi.org/10.1093/exposome/osac007>

Du fait de la plus grande diversité des additifs présents dans le mélange Bardhal, il a donc été choisi de brûler un mélange de 70% d'huile pour moteur de voiture Neptuna et 30% d'additif anti-usure Bardhal, que l'on nommera « huile voiture additivée ».

2. Effluents gazeux issus de l'incendie – relation avec les essais en enceinte de laboratoire

Juste après l'incendie de Lubrizol et de Normandie Logistique, AtmoNormandie³³ et l'INERIS ont réalisé plusieurs analyses ciblées, dont celles de nombreux hydrocarbures de formule brute de type C_xH_y. **On sait que les alcanes, les alcènes et les hydrocarbures aromatiques persistent dans l'environnement, mais peuvent être émis par de nombreuses sources différentes, en particulier à proximité de zones urbaines et industrialisées denses. Par conséquent, les hydrocarbures ne peuvent être considérés comme des marqueurs de l'incendie.** Afin de vérifier leur présence dans le bruit de fond urbain, des prélèvements ont été réalisés dans les mêmes lieux que le jour de l'incendie de 2019 mais en 2021 et 2022 (L-ROUEN-AIR-5, L-ROUEN-AIR-6, L-ROUEN-AIR-7, L-ROUEN-AIR-8 et L-ROUEN-AIR-9, L-ROUEN-AIR-10, L-ROUEN-AIR-11, L-ROUEN-AIR-12 respectivement). L'ion caractéristique C₉H₁₁⁺ (*m/z* 119,0855) était également présent mais avec des niveaux plus faibles dans ces prélèvements. Pour illustrer cela, les chromatogrammes en extraction d'ion (EIC) sont présentés à la Figure 32.

Certains des composés de la famille des hydrocarbures C_xH_y, dont les aires étaient les plus importantes dans l'air après l'incendie de 2019, étaient également parmi les plus intenses dans les échantillons obtenus après la simulation de l'incendie dans la chambre de combustion (LAB-EXP-T1, LAB-EXP-T2, LAB-EXP-T3 et LAB-EXP-T4, LAB-EXP-C1, LAB-EXP-C2, LAB-EXP-C3 et LAB-EXP-C4), à savoir 1,2,4-triméthylbenzène, 1,2,3-triméthylbenzène, 1,3-diméthylbenzène, 1-éthyl-2-méthylbenzène, mésitylène, 1-éthyl-2,4-diméthylbenzène et 1,2,3,4-tétraméthylbenzène.

Certains composés oxygénés, à savoir le dibutyle phtalate, le p-décylphénol, le 1,10-décanediol, le 2-phénoxyéthanol et le 2-éthoxy-2-méthylpropane, ont été trouvés en quantités similaires en 2019, 2021 et 2022 (ROUEN-AIR-1, L-ROUEN-AIR-2, L-ROUEN-AIR-5, L-ROUEN-AIR-6 et L-ROUEN-AIR-9, L-ROUEN-AIR-10). Le menthol, l'eucalyptol ont été détectés dans des concentrations similaires et pourraient provenir de l'utilisation de produits ménagers dans les locaux de l'université. **Par conséquent, l'ensemble des composés précédemment cités ne peuvent pas être spécifiquement liés à l'incendie accidentel et peuvent être considérés comme faisant partie du bruit de fond de l'air urbain ou intérieur.** Si les hydrocarbures sont éliminés en tant que marqueurs spécifiques de l'incendie, il faut se concentrer sur les molécules contenant des hétéroatomes (oxygène, azote, soufre principalement). En effet, ces derniers ont été détectés dans des proportions significativement plus grandes en 2019 juste après l'accident (L-ROUEN-AIR-1, L-ROUEN-AIR-2, L-ROUEN-AIR-3 et L-ROUEN-AIR-4) que dans l'air ambiant en 2021 et 2022 (L-ROUEN-AIR-5, L-ROUEN-AIR-6, L-ROUEN-AIR-7, L-ROUEN-AIR-8 et L-ROUEN-AIR-9, L-ROUEN-AIR-10, L-ROUEN-AIR-11, L-ROUEN-AIR-12 respectivement).

Afin d'identifier les molécules qui sortent du bruit de fond urbain, le test de Grubbs a été utilisé pour détecter une valeur aberrante dans une série de valeurs. Dans le cas présent, cette approche a permis de déterminer si une molécule détectée, qui semblait intéressante, était significativement plus intense que le bruit de fond. Le bruit de fond a été caractérisé avec quatre échantillons de chaque adsorbant : deux d'avril 2021 (L-ROUEN-AIR-5, L-ROUEN-AIR-6, L-ROUEN-AIR-7, L-ROUEN-AIR-8) et deux de janvier 2022 (L-ROUEN-AIR-9, L-ROUEN-AIR-10, L-ROUEN-AIR-11, L-ROUEN-AIR-12). La valeur critique de 1,749 a été lue dans le tableau de Grubbs pour *n* = 5 échantillons (quatre provenant du bruit et un d'un échantillon de 2019 présentant l'intensité la plus élevée), et avec un intervalle de confiance de 99 %. Ces valeurs ont été comparées aux résultats du calcul suivant (équation 1) :

$$\frac{(L-ROU-AIR-X) - \mu}{\sigma} \quad (\text{Équation 1})$$

où L-ROU-AIR-X est l'échantillon prélevé en 2019, μ est la moyenne des 5 échantillons et σ est l'écart-type. La moyenne et l'écart-type ont été calculés pour les 5 échantillons. Si le résultat était supérieur à 1,749, la valeur de l'échantillon de 2019 était considérée comme étant hors du bruit de fond et possiblement spécifiquement liée à l'incendie accidentel.

³³ Rapport Atmonormandie n°2520-001 (2020).

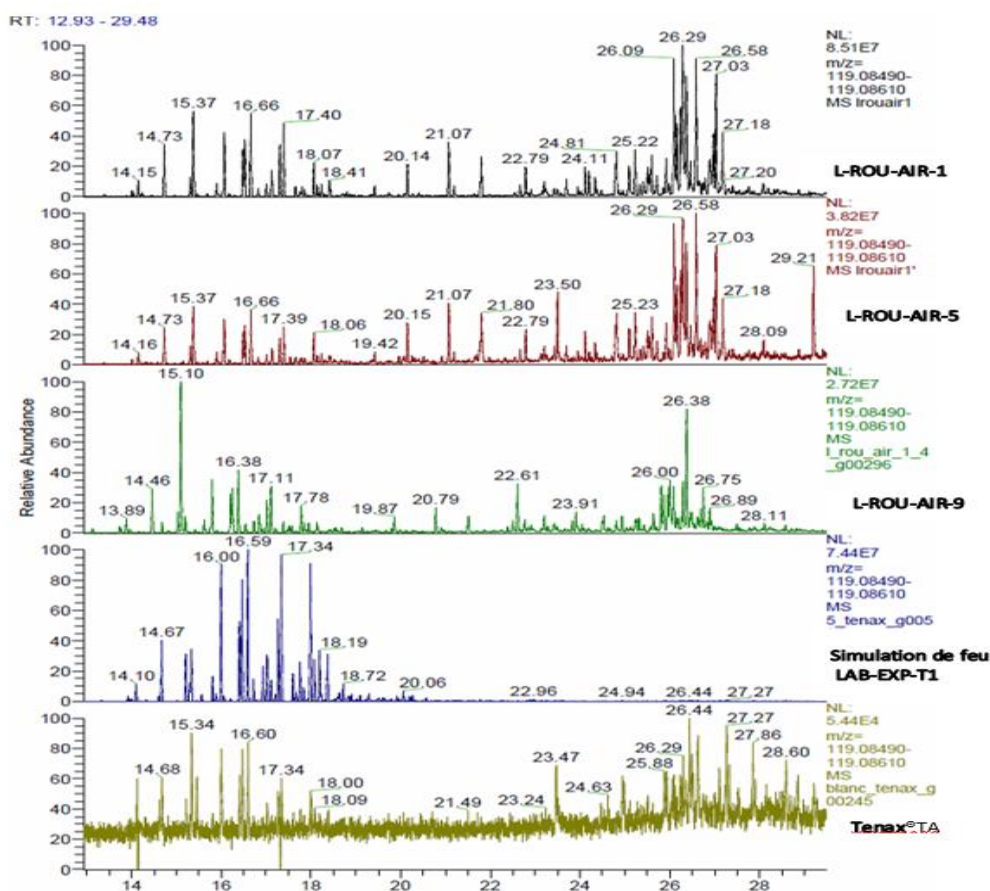


Figure 32 : Chromatogrammes provenant des échantillons d'air, issus de l'extraction de l'ion m/z 119,085

Parmi les 36 molécules de soufre détectées en phase gazeuse après le feu industriel, 34 molécules ont également été détectées à l'aide d'une stratégie d'analyse ciblée sur les tubes adsorbants collectés lors de la simulation du feu. Les ordres de grandeur des aires moyennes sont parfois très différents en raison de la différence de composition des produits brûlés en 2019 et des huiles commerciales brûlées en 2022 lors de la simulation de feu réalisée en laboratoire. Néanmoins, la détection des composés impliqués dans l'émission en phase gazeuse du feu reproduit en laboratoire est apparue comme un élément important, permettant de conclure que certaines molécules peuvent être effectivement liées au feu industriel (Tableau 10). Parmi elles, 6 ont été annotées avec un niveau de confiance de niveau 1 par injection d'étalons (2-acétylthiophène, 2-propionylthiophène, 2,2'-bithiophène, 3,3'-bithiophène, thieno[3,2-b]thiophène et di-tert-butyl-disulfide). De plus, le di-tert butyl-disulfure a également été détecté par AtmoNormandie et était présent dans le stock de Lubrizol sous la forme du polysulfure di-tert-butyle. Un total de 15 structures putatives sont restées au niveau 2 parce que les étalons purs n'ont pas été achetés et injectés. En ce qui concerne les molécules oxygénées, le 1,3,5-trioxane a été annoté avec le niveau 1 mais n'a pas été identifié dans l'échantillon prélevé lors de la simulation d'incendie. Cependant, il peut avoir été produit par la combustion d'autres produits stockés de l'usine Lubrizol et Normandie logistique. **Le Tableau 10 constitue la liste des molécules marqueurs de l'incendie pour la fraction gazeuse car ayant à la fois les caractéristiques suivantes : détachement du bruit de fond urbain, présence dans le rejeu du feu en enceinte confinés et dans les stocks ayant brûlé, puis indice de confiance de Koelmel 1-2.**

PARTIE III : RESULTATS
Chapitre D : les marqueurs de l'incendie

Tableau 10 : Comparaison des molécules identifiées dans les échantillons collectés juste après l'incendie industriel et la simulation d'incendie sur huile moteur additivée (les composés notés en gras ont un haut niveau de confiance 1 ou 2 selon l'échelle d'identification de Koelmel)

Structures putatives	RI échantillons 2019	RI simulation incendie 2022	m/z le plus abondant	Moyenne des aires sur l'ion le plus abondant 2019	Moyenne des aires sur l'ion le plus abondant 2022
2,5-diméthyl-1,4-dioxane	808	806	72,0570	3.10 ⁶	1.10 ⁵
di-tert-butyl-disulfide	1137	1135	178,0843*	3.10 ⁵	8.10 ³
thiophène	664	669	84,0029	2.10 ⁷	3.10 ⁹
2-méthylthiophène	775	773	97,0106	6.10 ⁶	2.10 ⁸
3-méthylthiophène	783	782	97,0107	2.10 ⁷	1.10 ⁷
3-éthylthiophène	873	869	97,0107	4.10 ⁶	2.10 ⁷
3,4-diméthylthiophène	885	881	97,0107	2.10 ⁶	3.10 ⁶
2,3-diméthylthiophène	897	891	97,0107	6.10 ⁵	2.10 ⁶
diméthylthiophène ou éthylthiophène	913	908	111,0263	3.10 ⁵	4.10 ⁶
3,4-diéthylthiophène	1077	1072	125,0419	2.10 ⁷	2.10 ⁶
2-butylthiophène	1085	1082	97,0107	1.10 ⁸	3.10 ⁶
2-pentylthiophène	1175	1169	97,0107	1.10 ⁷	6.10 ⁵
2-hexylthiophène	1278	1274	97,0107	6.10 ⁶	3.10 ⁵
3-thiophène-carboxaldéhyde	1002	998	110,9899	6.10 ⁶	5.10 ⁷
2-thiophène-carboxaldéhyde	1013	1007	110,9899	1.10 ⁷	6.10 ⁷
2-acétylthiophène	1107	1100	110,9899	7.10 ⁶	6.10 ⁶
2-propionylthiophène	1201	1194	110,9899	3.10 ⁶	3.10 ⁵
2,2'-bithiophène	1426	1418	165,9904	7.10 ⁵	2.10 ⁵
3,3'-bithiophène	1465	1459	165,9904	1.10 ⁵	5.10 ⁴
2,3'-bithiophène et isomère	1444	1436	165,9904	2.10 ⁶	2.10 ⁵
	1478	Non détecté	165,9904	4.10 ⁵	/
3-(2-butényl)-thiophène (E) et isomères	1119	1114	123,0263	3.10 ⁶	2.10 ⁶
	1142	1138	123,0263	1.10 ⁷	8.10 ⁴
	1152	1148	123,0263	2.10 ⁷	6.10 ⁵
thieno[3,2-b]thiophène	1229	1224	139,9748	3.10 ⁶	1.10 ⁷
2-éthyl-thiéo[2,3- b]thiophène et isomères	1431	1427	152,9826	1.10 ⁶	1.10 ⁵
	1437	1430	152,9826	5.10 ⁵	3.10 ⁵
5-méthyl-2-thiophène-carboxaldéhyde	1104	1096	125,0056	5.10 ⁵	1.10 ⁶
3-méthyl-2-thiophène-carboxaldéhyde et isomères	1136	1127	125,0056	5.10 ⁶	1.10 ⁶
3-méthyl-2-thiophène-carboxaldéhyde et isomères	1142	1132	125,0056	4.10 ⁵	7.10 ⁵
2-acétyl-3-méthylthiophène ou isomère	1205	1195	125,0056	1.10 ⁶	8.10 ⁴
1-(4-méthyl-2-thiényl)-éthanone et isomères	1223	1215	125,0056	6.10 ⁶	4.10 ⁵
1-(4-méthyl-2-thiényl)-éthanone, et isomères	1231	1224	125,0056	2.10 ⁶	2.10 ⁵
1(3H)-Isobenzofuranthione	1224	1219	150,0133	4.10 ⁶	7.10 ⁴
3-benzo(b)thiophénol	1241	1234	150,0133	2.10 ⁵	7.10 ⁴
3,4-bis(éthoxyméthyl)-thiophène	1271	1263	111,0263	3.10 ⁶	2.10 ⁵

* Le rapport m/z est le second le plus abondant car m/z 57,0699 est l'ion le plus abondant du bruit de fond

3. Suies issues de l'incendie – relation avec les essais en enceinte confinée

i. Caractérisation des suies issues des retombées de l'incendie

Analyse des composés inorganiques dans les suies issues de l'incendie

L'analyse par chromatographie ionique de l'échantillon de suie Fond-Du-Val a permis de mettre en avant la présence importante d'ions calcium et sulfates, en proportions assez inhabituelles si on compare à des suies issues seulement de la combustion d'hydrocarbures. Il est possible que ces ions soient sous la forme CaSO_4 dont la version héli-hydratée $\text{CaSO}_4 \cdot \frac{1}{2} \text{H}_2\text{O}$ entre dans la composition du plâtre.

Analyse non ciblée des composés organiques dans les suies en FTICR MS

L'inhomogénéité des spectres de masse montre l'impact de la localisation de l'échantillon sur sa composition. En effet, l'échantillon de Préaux est celui le plus complexe, avec beaucoup de signaux par masse nominale en comparaison des deux autres suies analysées.

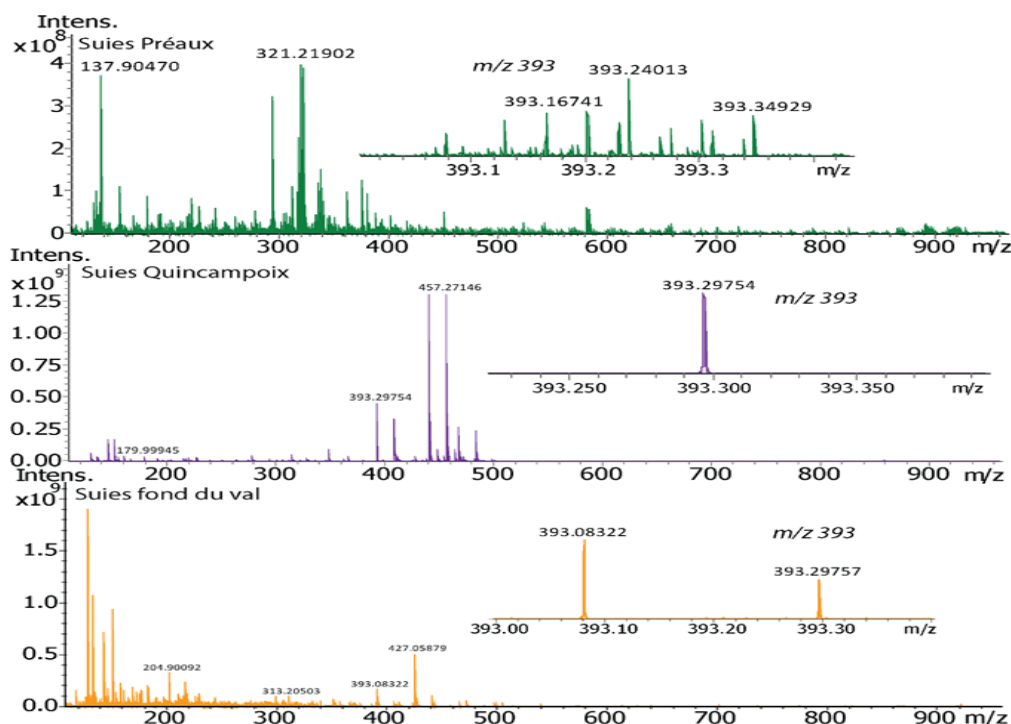


Figure 33 : Spectres de masse LDI FTICR MS des échantillons de suie de Quincampoix, Préaux et Fond-Du-Val Un agrandissement au rapport m/z 393 est présenté pour chaque échantillon

Le nombre de formules brutes attribuées est de 391 pour l'échantillon de Quincampoix, 1911 pour l'échantillon Fond-Du-Val et 4474 pour l'échantillon de Préaux. Ce nombre d'attributions montre la différence de complexité entre les échantillons analysés.

Ce résultat montre l'intérêt de l'utilisation d'analyses non ciblées dans la mesure où les O-HAP et N-HAP sont peu étudiés en analyse ciblée et peuvent avoir un impact environnemental, car ils sont souvent plus toxiques que les HAP natifs ne possédant pas d'hétéroatome. Les HAP, O-HAP ou N-HAP peuvent être liés une dégradation thermique (combustion incomplète ou pyrolyse) de multiple origine. Il n'est donc pas possible pour le moment de relier ces composés uniquement à l'incendie. Du carbone élémentaire peut aussi être observé pour la classe HC de l'échantillon de Préaux (Erreur ! Source du renvoi introuvable.), l'un des produits ultimes de la dégradation thermique de composés organiques. Les échantillons de suies de Préaux et Quincampoix ont un nombre d'atomes de carbone plus élevé et présentent de longues séries d'alkylation. Enfin, le Tableau 11 recense des exemples de structures pour les ions des classes moléculaires CHO_2Na , CHO_3Na et CHO_4Na . Les structures

putatives de ces ions sont très proches de celles des ions avec un adduit potassium, mettant en avant la présence d'ions identiques avec différents adduits (K ou Na). Ces composés sont principalement des acides gras saturés/insaturés, des phtalates et oligomères d'éthylène glycol. Ces molécules sont plutôt communes et peuvent être retrouvées dans les plastiques, produits cosmétiques... et ne sont pas forcément reliées à l'incendie.

Tableau 11 : Exemple de formules brutes des échantillons de suies Fond du Val, Préaux et Quincampoix pour les classes CHO₂Na, CHO₃Na et CHO₄Na

m/z	Erreur (ppm)	Formule	Structure putative neutre
<u>Préaux</u>			
305.245105	-0.012	C ₁₈ H ₃₄ O ₂ Na	
319.224336	0.093	C ₁₈ H ₃₂ O ₃ Na	
249.109748	-0.072	C ₁₂ H ₁₈ O ₄ Na	
<u>Fond du Val</u>			
257.151184	0.067	C ₁₅ H ₂₂ O ₂ Na	
185.114823	-0.041	C ₈ H ₁₈ O ₃ Na	
301.141032	-0.006	C ₁₆ H ₂₂ O ₄ Na	
<u>Quincampoix</u>			
221.151188	0.057	C ₁₂ H ₂₂ O ₂ Na	
297.240001	0.048	C ₁₆ H ₃₄ O ₃ Na	
441.297524	0.015	C ₂₆ H ₄₂ O ₄ Na	

En conclusion, les analyses réalisées en LDI FTICR-MS, effectuées sur les suies issues de l'incendie Lubrizol, ont mis en évidence la présence plus ou moins intense de sels (sodium, potassium et calcium) en accord avec les analyses en chromatographie ionique. De plus, quelques composés hautement condensés ont été observés, ceux-ci pouvant être liés à une pyrolyse ou combustion. Parmi ces composés se trouvent des O-HAP et N-HAP, espèces peu étudiées en analyse ciblée réglementaire. D'autres composés moins insaturés ont été observés pour ces échantillons. Ils ne sont cependant pas directement reliés à l'incendie Lubrizol de par leur présence ubiquitaire dans l'environnement. En outre, peu de composés soufrés ont été trouvés en LDI FTICR-MS, sachant pourtant que de nombreux produits Lubrizol stockés sur site, comme les dialkyldithiophosphate de zinc (additif de lubrifiants), contiennent du soufre et du phosphore. De plus, de nombreux ions n'ont pas pu être attribués à haute masse en raison du nombre d'éléments utilisés pour les attributions (il n'est pas possible de balayer tous les éléments du tableau périodique) et des erreurs maximales tolérées (0,2 ppm dans notre cas).

Analyses non ciblées des substances organiques dans les suies par GC-HRMS Orbitrap

Les résultats confirment la présence de ces molécules dans l'environnement au moment de l'incendie. Cependant, les molécules ayant obtenu une notation élevée (3-4) ont une forte probabilité de provenir plus

particulièrement de leur émission lors de l'incendie Lubrizol et par suite de leur adsorption sur les dépôts carbonés. Parmi les produits Lubrizol connus présents dans le stock lors de l'incendie, se trouvaient :

- 2,6-di-tert-butylphenol ;
- des produits issus de réactions de la Benzeneamine, N-phenyl- avec du nonene branché ;
- diphenylamine
- N,N'-Méthylènebismorpholine
- Morpholine.

Ces produits pourraient correspondre avec certaines des molécules retrouvées sur les échantillons de suies et, à ceci près que certaines d'entre elles ont pu être en partie transformées au cours du processus de combustion.

Parmi les produits Lubrizol connus présents dans les stocks le jour de l'accident, se trouvaient des produits phosphatés :

- 3-methylphenyl di-4-methylphenyl Phosphate et 4-methylphenyl di-3-methylphenyl Phosphate et tris(3-methylphenyl) phosphate ;
- O,O,O-triphenyl phosphorothioate ;
- triphenyl phosphite ;
- dibutyl phosphonate ;
- Amines, C12-14-tert-alkyl, C8-20-alkyl phosphates.

Ces produits pourraient correspondre avec certaines des molécules retrouvées sur les échantillons de suies, à ceci près que certaines d'entre elles ont pu être en partie transformées au cours du processus de combustion.

En conclusion, une dizaine de molécules intéressantes se dégagent des analyses de suies par GC-HRMS Orbitrap. Se distinguent des morpholines et des composés phosphorés, dont les ions moléculaires sont rarement connus. Un lien peut être établi entre certains composés identifiés sur les suies et les molécules mentionnées dans les fiches de sécurité des produits stockés par Lubrizol, possiblement vaporisés tels quels le jour de l'accident ou transformés lors des processus de combustion. Les molécules ayant obtenu des scores élevés de probabilité d'une émission spécifique liée à l'incendie, ou très abondantes lors de l'incendie, seront plus particulièrement recherchées dans l'environnement, dans la suite de l'étude.

ii. Caractérisation des suies produites dans l'enceinte de laboratoire

Les molécules communes entre les suies de Préaux et les suies générées en laboratoire se trouvent principalement dans la zone des molécules aromatiques avec un ratio H/C entre 0,4 et 0,8 ainsi qu'un ratio O/C entre 0 et 0,4 et correspondent à des HAP, N-HAP et O-HAP. Ces molécules ne sont cependant pas spécifiques à la combustion non contrôlée de lubrifiants pétroliers et ne peuvent pas être reliées spécifiquement à l'incendie.

4. Résidu issu du ruissellement de surface : échantillon ASL

Cet échantillon a été prélevé sur la voie publique entre l'usine Lubrizol et la darse aux bois. Cet échantillon constitue pour le projet le seul prélèvement direct de l'enceinte où a eu lieu l'incendie. L'objectif de son analyse est de comparer sa composition moléculaire avec celles des échantillons issus des autres matrices (air, suies, feu simulé d'huiles additivées ou non) afin i) de pouvoir identifier des molécules marqueurs de l'incendie communément observées, ii) d'évaluer le degré de complexité de l'échantillon en comparaison aux autres pour quantifier l'incertitude liée à l'absence de prélèvement direct.

i. Substances identifiées dans la fraction huileuse de ruissellement

Les résultats sur la fraction huileuse de l'échantillon de ruissellement montrent de nombreuses structures de molécules et familles de molécules. Cependant, **ces structures sont hypothétiques** et peuvent être différentes des structures réelles. De plus, les analyses FTICR MS ne permettent pas d'avoir des informations sur la quantité des molécules identifiées dans l'échantillon. Les spectres de masse FTICR MS de la phase huileuse ASL analysée par ESI (-) et APCI(+) sont présentés en Figure 34.

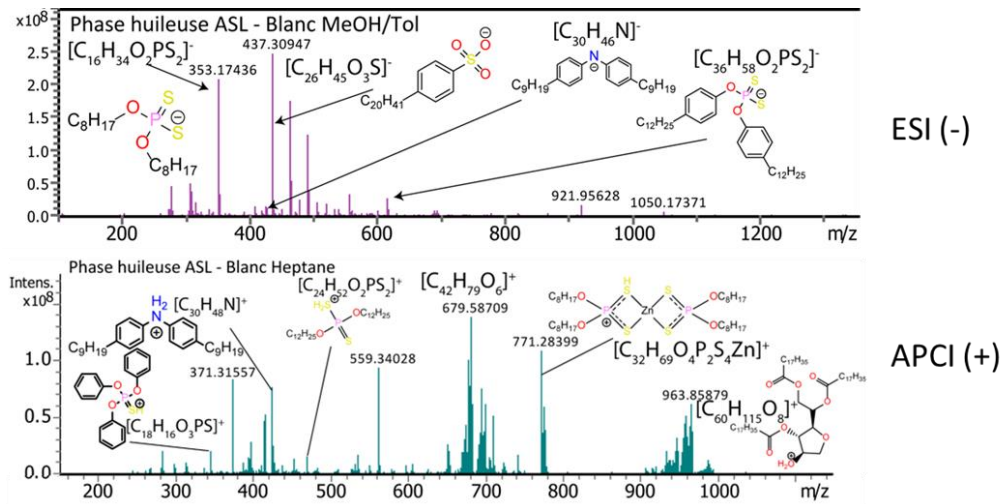


Figure 34 : Spectres de masse FTICR obtenus par la soustraction entre la phase huileuse de l'échantillon ASL et son blanc, à partir des analyses ESI (-) en haut et à partir des analyses APCI(+) en bas. Des propositions de structures associés à certains ions de spectre de masse sont présentés dans cette figure

Ces spectres de masse présentent de très nombreux signaux, montrant ainsi la complexité de l'échantillon ASL. De plus, si cet échantillon contient des additifs et lubrifiants pétroliers, celui-ci est censé contenir une grande diversité moléculaire, nécessitant la précision de mesure du FTICR afin d'obtenir des formules moléculaires fiables.

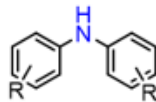
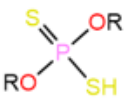
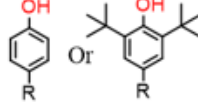
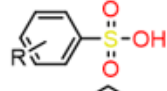
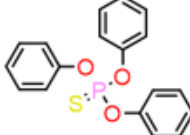


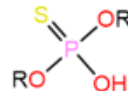
On retrouve des familles de molécules communes avec l'ESI(-)-FTICR comme les alkyl phenylamines (exemple du $[C_{30}H_{48}N]^+$) et les thiophosphates (exemple du $[C_{24}H_{52}O_2PS_2]^+$). De plus, on retrouve des molécules de la famille des dithiophosphates de Zinc (ZDTPs) dont le $[C_{32}H_{69}O_4P_2S_4Zn]^+$ est présent de manière intense dans l'échantillon d'huile. Les ZDTPs sont très utilisés en tant qu'additifs dans la formulation de lubrifiants et sont retrouvés en grand nombre dans les FDS Lubrizol : « Zinc bis[O,O-bis(2-ethylhexyl)]bis(dithiophosphate) », « Phosphorodithioic acid, mixed O,O-bis(iso-Bu and pentyl) esters, zinc salts », « Phosphorodithioic acid, mixed O,O-bis(1,3-dimethylbutyl and iso-Pr)esters, zinc salts », « zinc O,O',O'-tetrakis(1,3-dimethylbutyl) bis (phosphorodithioate) »....

Un autre additif pétrolier, retrouvé de nombreuses fois dans les FDS Lubrizol, est aussi susceptible d'être présent dans l'échantillon. Il s'agit du $[C_{18}H_{16}O_3PS]^+$, pouvant correspondre au « ++ O,O,O-triphenyl phosphorothioate ».

Enfin, on retrouve en dernier exemple, des molécules avec un grand nombre d'atomes d'oxygène comme le $[C_{42}H_{76}O_6]^+$ ou le $[C_{60}H_{115}O_8]^+$. Ces molécules sont susceptibles de correspondre à des triglycérides utilisés dans de nombreuses applications dont des lubrifiants (remplace l'huile minérale de la formulation).

Des exemples de familles moléculaires identifiées dans la phase huileuse ASL avec leurs limites de formules moléculaire sont présentées dans le Tableau 12.

Tableau 12 : Exemple de familles de molécules identifiées dans la phase huileuse de l'échantillon ASL

Source d'ionisation	Formule moléculaire	Ion observé	Structure possible	Limites formules moléculaires (neutre)	KMD (arrondi supérieur)
ESI(-) APCI(+)	C_xH_yN	[M-H] ⁻ [M+H] ⁺		C21H29N C30H47N C39H65N	0.1060 0.0935
ESI(-) APCI(+)	$C_xH_yO_2PS_2$	[M-H] ⁻ [M+H] ⁺		C6H15P2PS2 à C28H59O2PS2	0.2200 0.2077
ESI(-)	C_xH_yO	[M-H] ⁻		C14H21O à C40H73O	0.0693
ESI(-)	$C_xH_yO_3S$	[M-H] ⁻		C22H38O3S à C48H90O3S	0.1787
APCI (+)	$C_{18}H_{15}O_3PS$	[M+H] ⁺		x	0.3278
APCI(+)	$C_8H_{14}S_3$	[M+H] ⁺		x	0.1981
APCI (+)	$C_xH_yO_4P_2S_4Zn$	[M+H] ⁻		C14H32O4P2S4Zn à C32H68O4P2S4Zn	0.5772
APCI (+)	$C_xH_yO_3PS$	[M+H] ⁺		C8H19O3PS à C24H51O3PS	0.1670

Pour conclure sur l'analyse de la phase huileuse, **l'échantillon est très complexe avec de nombreux hétéroatomes différents et des métaux**, ce qui complexifie l'interprétation des données. Cependant, de nombreux ions ont pu être identifiés à une formule moléculaire. Ces molécules sont susceptibles de correspondre à des additifs de lubrifiants dont certains correspondent peut-être aux produits des FDS Lubrizol.

ii. Substances dans la fraction aqueuse de ruissellement (échantillon ASL)

Analyse des substances organiques dans la fraction aqueuse de l'échantillon ASL

Contrairement à la caractérisation de la phase huileuse où la plupart des ions ont été attribués à une formule moléculaire, une bonne partie des espèces de la phase aqueuse n'a pas pu être identifiée. La principale raison de cette différence est liée à la présence de nombreux adduits avec un ou plusieurs atomes de sodium qui complexifient l'attribution des formules moléculaires. Malgré cela, certaines familles moléculaires ont pu être identifiées.

Premièrement, les analyses APCI(+)-FTICR montrent la présence de polypropylène glycol (PPG) et de dérivés parmi les ions les plus intenses. Les PPG sont utilisés dans de nombreuses applications comme les plastiques, solvants, émulsifiants, cosmétiques.... Ils ne peuvent donc pas être reliés à l'incendie.

Les autres espèces les plus intenses identifiées en APCI(+)-FTICR possèdent du phosphore, soufre, oxygène et des adduits sodium. En effet, les familles moléculaires $C_xH_yO_2PS_2Na$ et $C_xH_yO_3PSNa$ sont par exemple retrouvées. Ces

familles de molécules sont possiblement des produits d'hydrolyse des dithiophosphates de zinc identifiés dans la caractérisation de la fraction huileuse de l'échantillon ASL.

Le Tableau 13 ci-dessous présente certaines familles de molécule extraites à partir des données ESI(-) et APCI(+) obtenues lors de l'analyse de la phase aqueuse de l'échantillon ASL.

Tableau 13 : Familles moléculaires identifiées dans la phase aqueuse de l'échantillon ASL. Les valeurs de KMD y sont indiquées ainsi que les substituants R identifiés pour chaque famille moléculaire

Source d'ionisation	Formule moléculaire	Adduits	Structure possible	R total	KMD (arrondi sup)
ESI(-) APCI(+)	$C_xH_yO_2PS_2$ $C_xH_yO_2PS_2Na$	$[M-H]^-$ $[M+Na]^+$		C6H13 à C16H33	0.2200 0.2503
ESI(-) APCI(+)	$C_xH_yO_3PS$ $C_xH_yO_3PSNa$	$[M-H]^-$ $[M+Na]^+$		C8H17 à C16H33	0.18 0.21
ESI(-)	$C_xH_yO_3S$	$[M-H]^-$		C2H5 à C8H17 C14H29 à C33H67	0.1788
ESI(-)	$C_xH_yO_4PS_2$	$[M-H]^-$		C5H11 à C10H21	0.3252
ESI(-)	$C_xH_yO_4P_2S_4Na$	$[M-2H+Na]^-$	Structure non trouvée (Dimère ?)	C14H32O4P2S4Na à C23H50O4P2S4Na	0.4765
APCI (+)	$C_xH_yO_5P_2S_3Na_2$	$[M-H+2Na]^+$	Structure non trouvée (Dimère ?)	C12H29O5P2S3Na2 à C24H53O5P2S3Na2	0.4662
APCI (+)	$C_xH_yO_6P_2S_2Na_2$	$[M-H+2Na]^+$	Structure non trouvée (Dimère ?)	C14H33O6P2S2Na2 à C28H61O6P2S2Na2	0.4254
APCI(+)	$C_xH_yO_z$	$[M+H]^+$		C18H39O7 à C54H111O19	0.1410 to 0.4164

Analyse des substances inorganiques dans la fraction aqueuse de l'échantillon ASL

La présence de phosphore et de sodium est confirmée par la présence d'adduits sodium et de composés phosphorés identifiés dans l'analyse des composés organiques présents dans cet échantillon. La présence de Bore a aussi été observée dans l'analyse des substances organiques.

La présence de zinc n'a pas été observée dans les substances organiques de la phase aqueuse. Cependant, il est possible que celui-ci ait été relargué lors de l'hydrolyse des dithiophosphates de zinc possiblement présents dans la phase huileuse. Le zinc semble donc être un bon marqueur inorganique de l'incendie.

iii. Analyse de la phase solide de l'échantillon ASL

La phase solide lavée à l'heptane de l'échantillon ASL a été analysée par MEB EDX dont un cliché est représenté en Figure 35.

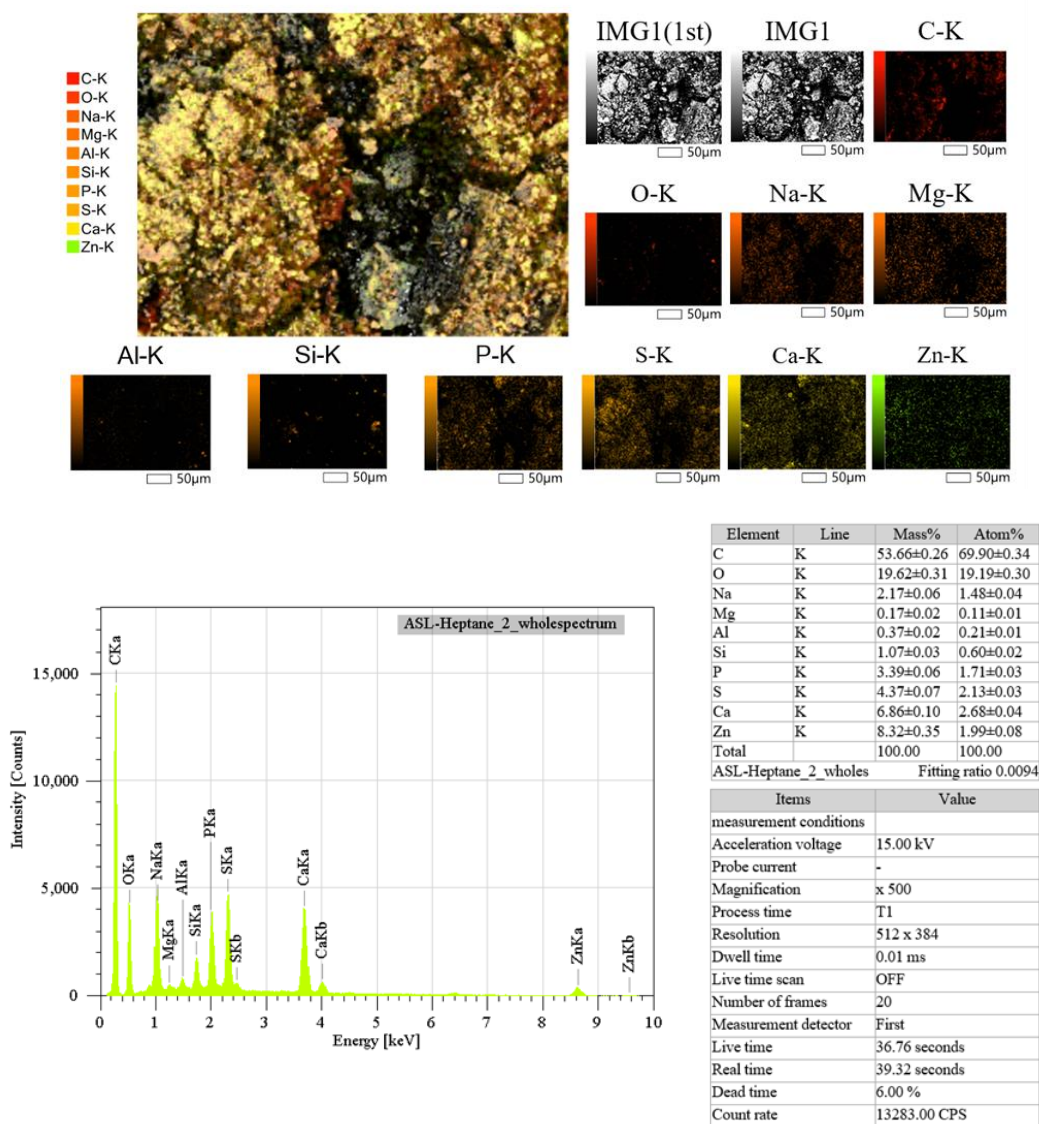


Figure 35 : Résultats obtenus en MEB-EDX pour la caractérisation de la phase solide de l'échantillon ASL lavée à l'heptane. En haut se trouve une cartographie des différents éléments chimiques présents dans l'échantillon. En bas se trouvent les informations sur les teneurs en % des différents éléments chimiques identifiés par EDX

Le cliché MEB permet premièrement de montrer la structure très hétérogène du matériau analysé avec des grains de différentes tailles. L'analyse EDX permet d'identifier les éléments chimiques présents dans l'échantillon ainsi que leur répartition. D'après ces résultats sur la phase solide ASL, **le zinc semble être un bon marqueur inorganique de l'incendie car normalement peu présent dans les matrices environnementales** mais présent en grande proportion parmi les produits retrouvés dans les Fiches FDS Lubrizol.

5. Analyse d'échantillons aqueux à proximité de l'incendie

Des échantillons d'eau ont été prélevés dans la darse aux Bois, située à proximité immédiate de Lubrizol, peu après l'incendie (15-17 octobre 2019), ainsi qu'en d'autres points de prélèvements en Seine en amont et en aval de la zone de l'incendie à Rouen, et transmis au laboratoire LEESU pour analyses dès fin octobre 2019.

Dans un premier temps, les chromatogrammes bruts issus de l'analyse des échantillons de la darse aux Bois ont été comparés visuellement et ont permis de mettre en évidence l'influence caractéristique de l'agglomération rouennaise (profil de pics spécifiquement détectés dans les échantillons prélevés dans l'agglomération mais pas en amont) (Figure 36). Cette empreinte "agglomération de Rouen" n'est pas visible dans les deux échantillons prélevés dans la darse aux Bois (A1 et A2) et reçus ultérieurement.

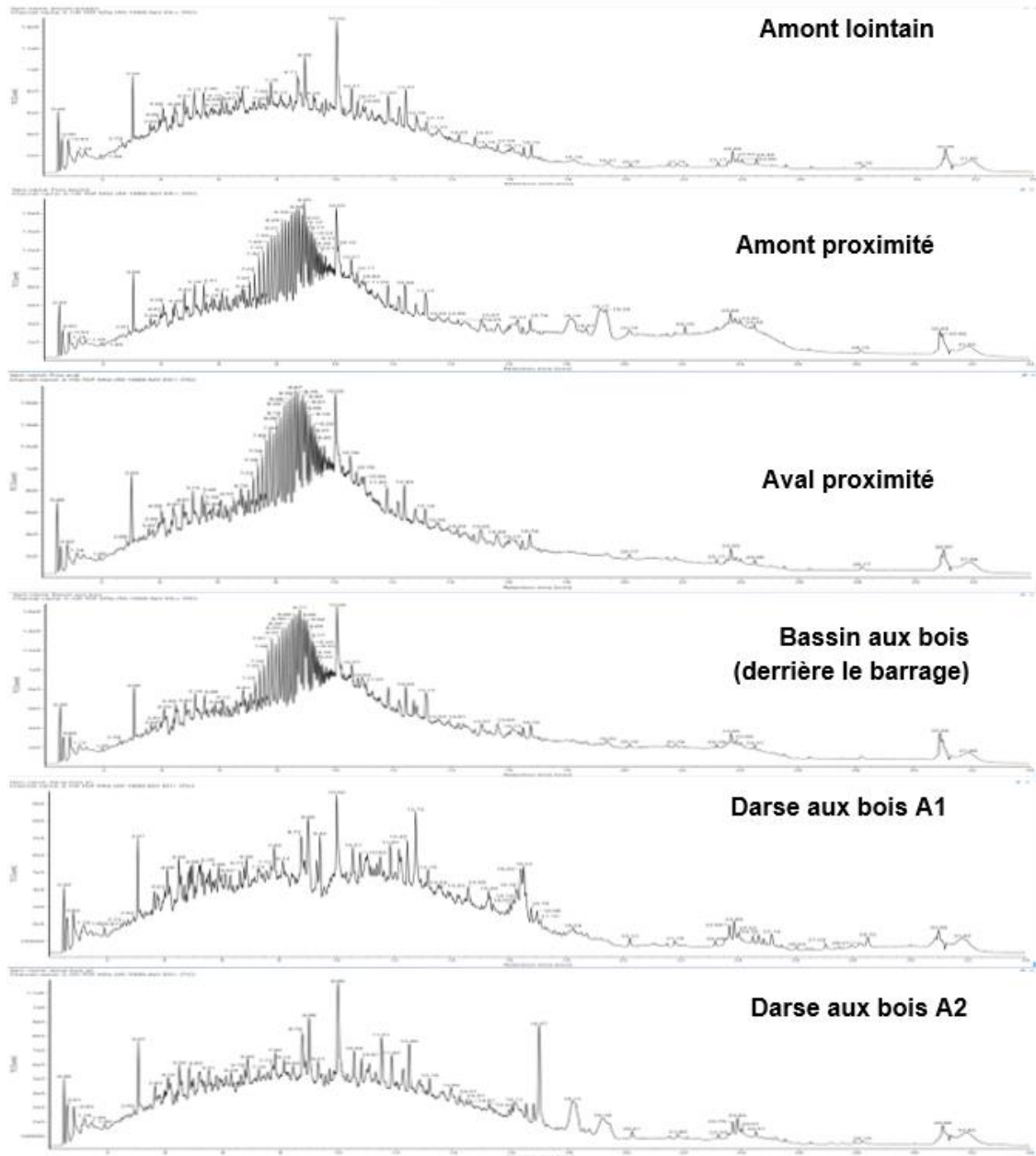


Figure 36 : Chromatogrammes (Total Ion Current) basse énergie (6 eV) (50-1000 m/z) des échantillons d'eaux prélevés dans la darse aux Bois ou en Seine en aval/amont du site Lubrizol

Des ACP ont permis d'isoler une liste de molécules spécifiques dans les échantillons aqueux collectés à proximité du site Lubrizol, peu après l'accident et se démarquant du « bruit de fond » de l'agglomération rouennaise.

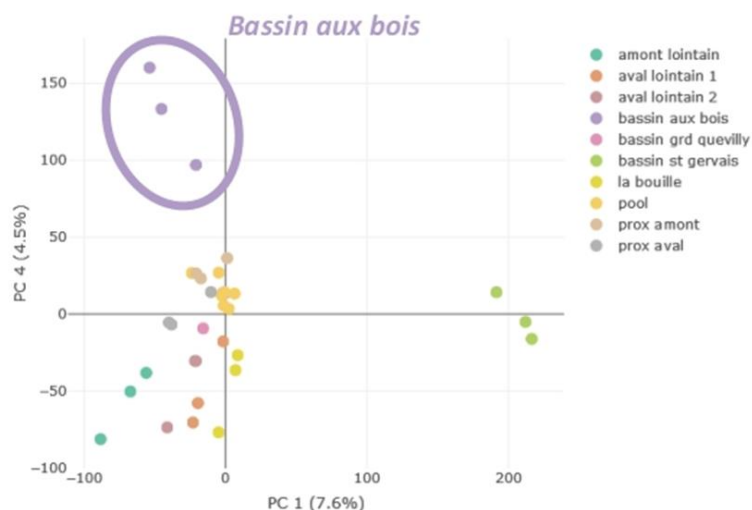


Figure 37 : Analyse en composantes principales sur les molécules spécifiques détectées par UPLC-IMS-QTOF à partir des échantillons liquides collectés peu après l'accident

Un marqueur de masse $m/z = 272,25753$ et temps de rétention $T_r = 12$ min, particulièrement intense dans la darse aux Bois (échantillon A1 > échantillon prélevé en aval du barrage >> échantillon A2), a notamment été proposé comme spécifique de la darse aux Bois mais pas des deux autres bassins analysés, ni des échantillons prélevés en Seine. Une formule brute calculée a été proposée par le logiciel UNIFI ($C_{16}H_{33}NO_2$), sans pour autant obtenir d'identification structurale.

E. Imprégnation environnementale suite à l'incendie

1. Intégration dans la base de données des molécules détectées dans les fractions issues des retombées de l'incendie

Suite à l'émission de nombreuses substances issues de l'incendie fin 2019, il est apparu intéressant de rechercher dans l'environnement des molécules directement liées au déversement des stocks entreposés sur les sites de Lubrizol et de Normandie Logistique, ou liées à la combustion de ces stocks. Ces molécules qualifiées de marqueurs de l'incendie ont la caractéristique de ne pas être présentes dans le « bruit de fond » urbain ou rural des zones d'étude explorées. L'environnement exploré intègre le milieu aquatique (rivières/sources souterraines), avec analyse de la phase dissoute et des particules en suspension MES, des sédiments à proximité du lieu de l'accident et de sols prélevés sous le nuage de fumées.

Suite aux analyses menées sur les échantillons d'air, les échantillons aqueux, les échantillons de suies et résidus carbonés ainsi que sur l'échantillon ASL, les rapports m/z des molécules détectées pendant ou juste après l'incendie, ainsi que leurs adduits possibles, ont été introduits dans la base de données déjà constituée des molécules référencées dans les stocks de Lubrizol (Constitution d'une base de données interne pour la recherche de marqueurs de l'incendie, page9). Au final, cela a représenté **10630 m/z** listés. Cette base de données interne doit permettre par la suite de comparer cette liste avec les données obtenues après analyse des échantillons environnementaux, afin de mettre en évidence les correspondances avec les molécules retrouvées dans les extraits issus des échantillons d'eaux de rivières et souterraines, de matières en suspension dans l'eau, les sols et de sédiments.

Ainsi, après traitement de chaque échantillon environnemental (calibration pour ajuster les rapports m/z, déconvolution des signaux, soustraction du blanc analytique), la liste m/z des molécules extraites de chaque échantillon environnemental (+ de 6000 m/z) est exportée et comparée à l'aide du logiciel R aux 10630 m/z référencés dans la base de données interne. Pour chaque correspondance potentielle entre deux m/z (match), la formule brute est vérifiée si l'analyse a été effectuée en FTICR-MS et le nom de la molécule est vérifié si l'analyse a été faite en GC-HRMS Orbitrap (Figure 38).

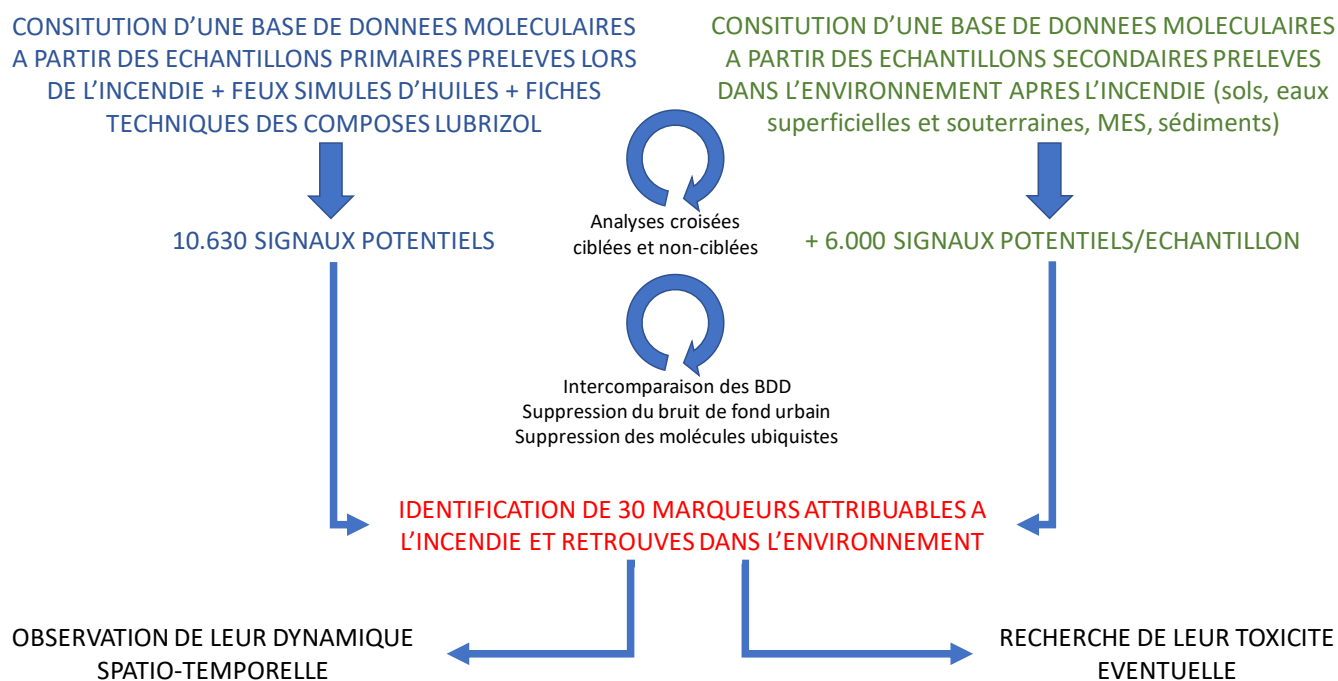


Figure 38 : Méthodologie d'intercomparaison des bases de données pour identifier des marqueurs de l'incendie

2. Imprégnation dans les eaux superficielles et souterraines

i. Résultat des analyses non ciblées de composés organiques : les marqueurs de l'incendie dans les eaux et MES

Analyse des molécules organiques dissoutes en phase aqueuse

Suite à l'établissement de la base de données interne regroupant les masses (m/z) et formules brutes de molécules spécifiques identifiées dans les échantillons récoltés peu après l'incendie et dans les stocks de Lubrizol, les analyses des échantillons d'eaux de rivières et de source collectées après 2021 ont été comparées à cette base de données. En premier lieu, les analyses ont été obtenues en GC-HRMS Orbitrap sur les extraits SPE contenant les composés peu ou moyennement polaires. Ainsi 7 marqueurs ont été identifiés avec un fort niveau de confiance à partir de ces analyses.

Parmi les 7 marqueurs identifiés avec un bon niveau de confiance à partir des analyses en GC-HRMS Orbitrap et LC-HRMS Orbitrap, on constate qu'ils ne sont pas toujours retrouvés dans toutes les campagnes d'échantillonnage des eaux, ni dans toutes les rivières ou ressources souterraines, mais leur distribution temporelle et leur intensité détectée peuvent varier significativement. La Figure 39 montre leur distribution selon les 5 campagnes dans les différents échantillons d'eau. Il apparaît que **les sources d'eau de Crevon et de Fontaine-Nourrice sont plus impactées par la présence de certains des marqueurs identifiés, ce qui suggère qu'une partie des composés déposés suite à l'accident a pu s'infiltrer dans le sol.** Le phénol, p-tertbutyl (ou 4-tert-butylphénol) n'a pas été détecté lors des campagnes 1 et 2 du printemps et de l'été 2022, mais l'a été lors des campagnes ultérieures 3, 4 et 5 de l'automne 2022 et de l'hiver/printemps 2023. Il semble que cette molécule puisse être libérée avec retard à la suite de fortes pluies et d'inondations. En revanche, le phénol 2,5-bis(1,1-diméthyléthyle) (ou 2,5-di-tert-butylphénol) a été principalement retrouvé lors des deux premières campagnes de prélèvement alors que l'isomère phénol 2,6-bis(1,1-diméthyléthyle) (ou 2,6-di-tert-butylphénol) a continué à être retrouvé lors de campagnes plus éloignées de l'incendie industriel. Il est probable que le premier isomère est plus dégradable et a disparu des stocks où il avait été déposé, tandis que le second est plus persistant. Il convient de noter que l'isomère 2,5-bis(1,1diméthyléthyle) a été trouvé avec des intensités de signal 20 à 107 fois plus grandes que son isomère, dans les eaux des deux premières campagnes d'Andelle, Cailly, Fontaine-Nourrice et Robec (A-2, Ca-1, N-1, N-2, R-1 et R-2). C'est le composé dont l'intensité détectée est la plus élevée.

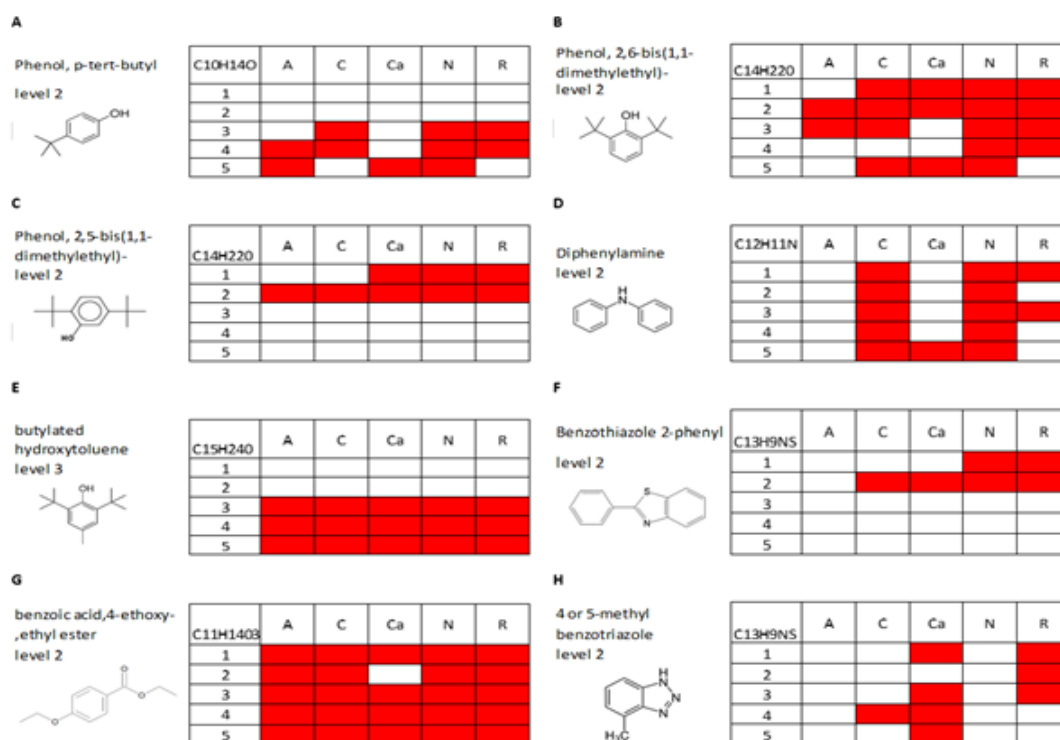


Figure 39 : Évolution de la présence à l'état dissout dans la phase aqueuse (en rouge) de différents marqueurs liés à l'incendie (identifiés à des niveaux de confiance élevés par GC-HRMS Orbitrap ou LC-HRMS Orbitrap) en fonction des différentes eaux et campagnes (1 à 5)

La diphénylamine a été trouvée principalement dans les eaux souterraines de Cailly et de Fontaine-Nourrice et pratiquement plus dans les eaux de surface. Il est donc probable qu'elle se soit rapidement infiltrée dans les sols et les sédiments après avoir été déposée.

Le butyl hydroxytoluène BHT (ou (Phénol, p-tertbutyl) a été principalement retrouvé lors des dernières campagnes d'échantillonnage 3, 4 et 5 alors que le 2-phényle benzothiazole n'a plus été détecté après les deux premières campagnes 1 et 2. Enfin, l'acide benzoïque 4-éthoxy-éthyl ester a été disséminé dans toutes les eaux collectées et pour toutes les campagnes d'échantillonnage. Le 4- ou 5-méthylbenzotriazole, identifié avec un haut niveau de confiance par LC-HRMS Orbitrap, a été majoritairement détecté dans différentes campagnes de la rivière Cailly et dans la rivière Robec.

Enfin, la N,N'-Méthylènebismorpholine a été détectée lors des premières campagnes de 2022, plus particulièrement dans les zones rurales et non dans la zone urbanisée ou à Robec, mais plus du tout lors des dernières campagnes, ce qui signifie qu'elle a probablement été dégradée avec le temps.

Analyse des substances organiques véhiculées par les MES

La Figure 40 présente certaines des molécules organiques provenant plus spécifiquement de l'incendie Lubrizol et véhiculées par les MES des rivières de surface et souterraines étudiées. En ce qui concerne la molécule 2-phénylbenzothiazole, elle avait été retrouvée en phase dissoute dans 4 des 5 rivières étudiées (à l'exception de l'Andelle). Dans le cas des MES, on la retrouve essentiellement sur celles des rivières Cailly et Robec et plutôt en automne 2021 et 2022, au moment où la pluviométrie importante tend à plus éroder les berges et déplacer les stocks de sédiments accumulés. On remarquera que les deux stations de Cailly et Robec sont les plus proches de l'usine de Lubrizol. La 1-phényldecanol n'a pas été retrouvée en phase dissoute, car c'est une molécule peu polaire qui a beaucoup plus d'affinité pour les particules de MES (ou la phase huileuse de l'échantillon de ruissellement ASL, où elle a été également détectée). L'intensité détectée de cette molécule est plus importante dans les rivières Cailly et Robec, la rivière Andelle semble moins impactée et les 2 sources souterraines encore moins. En effet, les molécules peu solubles dans l'eau sont moins mobiles et s'infiltrent moins vite en profondeur que les molécules solubles dans l'eau. Enfin, les dérivés de morpholine véhiculés par les MES ont surtout été identifiés dans les rivières Cailly et Robec, très peu dans les sources souterraines. Ces molécules identifiées également sur les suies ont une forte affinité pour les particules et n'ont pas été retrouvées en phase dissoute, et s'infiltrent donc difficilement en profondeur.

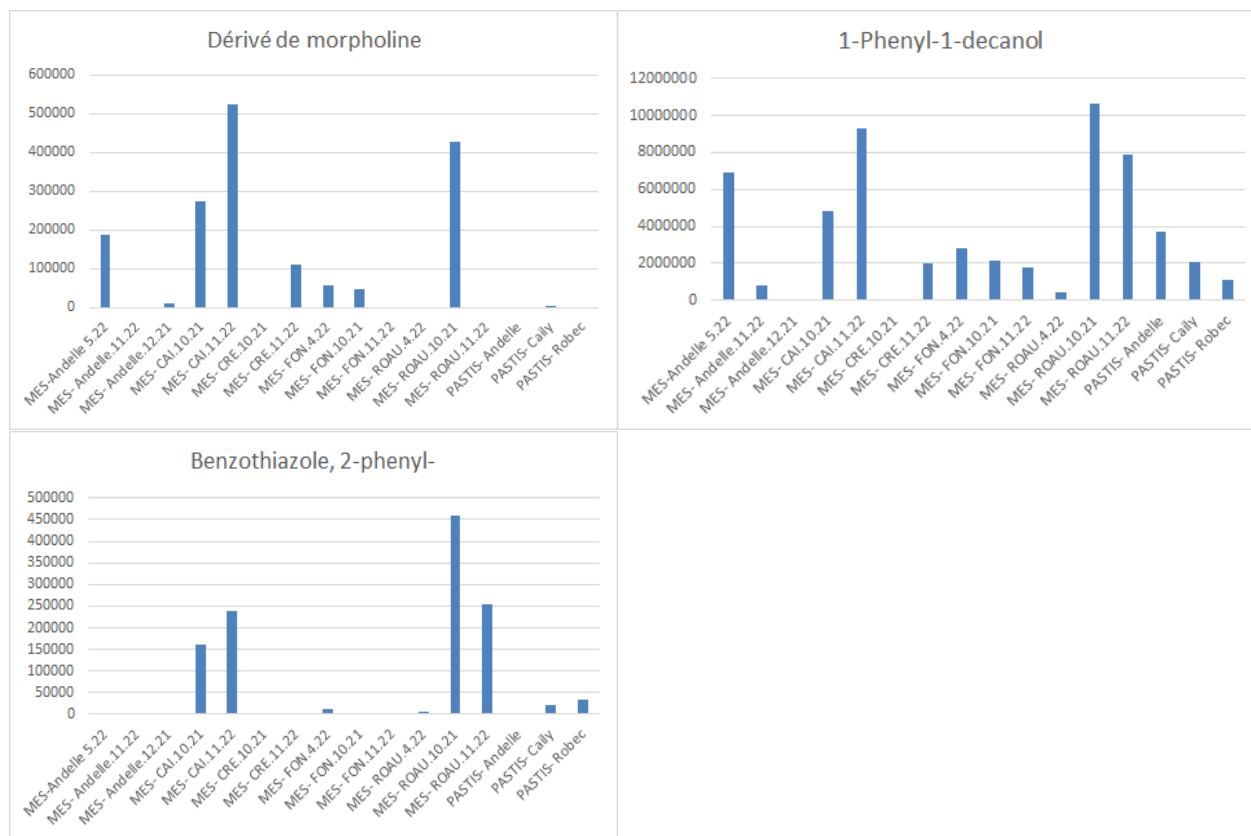


Figure 40 : Intensité détectée de certaines des molécules spécifiques identifiées en fonction du site et de la date de prélèvement des MES

En conclusion, **les MES des stations de prélèvement des eaux les plus proches de l'Usine Lubrizol (Robec et Cailly) semblent plus impactées par la présence de molécules liées à l'incendie de Lubrizol, que l'on peut qualifier de marqueurs de l'incendie.**

ii. Résultat des analyses ciblées : les polluants organiques dans les eaux et MES

Parmi les différents contaminants ciblés analysés, nous nous concentrons sur la présence de HAP dans l'eau et les MES, car il a été montré que l'incendie avait contribué à une émission plus importante de cette famille d'hydrocarbures lors de l'accident. Il est intéressant de suivre l'évolution de ces substances sur plusieurs mois après l'accident. Les polychlorobiphényles (PCB), réglementés dans l'eau comme les HAP, seront aussi recherchés dans les eaux et MES et les dioxines et furanes seront recherchées uniquement dans les MES car insolubles en phase aqueuse.

Dioxines et furanes

Dans les jours qui ont suivi l'incendie, il est possible que les sols et les sédiments aient affiché une concentration de dioxines et de furanes supérieure à la normale. L'objectif est de vérifier si ces substances, possiblement stockées dans des sols ou sédiments peu après l'accident, n'ont pas été par la suite remobilisées lors d'épisodes de ruissellement et d'érosion et ne sont pas transportées par les matières sédimentaires en suspension dans l'eau.

Les analyses de dioxines réalisées sur les échantillons de MES issus de la rivière Andelle et de la source Crevon montrent que les concentrations des 17 congénères recherchés sont inférieures aux limites de détection. **Les concentrations de dioxines les plus significatives ont été trouvées dans les MES des rivières Robec et Cailly.** Les résultats pour les MES des rivières Robec et Cailly sont rassemblés dans le Tableau 14 suivant :

Tableau 14 : Concentration en équivalent toxique total des PCDDs/PCDFs pour les MES des rivières Cailly et Robec

Cailly		Robec		
Octobre 2021	Novembre 2022	Octobre 2021	Avril 2022	Novembre 2022
1.2 pg/g de MES	0,7 pg/g de MES	4,6 pg/g de MES	2,1 pg/g de MES	6,1 pg/g de MES

Par conséquent, on retrouve des traces de dioxines dans les MES de certaines rivières en 2021 et 2022, bien après l'accident de Lubrizol, mais on ne peut l'imputer directement à l'incendie survenu en 2019. Un point de surveillance doit être apporté à la source Fontaine-Nourrice, puisque certaines dioxines ont été détectés mais n'ont pas pu être quantifiées.

HAP et PCB

En ce qui concerne les HAP et les PCB, la Figure 41 présente les concentrations en phase dissoute des HAP dans les échantillons aqueux des 5 sites et pour les 5 campagnes de prélèvement sur 1 an. Bien que les échantillons d'eaux aient été concentrés jusqu'à 800 fois par SPE, aucun PCB et seulement quelques HAP ont pu être détectés et quantifiés. La Figure 41 montre que la campagne 1 (avril 2022) est systématiquement la plus concentrée. Le site de Crevon correspond à une source souterraine et est le point le plus impacté par la présence de HAP, malgré une filtration naturelle par le sol et sous-sol. La rivière Robec est assez impactée par les multiples sources de HAP à proximité, qui proviennent en majorité des activités anthropiques de combustion (combustion de moteurs thermiques, production de chaleur pour les activités industrielles ou le chauffage individuel...).

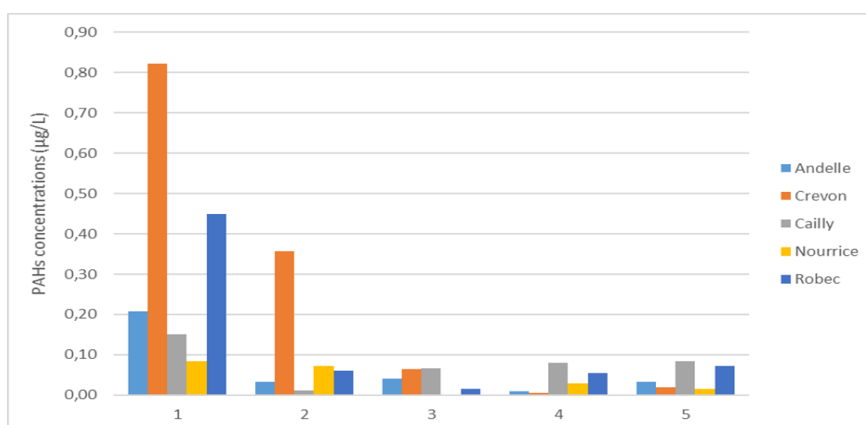


Figure 41 : Concentrations de HAP dans les échantillons d'eau des 5 sites et de la première à la cinquième campagne

En ce qui concerne les HAP et PCB retrouvés dans les matières en suspension (MES), la Figure 42 montre les concentrations retrouvées en mg de contaminant par kilo de matière solide. Les PCB sont quasi-absents des MES (en dessous de 0,07 mg/kg) à l'exception du Robec où une concentration légèrement plus élevée est mesurée (0,12 mg/kg). La concentration en HAP est beaucoup plus élevée sur les MES qu'en phase dissoute dans l'eau, puisqu'on ne dépasse jamais 0,1 µg/L en phase dissoute alors qu'on peut aller au-delà de 18000 µg/kg en phase solide. En effet, les HAP sont hydrophobes et donc très peu solubles dans l'eau, et sont donc principalement véhiculés par les matières solides dans les cours d'eau.

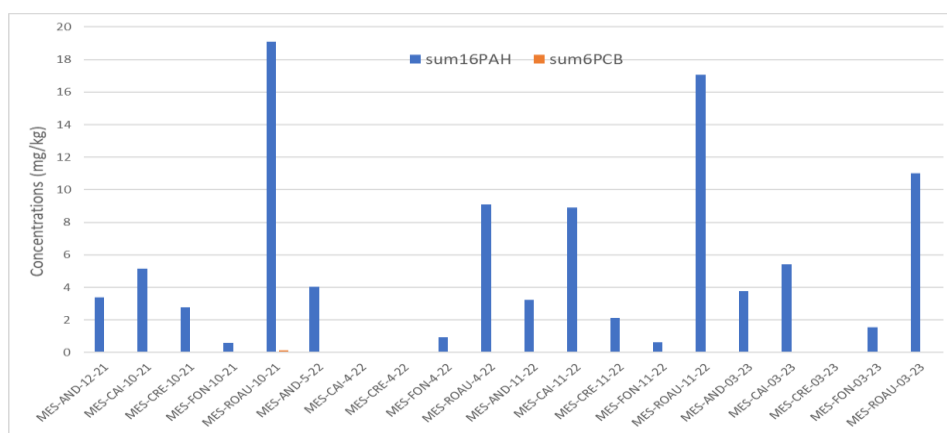


Figure 42 : Somme des 16 HAP prioritaires et des 6 PCB indicateurs dans les MES des rivières Andelle, Cailly, Robec et les sources Crevon et Fontaine-Nourrice, durant les campagnes hiver 2021, printemps 2022, automne 2022 et printemps 2023

En conclusion, les **PCB sont quasi-absents des eaux et MES des 5 sites mesurés, et les HAP sont très peu retrouvés en phase dissoute**. Quand c'est le cas, ils ne dépassent pas les niveaux réglementaires requis. Toutefois, on peut remarquer que la source de **Crevon est la plus impactée**, surtout en 2021 et beaucoup moins dans les années ultérieures, ce qui laisse penser que les HAP provenant essentiellement de dépôts atmosphériques les mois ou années précédant la mesure ont pu s'infiltrer lentement à travers le sol et atteindre cette source. En revanche, concernant les niveaux de HAP présents sur les MES circulant dans les rivières ou cours d'eau souterrains entre 2021 et 2023, ils **sont assez élevés et plus particulièrement pour la rivière Robec**. Ce site en périphérie de Rouen subit donc plus que les autres sites, plus ruraux, l'influence de l'activité humaine, urbaine et industrielle.

iii. Résultat des analyses multi-éléments : les métaux dans les eaux et MES

Métaux en phase dissoute dans l'eau

En ce qui concerne les eaux de surface (telles que le Cailly, l'Andelle et le Robec), la directive 2000/60/CE dans le domaine de la politique européenne de l'eau prévoit également des normes de qualité environnementale (NQE) pour certains éléments traces prioritaires dans les eaux de surface intérieures. L'arrêté français du 9 octobre 2023 donne actuellement des concentrations maximales admissibles selon des normes de qualité environnementale (CMA-NQE) pour le Cd, le Pb ou le Ni. Pour le Pb, la CMA-NQE < 14 µg/L, et cette limite n'a pas été dépassée dans les 3 rivières, bien que les eaux des campagnes 1 et 2 aient été plus impactées. Les deux premières campagnes de la rivière Robec ont également montré les concentrations les plus élevées en Cd, mais elles n'ont pas dépassé la norme CMA-NQE < 0,45 µg/L. **les niveaux en Al, P et Zn sont plus particulièrement concentrés lors des premières campagnes de 2022**. D'importantes quantités de produits stockés sur les sites de Lubrizol et Normandie Logistique contenaient ces éléments particuliers (dont 648 t de bauxite) et ont pu être déposés sur les surfaces environnementales lors de l'accident de fin 2019, puis relargués progressivement lors des épisodes pluvieux.

Métaux adsorbés sur les MES

Contrairement aux HAP et PCB qui sont retrouvés pour l'essentiel en phase particulaire (MES) dans l'eau, les métaux, selon leur spéciation chimique, peuvent être en partie insolubles et se retrouver adsorbés et véhiculés sur les MES et en partie soluble, et donc présents en phase dissoute. Tous les métaux quantifiés en phase dissoute ont donc également été quantifiés dans les MES prélevées sur les 5 sites de l'étude. La Figure 43 présente des exemples de concentrations mesurées pour les 5 sites au cours des campagnes hiver 2021, printemps 2022 et automne 2022.

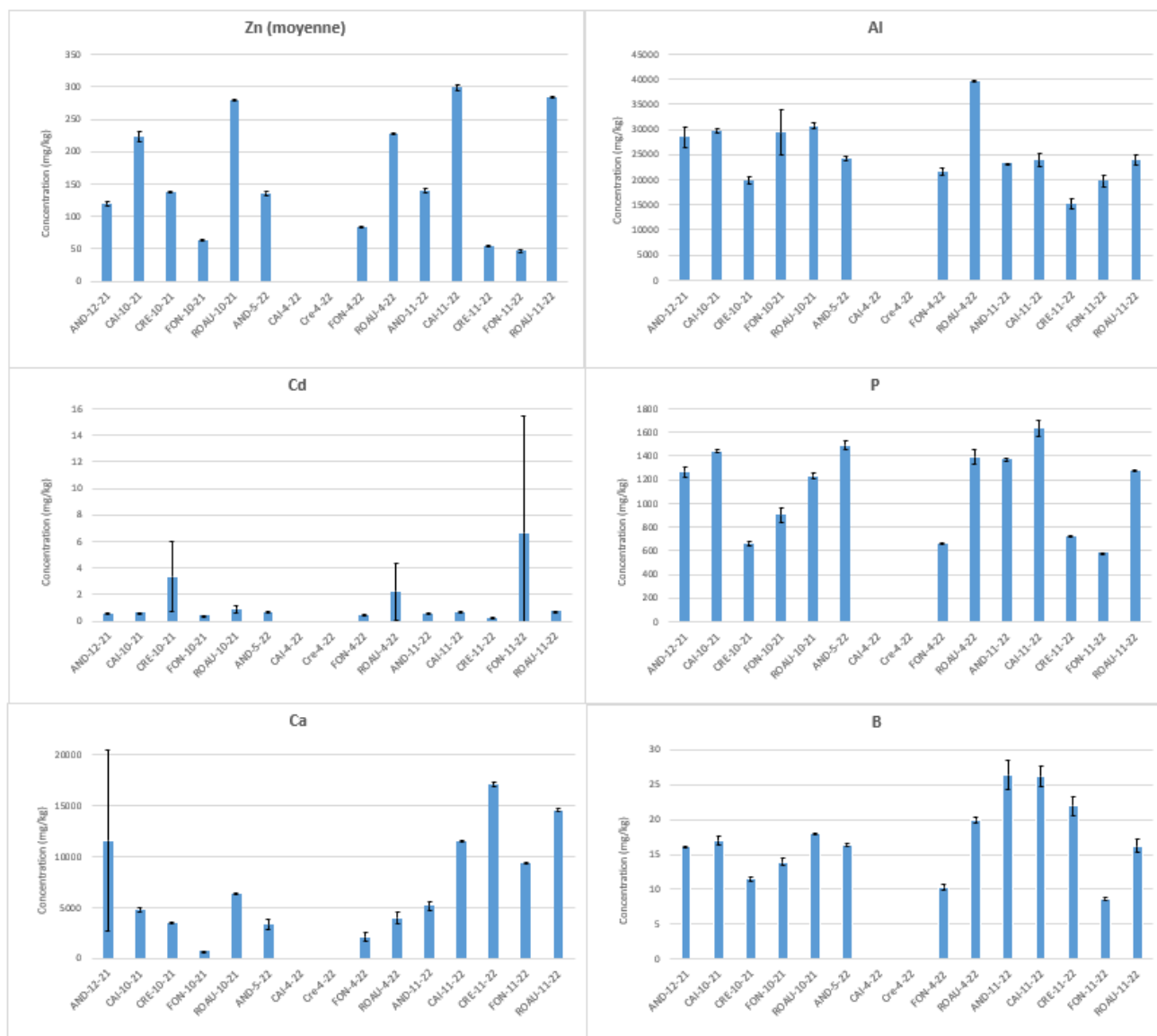


Figure 43 : Concentrations mesurées dans les MES pour Zn, Al, Cd, P, Ca et B, pour les 5 sites au cours des campagnes hiver 2021, printemps 2022 et automne 2022

Les MES, quand elles sédimentent dans certaines conditions (notamment lorsque le courant est faible), contribuent au dépôt de sédiments dans les rivières. Même si les sédiments sont moins mobiles que les MES et qu'en s'accumulant sur le fond, ils sont moins accessibles aux organismes vivants aquatiques, ils peuvent être remis en suspension dans certaines circonstances, notamment lors des crues ou des opérations de dragage. Or, il existe une réglementation pour les sédiments susceptibles d'être dragués (GEODE du 9 août 2006) qui indique des niveaux S1 à surveiller pour certains métaux, au-delà desquels le matériau sédimentaire peut impacter négativement sur l'écosystème aquatique. Il peut donc être intéressant de comparer les niveaux de certains métaux retrouvés dans les MES à ces seuils S1. En ce qui concerne l'As, les niveaux dans les 5 sites relevés ne dépassent pas 8 mg/kg, ce qui est inférieur au niveau S1=30 mg/kg. C'est également le cas pour le Cr, dont les concentrations ne dépassent pas 64 mg/kg, en dessous de S1= 150 mg/kg, et pour le Ni, toujours inférieur à 26 mg/kg, donc inférieur à S1= 50 mg/kg.

En revanche, Le Cd a un niveau S1=2 mg/kg et ce niveau est dépassé pour les MES de Crevon (automne 2021) et de Fontaine-Nourrice à l'automne 2022. Le Cu est généralement en dessous de 91 mg/kg, donc en dessous du niveau S1=100 mg/kg, mais on remarque que le niveau est significativement plus élevé dans la rivière Robec que dans les autres sites, en automne 2021 et 2022. On avait déjà remarqué que le niveau de Cu était également plus élevé dans cette rivière, en phase dissoute. C'est également le cas pour le Pb, qui est plus concentré en phase dissoute et dans

les MES dans la rivière Robec, par comparaison aux autres sites d'étude. Les niveaux de Pb dépassent même le seuil S1=100 mg/kg à l'automne 2021 et 2022 (138-140 mg/kg) dans la rivière Robec. Enfin, les niveaux de Zn dépassent la limite du seuil S1=300 mg/kg à l'automne 2022 et au printemps 2023 (300-310 mg/kg) dans la rivière Cailly, mais la rivière Robec, bien qu'ayant des niveaux inférieurs à S1, est aussi particulièrement impactée par la présence de Zn dans les MES, tout comme elle l'était particulièrement pour la phase dissoute. Les MES de Fontaine-Nourrice et Crevon sont les moins impactées en éléments traces, Robec et Cailly les plus impactées.

Composition isotopique de certains métaux dans les MES

Les MES ont des teneurs (tous isotopes confondus) en Pb et Zn qui dépassent parfois le seuil S1 (100 mg/kg pour le Pb et 300 mg/kg pour le Zn) (Figure 44). Les deux stations les plus proches de l'usine de Lubrizol (Cailly et Robec) ont les teneurs en Pb et Zn les plus élevées (entre 60 et 90 mg/kg en moyenne pour Pb et entre 333 et 326 mg/kg en moyenne pour Zn) comparées aux autres stations (28 mg/kg en moyenne pour Pb et 186 mg/kg en moyenne pour Zn). Pour ces échantillons de MES, **on ne constate pas une atténuation des teneurs en Pb, Zn et Li au fur et à mesure du temps** (d'avril 2021 à mars 2023).

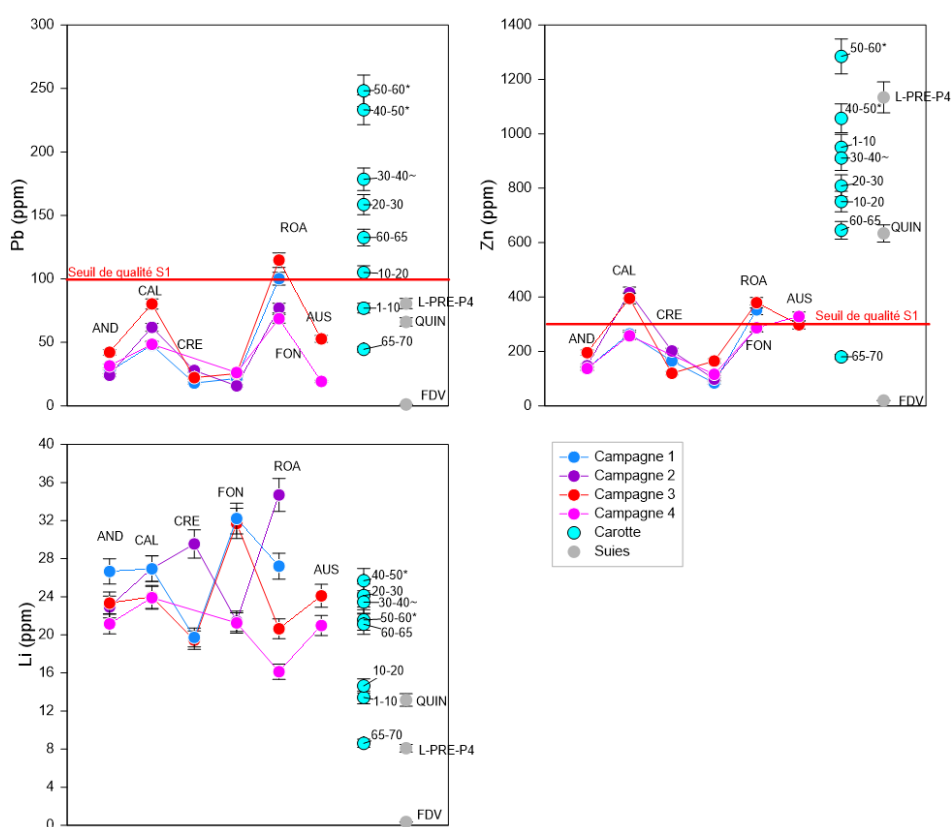


Figure 44 : Teneurs en Pb, Zn et Li (ppm = mg/kg) des échantillons de l'étude : MES des 5 sites d'étude et carotte de sédiments de la darse aux Bois. Le seuil de qualité S1 est représentée par une ligne en rouge pour Pb et Zn

Les 2 éléments Zn et Pb semblent donc avoir des sources communes d'émission.

Pour le plomb, la signature naturelle ou pré-industrielle des sédiments ou MES de la Seine peut être définie grâce à différentes études menées en Seine en 1986 (Elbaz-Poulichet et al. (1986)), en 2020 à Martot (Gardes et al. (2020) et dans l'estuaire de la Seine en 2012 (Chiffolleau et al.) (2012)). Ces études définissent grâce à l'analyse de MES et de sédiments, différentes sources de plomb bien distinctes :

- (1) Une source industrielle « actuelle » provenant de l'amont de la Seine ;
- (2) Une source industrielle « historique » (jusqu'en 2004), attribuable à l'industrie de fabrication des écrans cathodiques et provenant de l'Eure ;

(3) Une source industrielle « historique » (jusque dans les années 80) provenant de rejets de phosphogypses, sous-produits de l'industrie de l'acide phosphorique, dans la région rouennaise ;

Nous constatons que les MES analysées dans le cadre de cette étude sont un mélange entre une signature naturelle et une **contribution anthropique marquée par l'activité industrielle actuelle** (Figure 45). Les rivières les plus impactées par une signature isotopique du plomb à composante industrielle forte, proche de celle des suies prélevées peu après l'accident, sont les rivières de Cailly et Robec, les plus proches du site de Lubrizol. Les eaux souterraines sont moins impactées. En effet, le plomb est très peu soluble dans l'eau et donc peu mobile, l'apport lié à l'accident industriel n'a sans doute que peu subi un processus d'infiltration vers les sources souterraines.

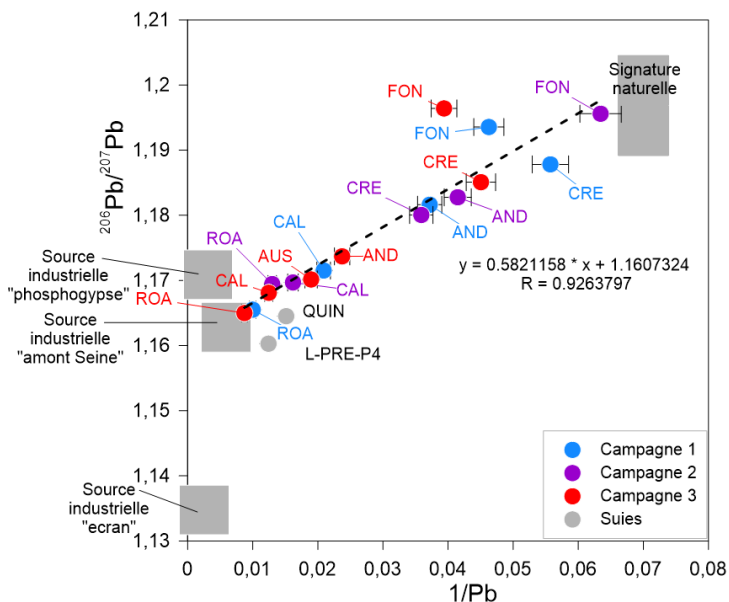


Figure 45 : Représentation graphique des rapports $^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$ en fonction de l'inverse de la teneur en Pb pour les échantillons de MES. La droite en pointillé représente la corrélation linéaire entre $1/\text{Pb}$ et le rapport $^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$ pour les échantillons de MES ($y = 0.582 * x + 1.161$, $R = 0.926$). Les pôles naturels et anthropiques définis par la littérature sont également représentés sur ce graphique

L'échantillon de suie prélevé à Préaux a une composition isotopique en Zn cohérente avec les données de la littérature qui montrent **une valeur élevée en $d^{66/64}\text{Zn}$ pour les émissions industrielles**. Dans une étude sur la signature isotopique des métaux dans l'estuaire de la Seine, Chiffolleau et al. (2012) montrent que les MES échantillonnées en Seine à Poses en 2009 ont une composition isotopique en Zn autour de +0.12 ‰, cette signature est cohérente avec celle du niveau le plus récent (1997-2007) d'une carotte sédimentaire prélevée dans le cadre de la même étude dans le bassin des docks, dont la composition est de +0.11 ‰ (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**). Cette signature est similaire à celle des effluents urbains. Les sédiments les plus anciens de la carotte des docks (1968-1972) ont quant à eux une signature plus élevée, cohérente avec un mélange avec une pollution industrielle plus intense. **Les échantillons de cette étude, avec une valeur de $d^{66}\text{Zn}$ plus élevée (+0.28 ‰) que celles des MES échantillonnées à Poses en 2009 et des sédiments les plus récents de la carotte du bassin des Docks (1997-2007) pourraient être le mélange entre une contribution des effluents urbains et une contribution industrielle supplémentaire, plus forte que celle enregistrée avant 2007.** On remarquera que **les MES de Fontaine Nourrice et Crevon, les 2 sources souterraines, sont toujours marquées par cette signature isotopique à forte composante industrielle**, même pour les campagnes de 2022 relativement éloignées de l'accident. Le zinc est un métal relativement soluble dans l'eau sous certaines spéciations chimiques, et donc assez mobile et pouvant s'infiltrer plus facilement que le plomb dans les nappes souterraines.

Les compositions isotopiques en Li des échantillons de l'étude sont présentées dans la Figure 46. Pour les MES, nous constatons que leurs compositions isotopiques sont constantes dans le temps à l'exception des échantillons de Crevon et Fontaine Nourrice. L'échantillon de suie prélevé à Quincampoix a une valeur très faible en $d^7\text{Li}$ de -4 ‰. La représentation des compositions isotopiques en lithium en fonction de l'inverse de la concentration semble montrer que les échantillons de MES (et de sédiments de la darse aux Bois) sont un mélange entre un pôle riche en

Li avec une valeur de $\delta^7\text{Li}$ faible (qui correspond à la composition isotopique des suies prélevées peu après l'incendie) et un pôle avec une faible concentration en Li liée à une valeur de $\delta^7\text{Li}$ élevée. La rivière qui semble donc la plus impactée par un apport lié à l'incendie de Lubrizol, avec un $\delta^7\text{Li}$ faible, est la rivière Robec. La campagne de prélèvement la plus récente de 2023 dans la source de Fontaine-Nourrice montre que la composition isotopique du Li s'éloigne d'une contribution liée à l'apport des suies issues de l'incendie (Figure 46).

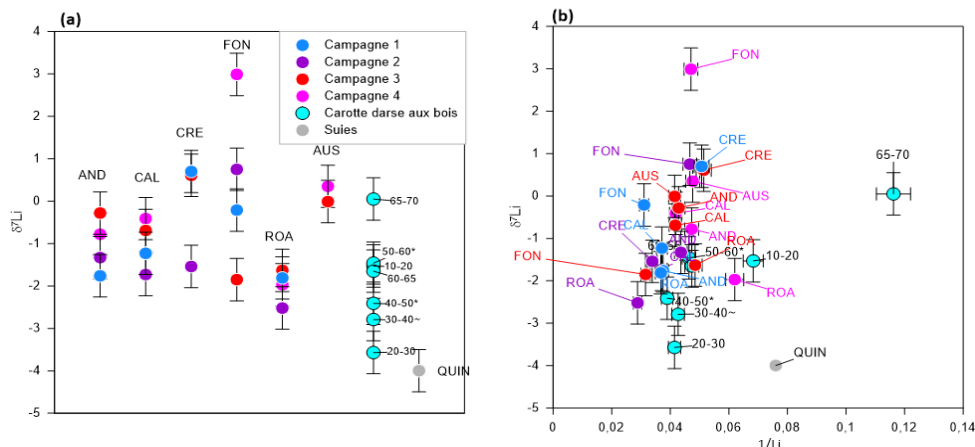


Figure 46 : Représentation graphique (a) des compositions isotopiques en Li, et (b) des compositions isotopiques en Li en fonction de l'inverse de la teneur en Li pour les échantillons de MES et des sédiments de la darse aux Bois

3. Imprégnation dans les sols

On rappelle que 8 sols d'étude ont été prélevés, à Préaux (dans 1 champ cultivé par du maïs et 1 champ sans culture), Fontaine sous Préaux (1 champ sans culture), Isneauville (1 champ sans culture), Quincampoix (1 champ cultivé) et Petite Bouverie (prairie non cultivée), car ils étaient situés sous le panache de fumées lors de l'incendie Lubrizol et à moins de 12 km de la source d'émission. Parmi ces 8 sols, celui de la Petite Bouverie avait été collecté et conservé par le laboratoire ECODIV 4 mois avant l'incendie, puis il a été à nouveau prélevé 4 mois puis 9 mois après l'incendie. Ils serviraient donc de comparaison pour évaluer un éventuel impact de l'incendie. Les autres sols ont tous été collectés 3 à 4 mois après l'incendie.

i. Résultat des analyses non ciblées : les marqueurs de l'incendie dans les sols

La molécule $\text{C}_{10}\text{H}_{14}\text{O}$, identifiée comme étant du **4-tert-Butylphénol** au niveau 4 par GC-HRMS et FTICR-MS, a été trouvée dans l'échantillon de sol de Préaux correspondant à un champ sans culture. Ce composé était également présent dans les suies au moment de l'incendie et il a été retrouvé dans des échantillons d'eaux. Il était présent dans deux produits Lubrizol stockés sur site : le premier produit, le 631, est utilisé dans les outils mécaniques à deux temps et contient du 4-tert-Butylphénol à des concentrations de 0,1 à 1 %. Le second produit, 5158, est un inhibiteur de rouille et d'oxydation, contenant également du 4-tert-Butylphénol (appelé Phénol, 2-(1,1-diméthyléthyl)-) à des concentrations de 0,1-1%. Dans cet échantillon de sol de Préaux a également été retrouvée une molécule largement utilisée dans les produits Lubrizol, le **phénol dodécyl ramifié** ($\text{C}_{18}\text{H}_{30}\text{O}$), au niveau de confiance 4 par FTICR-MS. Cette molécule est présente dans 125 produits Lubrizol, tels que le produit 600 (utilisé dans les moteurs de moto à deux temps) à 0,01-0,25%, le produit 631 (utilisé dans les outils mécaniques à deux temps) à 0,01-0,25%, le produit 3589 (utilisé dans les moteurs diesel à haute performance) à 0,3-1%, et le produit 5190C (utilisé comme additif d'huile hydraulique anti-usure) à 0,3-1%. Également, le **1H3H-naphtho[1,8,cd]pyran** $\text{C}_{12}\text{H}_{10}\text{O}$ identifié dans le sol de Préaux au niveau de confiance 4 par FTICR-MS, avait par ailleurs été retrouvé dans les suies au moment de l'incendie. La **N,N'-Méthylènebismorpholine** $\text{C}_9\text{H}_{18}\text{N}_2\text{O}_2$ a été trouvée dans les 2 échantillons de sols de Préaux (le champs sans culture et celui cultivé par du maïs) au niveau de confiance 4 par FTICR-MS. Cette molécule correspond à 2 produits lubrizol : CONTRAM ST-1, un produit biocide qui contient de la N,N'-Méthylènebismorpholine à 50,01-100%, et LUBRIZOL MC9440, utilisé dans le traitement des métaux, qui contient de la N,N'-Méthylènebismorpholine à 5-10%. La N,N'-Méthylènebismorpholine a également été trouvée dans les suies au moment de l'incendie au niveau de confiance le plus élevé (1), et dans les eaux et les MES au niveau 4.

Dans les échantillons de sols de la Petite Bouverie et de Préaux (champs sans culture), la molécule $C_{13}H_{20}O$, identifiée comme un **dérivé d'heptylphenol**, a été identifiée au niveau 4. Ce composé a été aussi retrouvé dans les eaux et est présent dans cinq produits Lubrizol : Anglamol 98A, Anglamol 99, Anglamol 99N, Anglamol 2022, et Anglamol 6044B, tous utilisés comme additifs dans les huiles pour engrenages automobiles, contenant le composé à 0,1-0,25%. Une **morpholide** a été identifiée dans un échantillon de la Petite Bouverie, au niveau 4 par FTICR-MS, et avait déjà été détectée dans les suies au moment de l'incendie.

La molécule $C_{15}H_{24}O$, identifiée comme étant du **2,6-Di-tert-butyl-p-crésol** au niveau 4 par FTICR-MS, a été trouvée dans l'échantillon de sol de Fontaine sous Préaux. Ce composé a été retrouvé également dans des échantillons de MES, d'eaux, et dans les suies lors du rejeu du feu en laboratoire. Il est présent dans plusieurs produits Lubrizol : le produit 7418A, utilisé comme agent améliorant la viscosité, contient du 2,6-Di-tert-butyl-p-crésol à des concentrations de 0,1-0,25%. Le produit 7933A, utilisé dans les fluides de transmission automatique, contient le même composé à des concentrations de 2,5 à 5 %. De plus, les produits nommés ADDCO ADDTAC, utilisés dans le traitement des métaux, contiennent du 2,6-Di-tert-butyl-p-crésol à des concentrations de 1 à 2,5 %.

ii. *Résultat des analyses ciblées : polluants organiques dans les sols*

Dioxines et furanes

La même stratégie analytique que celle décrite précédemment pour les MES a été utilisée pour mettre en évidence la présence de dioxines dans les sols. Les analyses de dioxines réalisées sur l'ensemble des échantillons de sol de l'étude montrent que les concentrations des 17 congénères recherchés sont inférieures aux limites de détection.

HAP et PCB

Les 8 sols d'étude, prélevés à Préaux, Fontaine sous Préaux, Isneauville, Quincampoix et Petite Bouverie, ont été analysés pour quantifier les contaminants ciblés : les 16 HAP prioritaires et les 6 PCB indicateurs. La somme des HAP et des PCB est représentée sur la Figure 47. Il faut rappeler que le sol de Petite Bouverie n°2 a été prélevé 4 mois avant l'incendie et celui de Petite Bouverie n°3 a été prélevé 9 mois après l'incendie : ils serviront donc de comparaison pour évaluer un éventuel impact de l'incendie.

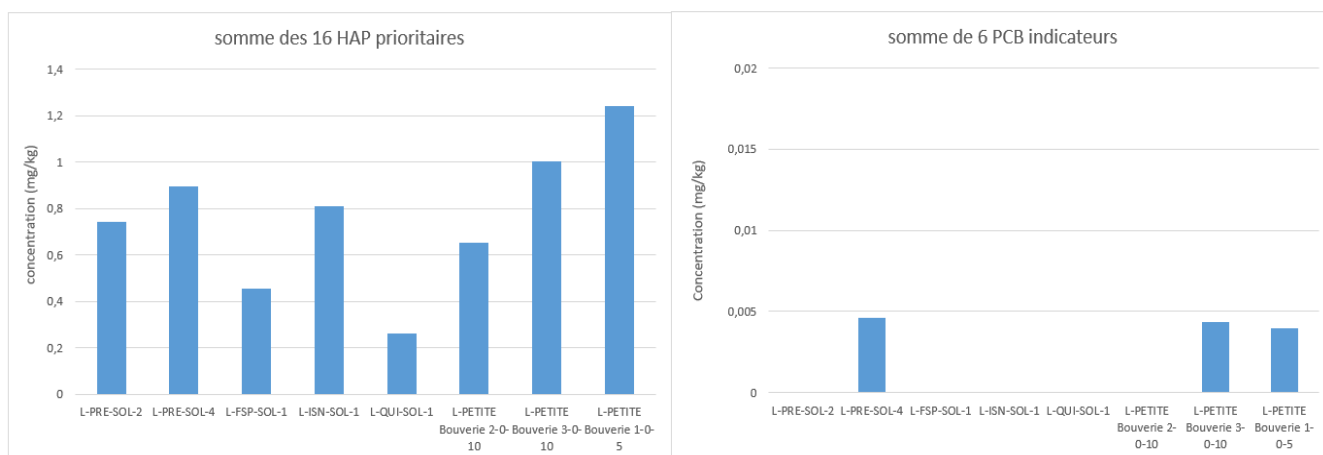


Figure 47 : Concentrations en HAP totaux (16 prioritaires) et en PCB totaux (6 indicateurs) dans les 8 sols prélevés pour l'étude

On remarque que les PCB, substances qui ne sont plus fabriquées et utilisées en France depuis 1987, sont quasi-absents des sols étudiés, à l'exception de Préaux et Petite Bouverie où seul le PCB52 a été détecté à moins de 5 $\mu\text{g}/\text{kg}$, et en dessous de sa limite de quantification.

Concernant les HAP, leur source d'émission provenant principalement d'activités anthropiques (urbaines et/ou industrielles) et très peu de sources naturelles (feux de forêts), leur teneur mesurée dans les sols est relativement faible, entre 0,2 et 1,2 mg/kg , ce qui est représentatif de sols en milieu rural ou péri-urbain. Les sols impactés en milieu urbain ont plutôt des valeurs comprises entre 1 et 10 mg/kg pour la somme des 16 HAP, tandis que les sols en zone industrielle présentent des valeurs comprises entre 10 et plus de 100 mg/kg .

On peut se demander si la teneur plus ou moins importante de HAP dans les sols prélevés après l'accident est corrélée à la distance par rapport à l'incendie, qui, on l'a vu précédemment, a généré beaucoup de HAP dans l'air et sur les suies. La Figure 48 présente le lien entre les teneurs en HAP totaux mesurés dans les sols et la distance avec le site Lubrizol. Même si le site de Petite Bouverie, plus près de l'accident, est le plus impacté et le site de Quincampoix, le plus éloigné, est le moins impacté, on voit qu'il n'y a pas réellement de corrélation directe entre le niveau de contamination en HAP et la distance avec l'incendie ($R^2=0.109$).

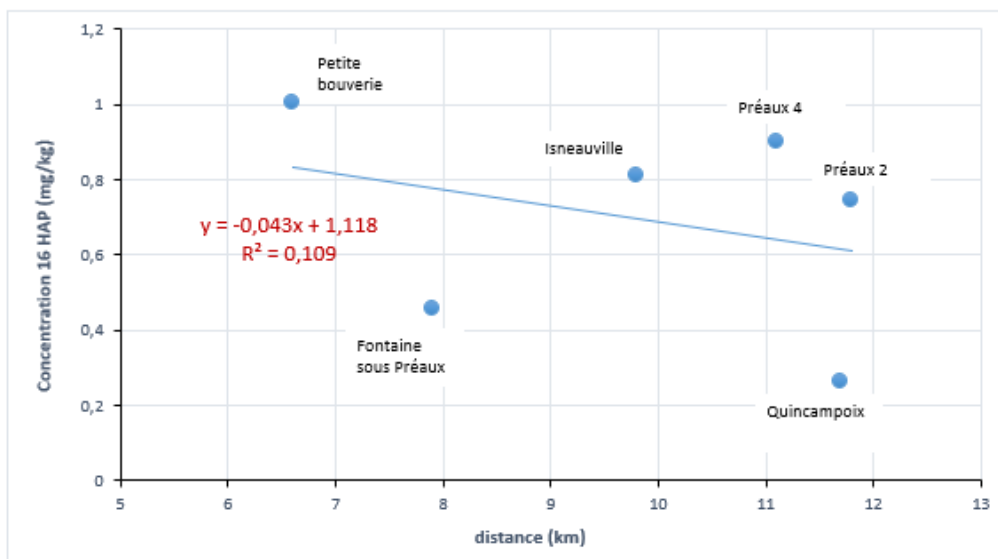


Figure 48 : Relation entre les niveaux de HAP dans les sols et la distance par rapport à l'incendie

La Figure 49 montre l'impact de l'incendie sur le sol de Petite Bouverie, puisque ce sol a été prélevé avant et après l'incendie. On mesure bien une augmentation significative de certains HAP après l'incendie, surtout le fluoranthène et le pyrène, à 4 cycles aromatiques juxtaposés, et c'est également le cas pour les HAP plus lourds à 5 et 6 cycles juxtaposés. Cela confirme la dissémination d'une grande quantité de HAP par le nuage de fumée lors de l'incendie, HAP produits lors de la combustion et détectés, on le rappelle, en phase gazeuse pour les plus légers et sur les suies pour les HAP moyens et lourds (peu ou pas volatils).

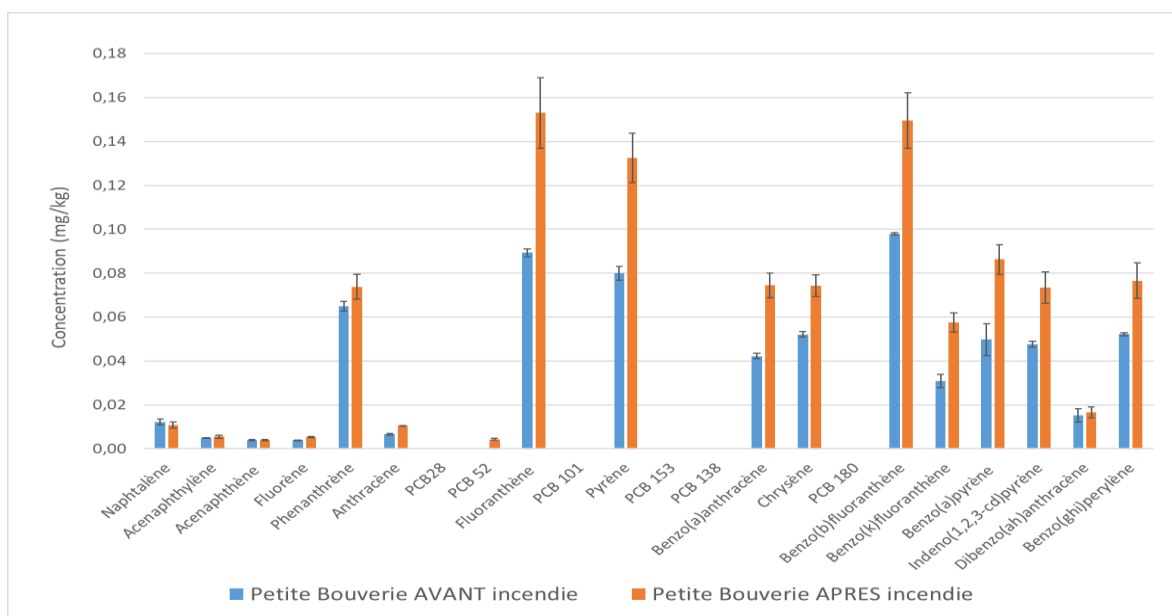


Figure 49 : Concentration de chacun des HAP et PCB individuels mesurés dans le sol de Petite Bouverie avant et après l'incendie (profondeur 0-10 cm)

Les HAP lourds à 4-6 cycles aromatiques, transportés en phase solide sur les suies, sont difficilement biodégradés dans les sols et très peu mobilisés par les eaux d'infiltration, car quasi-insolubles dans l'eau. On les retrouve donc en plus grande quantité dans le sol de surface de Petite Bouverie, même 9 mois après l'incendie ; tandis que les HAP volatils légers, à 2-3 cycles aromatiques, et plutôt transportés en phase gazeuse, sont plus biodégradables et disparaissent plus rapidement des sols, métabolisés par les organismes vivants, volatilisés dans l'air ou même lixiviés par les eaux d'infiltration. C'est pourquoi la différence avant/après incendie est peu significative pour les HAP légers.

iii. Résultat des analyses ciblées : polluants métalliques dans les sols

La concentration des éléments inorganiques dans les échantillons de sols prélevés avant et après l'incendie de Lubrizol sur le site de la Petite Bouverie est présentée dans la Figure 50. Les métaux Ag, Cd, Eu, Ho, Er, Tm, Lu et Tl présentent des valeurs inférieures à la limite de détection et ne sont pas présentés dans cette figure. Lorsque l'on compare les concentrations de métaux avant et après l'incendie sur ce site, plusieurs métaux présentent une augmentation de la concentration 5 jours après l'incendie, suivie d'une réduction de la concentration 9,5 mois plus tard. Ce schéma indique un possible effet transitoire dû à un apport lié à l'incendie, avec un pic initial à 5 jours probablement dû à des dépôts carbonés, des cendres ou à d'autres apports liés à l'incendie, et une dilution ou un lessivage au fil du temps.

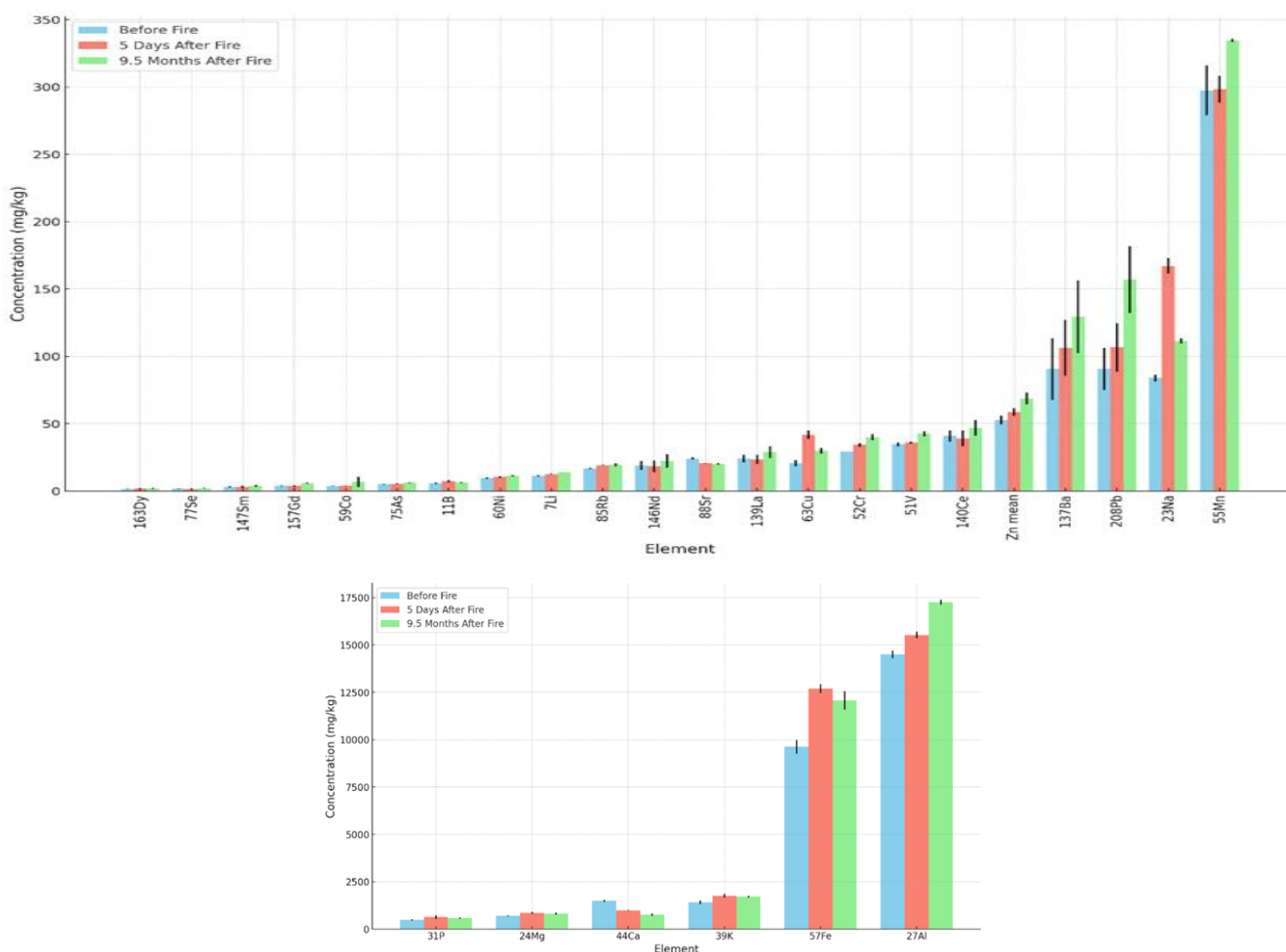


Figure 50 : Concentration des éléments dans les échantillons de sol du site de la petite Bouverie, 4 mois avant l'incendie, 5-6 jours après et 9,5 mois après l'incendie, pour les éléments mineurs (en haut) et les éléments majeurs (en bas)

Par contre, un sous-ensemble de métaux montre une augmentation continue de la concentration entre la période précédant l'incendie, 5 jours après, et jusqu'à 9,5 mois après l'incendie. Cette tendance suggère un effet cumulatif des apports potentiels liés à l'incendie (surtout 5 jours après l'incendie), avec d'autres apports chroniques liés à l'activité anthropique. Bien que le sol de petite Bouverie soit une prairie, donc sans apports de métaux liés à des

pratiques de l'agriculture intensive, cette prairie est située en zone urbaine rouennaise près d'une route à très grande circulation et pas très loin des zones industrielles rouennaises. Cette augmentation continue pourrait aussi être due à des processus encore en cours tels que l'altération lente des matériaux touchés par le feu, qui relarguent lentement certains éléments.

Il n'est pas étonnant d'avoir constaté une augmentation des éléments P, B, Na et Mg dans les analyses du sol de Petite Bouverie 5 jours après l'accident, mais cet apport ponctuel n'a pas été suivi d'apports chroniques supplémentaires dans le temps. En revanche, les apports en Zn, Li et Ba ont été accrus suite à l'accident, mais ont continué à croître après plusieurs mois. Il faut savoir que le Zn peut aussi provenir, dans les zones urbaines, de relargages liés aux toits en zinc lors des épisodes de pluies et près des routes à grande circulation, de l'usure d'alliages plastiques/zinc utilisés en grande quantité dans les véhicules (ces matériaux étant en outre utilisés en constante augmentation dans l'industrie automobile). Le lithium est lui aussi utilisé en grande quantité dans les batteries des véhicules électriques ou des téléphones, donc il n'est pas étonnant que la contamination chronique se rajoute au pic de relargage constaté 5 jours après l'accident. Enfin le baryum est contenu également dans des peintures, des briques, des carreaux, du verre ou du caoutchouc, donc des matériaux courants que l'on rencontre dans les zones à haute densité de population et qui constituent donc une source chronique de contamination.

En ce qui concerne une distribution spatiale des éléments inorganiques potentiellement disséminés suite à l'accident de Lubrizol, le sol prélevé à Préaux a été l'endroit le plus touché, présentant les concentrations les plus élevées pour plusieurs métaux sans montrer de pollution.

4. Imprégnation dans les sédiments

i. Résultat des analyses non ciblées : les marqueurs de l'incendie dans les sédiments

Molécules marqueurs peu polaires à moyennement polaires dans les sédiments

8 molécules marqueurs ont été identifiées dans les sédiments, c'est à dire des molécules qui étaient présentes dans les stocks Lubrizol et également identifiées dans des échantillons des suies, d'air ou de collecte d'effluents issus de retombées de l'incendie :

- Le **4-tbutyl phénol** (identifiée au niveau de confiance élevé 2) a été identifiée dans toutes les sections de la carotte, avec toutefois une intensité accrue dans la section 10-20 cm et moindre dans la section antérieure à l'accident. Cette molécule a également été identifiée lors du rejeu du feu, puis dans l'eau et les sols plusieurs mois après l'accident.

- La **diphenylamine** (niveau de confiance 2) a été identifiée dans toutes les sections de la carotte, mais également lors du rejeu du feu, dans les suies collectées au moment de l'incendie, puis dans l'eau. Elle a été détectée dans la carotte avec une intensité plus élevée dans les sections 30-40 et 40-50 cm (Figure 51).

- Le **2,6-bis(1,1-diméthylethyl)phénol** (niveau de confiance 2) a été identifié dans toutes les sections de la carotte, mais également lors du rejeu du feu, dans l'échantillon ASL et les suies collectés au moment de l'incendie et dans l'eau plusieurs mois après l'accident. Elle a été détectée dans la carotte avec une intensité plus élevée dans la section moins récente 40-50 cm, mais a été détectée également avec une très forte intensité dans la section récemment déposée 0-10 cm.

- Le **4-(1,1,3,3-tetraméthylbutyl)phénol** (niveau de confiance 2) fait partie de la famille des dérivés de nonylphénols, et a été identifié dans toutes les sections de la carotte. Un isomère de cette molécule 4-(1,1,3,3-tetraméthylbutyl)phénol a également été identifié (niveau de confiance 4 moins élevé). Ces 2 molécules ont été détectées dans la carotte avec une intensité plus élevée dans la section 40-50 cm qui a reçu les effluents lors de l'incendie (Figure 51). Ces dérivés de nonylphénols ont également été identifiés dans l'échantillon ASL et dans l'eau, les MES et les sols plusieurs mois après l'accident.

- La **2-phenyl benzothiazole** (niveau de confiance 4) a été identifiée dans toutes les sections de la carotte, mais également lors du rejeu du feu, dans l'air et les suies collectés au moment de l'incendie, puis dans l'eau et les MES plusieurs mois après l'accident. Elle a été détectée dans la carotte avec une intensité plus élevée dans la section

plus profonde 40-50 cm, mais a été détectée également avec une forte intensité dans les sections récemment déposées (0-10 cm et 10-20 cm) (Figure 51). Cette double distribution laisse penser qu'il existe toujours une source d'émission importante de cette molécule (probablement dans l'atmosphère, car cette molécule est volatile), source qui était peu présente à des dates antérieures à l'accident.

- Le **2,4-dimethylthiophene** (niveau de confiance 3 intermédiaire, car possiblement 2-éthylthiophène) a été identifié dans toutes les sections de la carotte, mais également dans l'air au moment de l'incendie. Elle a été détectée dans la carotte avec une intensité plus élevée dans la section la plus profonde 40-50 cm, mais a été détectée également avec une intensité élevée dans les sections récemment déposées (0-10 cm et 10-20 cm). Tout comme la molécule soufrée précédente, cette molécule est volatile et la double distribution laisse penser qu'il existe toujours une source d'émission importante de cette molécule.

- Le **Trisulfide, bis(1,1-dimethylethyl)** (niveau de confiance intermédiaire 3) a été identifié dans toutes les sections de la carotte, mais également dans l'air et les suies déposées au moment de l'incendie. Sa distribution en intensité dans la carotte est très hétérogène, mais cette molécule soufrée volatile, quasi-absente dans la carotte avant l'incendie, semble avoir d'autres sources d'émission qui perdurent et sont variables dans le temps.

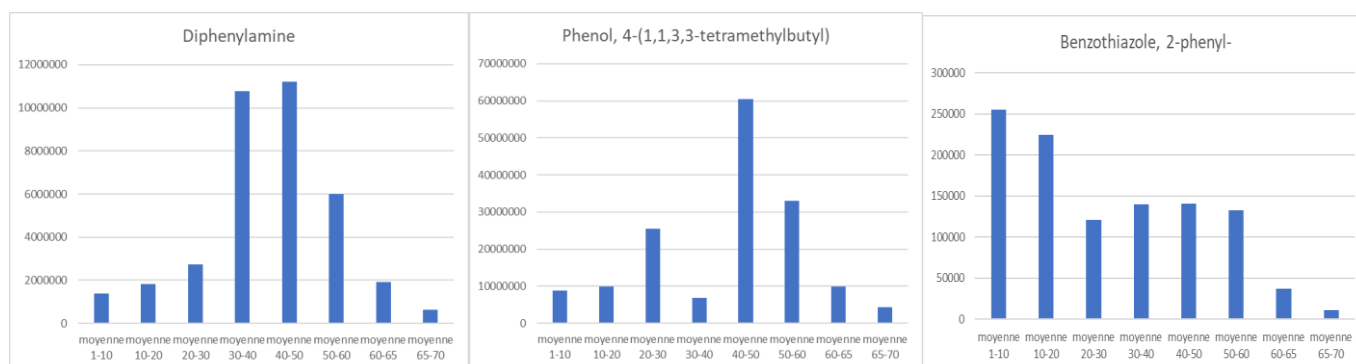


Figure 51 : Intensités détectées de 3 des molécules marqueurs dans les différentes sections de la carotte de la darse aux Bois

- Enfin, **une molécule dérivée de nonylphénols éthoxylés** (niveau de confiance 4) a été identifiée dans toutes les sections de la carotte, mais également dans les MES plusieurs mois après l'accident.

Molécules polaires d'intérêt dans les sédiments

Une liste restreinte de 12 molécules, spécifiquement retrouvées dans l'échantillon de profondeur 40-50 cm (estimé comme potentiellement le plus touché par la contamination de l'incendie car datant de cette période), a été établie (Tableau 15).

Tableau 15 : Liste restreinte de molécules polaires d'intérêt issues des listes de composés détectés par FTICR MS dans les échantillons ASL et de suie, et détectées dans les échantillons de sédiments ou d'eau de la darse aux Bois analysés par UPLC-IMS-QTOF

m/z	Temps de rétention (min)	Temps de dérive (ms)	Matrice	Formule	Origine
327,07751	15,346	5,51	eau	C18H15O4P(H+)	suies
382,25336	12,693	6,06	eau	C22H37O3S(H+)	ASL-huile / ASL-aqueux
240,14869	6,582	5,06	eau	C15H21O(Na+)	ASL-aqueux
315,20361	12,545	5,67	eau	C16H25O5(NH4+)	ASL-aqueux
414,26901	7,514	6,66	eau	C28H39(K+)	ASL-huile
459,29258	16,289	7,01	eau	C28H43O3S(+)	ASL-huile
349,05965	15,345	5,98	eau	C18H15O4P(Na+)	suies
244,18019	4,955	5,26	eau	C15H25O(Na+)	ASL-aqueux
314,14924	6,088	5,84	eau	C17H23O4(Na+)	ASL-aqueux
329,17483	13,005	5,81	eau	C20H25O4(+)	ASL-huile / ASL-aqueux
424,30333	14,403	4,40	sediment (40-50)	C21H43O8(H+)	ASL-aqueux
506,37835	17,022	4,98	sediment (40-50)	C31H53O3S(H+)	ASL-huile
512,38371	18,673	5,03	sediment (40-50)	C31H53O4(Na+)	ASL-huile / ASL-aqueux
512,38393	18,658	7,46	sediment (40-50)	C31H53O4(Na+)	ASL-huile / ASL-aqueux
543,39685	16,295	5,27	sediment (40-50)	C26H53O10(NH4+)	ASL-aqueux
557,38989	10,196	7,90	sediment (40-50)	C27H57O11(+)	ASL-aqueux
581,40415	13,150	5,61	sediment (40-50)	C33H57O8(+)	ASL-huile
589,37935	7,682	7,81	sediment (40-50)	C27H57O13(+)	ASL-aqueux
615,43223	11,191	8,00	sediment (40-50)	C30H63O12(+)	ASL-aqueux
636,47950	21,255	6,07	sediment (40-50)	C34H67O10(H+)	ASL-aqueux
679,41219	6,669	4,16	sediment (40-50)	C30H63O16(+)	ASL-aqueux
680,46914	9,147	8,60	sediment (40-50)	C33H69O12(Na+)	ASL-aqueux

Sur les 86 molécules spécifiques retrouvées dans l'eau de la darse aux Bois en 2019, seules 8 ont été retrouvées également dans les sédiments (Tableau 16), et sur les 20 d'intensité supérieure à 2000, seul 1 composé issu de la liste de molécules d'intérêt dans la base de données interne était donc présent à la fois dans les sédiments et les eaux de la darse aux Bois : le **dodecylbenzenesulfonic acid**.

Tableau 16 : Liste restreinte de molécules polaires d'intérêt issus des listes de composés détectés par FTICR MS dans les échantillons ASL et de suie ou des listes de produits utilisés sur le site de l'incendie, et détectés dans les échantillons de sédiments et d'eau de la darse aux Bois, analysés par UPLC-IMS-QTOF

m/z	Temps de rétention (min)	Temps de dérive (ms)	Matrice	Formule	Origine
326,19109	9,362	4,32	communs eau-sédiments	C18H30O3S(+) dodecylbenzene sulfonic acid	Lubrizol fiche (ionisation positive)
331,19043	10,723	4,34	communs eau-sédiments	C20H27O4(+)	ASL-aqueux
425,31073	9,830	5,09	communs eau-sédiments	C21H45O8(+)	ASL-aqueux
431,26147	10,976	4,67	communs eau-sédiments	C26H39O3S(+)	ASL-huile
431,26149	10,972	6,14	communs eau-sédiments	C26H39O3S(+)	ASL-huile
445,27737	10,032	4,83	communs eau-sédiments	C27H41O3S(+)	ASL-huile
450,27458	7,438	5,16	communs eau-sédiments	C24H43O5(K+)	ASL-huile / ASL-aqueux
481,37372	15,901	5,58	communs eau-sédiments	C25H53O8(+)	ASL-aqueux

Bien que détecté à des teneurs élevées dans l'eau de la darse aux Bois en 2019, on notera que le dodecyl benzene sulfonic acid a également été détecté dans l'échantillon de ruissellement ASL. Même s'il est présent tout particulièrement dans la section de sédiments de la darse ayant reçu les lixiviats peu après l'incendie, le dodecylbenzenesulfonic acid ne peut pas être considéré comme un marqueur spécifique de l'incendie car il est très largement utilisé comme agent tensioactif (agent moussant) et lubrifiant dans des applications industrielles très diversifiées (il était d'ailleurs présent dans les stocks Lubrizol), et est malheureusement assez disséminé dans l'environnement.

ii. *Résultat des analyses ciblées : polluants organiques dans les sédiments*

Dioxines et furanes dans les sédiments

Les analyses de dioxines réalisées sur l'ensemble des sections de la carotte de sédiment montrent que les concentrations des 17 congénères recherchés sont inférieures aux limites de détection.

HAP et PCB dans les sédiments

Les HAP et PCB sont retrouvés en plus grande quantité dans les fractions 40-50 cm et 50-60 cm, profondeurs de sédiment ayant probablement reçu les effluents de l'incendie Lubrizol en septembre 2019.

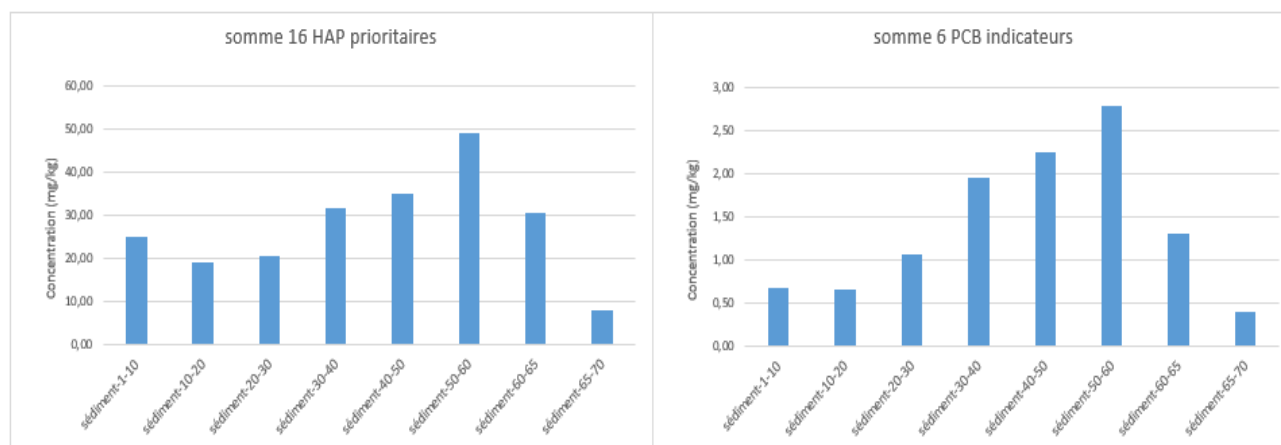


Figure 52 : Concentrations en HAP totaux (16 prioritaires) et en PCB totaux (6 indicateurs) dans les différentes sections de la carotte sédimentaire de la darse aux Bois

Il est à noter que les sédiments fluviaux, lorsqu'ils sont dragués (comme c'est le cas régulièrement pour la darse aux Bois, et cela a été fait en 2018), sont soumis à une réglementation : la réglementation GEODE du 9 août 2006 indique qu'au-delà du niveau $S1=22,8$ mg/kg des 16 HAP prioritaires, les sédiments sont considérés comme toxiques pour l'environnement aquatique. On remarque que dans les sédiments compris entre 30 et 65 cm, ce niveau $S1$ est largement dépassé pour les HAP prioritaires, le niveau limite est même doublé dans le cas de la section 50-60 cm : ces sédiments toxiques devraient donc être soumis à une réglementation très stricte et devraient être mis en décharge spécifique, pour produits dangereux, en cas de curage futur de la darse.

Un niveau $S1$ est également indiqué pour la somme des PCB indicateurs, qui est $S1=0,68$ mg/kg. Au-delà, on considère que le sédiment est toxique et comme pour les HAP, ce niveau est largement dépassé, toujours dans les sections entre 30 et 65 cm de profondeur. Le Niveau de PCB est même 4 fois supérieur à la limite $S1$ dans la section 50-60 cm. Il est difficile d'établir un lien direct avec l'incendie, car les PCB sont interdits en France depuis 1987. Fabriqués depuis les années 1920, ils ont été massivement utilisés entre 1930 et 1970 comme lubrifiants (turbines, pompes...) et dans la fabrication de transformateurs électriques et de condensateurs, car ils sont très stables thermiquement. On les a également utilisés dans certains adhésifs, peintures, huiles... On peut juste supposer que cet apport supplémentaire de PCB dans les sédiments suite à l'incendie provient de la destruction d'anciennes installations ou d'anciens revêtements qui contenaient ces composés, qui ne sont pas dégradés thermiquement par le feu et ont donc été dispersés à proximité du site Lubrizol.

PFAS dans les sédiments

Les concentrations totales en per- et polyfluoroalkylées (PFAS) des prélèvements de la Darse aux Bois ont été mesurées (UMR CNRS EPOC-Université de Bordeaux) en distinguant 3 marqueurs spécifiques : le sulfonate de perfluorooctane (PFOS), puis le 6:2 et le 8:2 FTAB, 2 bétaines polyfluoroalkylées, composés zwitterioniques utilisés historiquement dans les formulations de mousse anti-incendie. Les résultats (Figure 53) montrent 2 dynamiques différentes. La première concerne la somme des PFAS et le PFOS dont les concentrations suivent les mêmes variations avec un pic très fort contemporain de l'incendie puis un deuxième pic observé dans les sédiments datant de fin 2022-début 2023. Ces deux pics dépassent la valeur maximale mesurée dans une carotte sédimentaire à la sortie de l'agglomération lyonnaise. La deuxième dynamique concerne deux FTAB contenus dans les mousses anti-incendie. Le signal est moins évident à comprendre car laisse apparaître une tendance à l'augmentation depuis l'incendie avec un maximum stabilisé depuis fin 2022. Est-ce dû à des apports de surface diffus et réguliers ayant souillé les sédiments, à une contamination des couches sédimentaires par l'aquifère ? Néanmoins avec certitude nous pouvons caractériser l'impact de l'incendie sur la contamination en PFAS des sédiments de la darse aux bois. En absence de seuil réglementaire, aucune pollution n'est à mettre en avant mais les valeurs mesurées sont très nettement supérieures à celles observées habituellement dans l'environnement. Les concentrations en PFAS depuis

l'incendie ne sont pas revenues à leurs niveaux antérieurs et ont dépassées par deux fois les maximums observés dans la vallée de la chimie en sortie de l'agglomération lyonnaise.

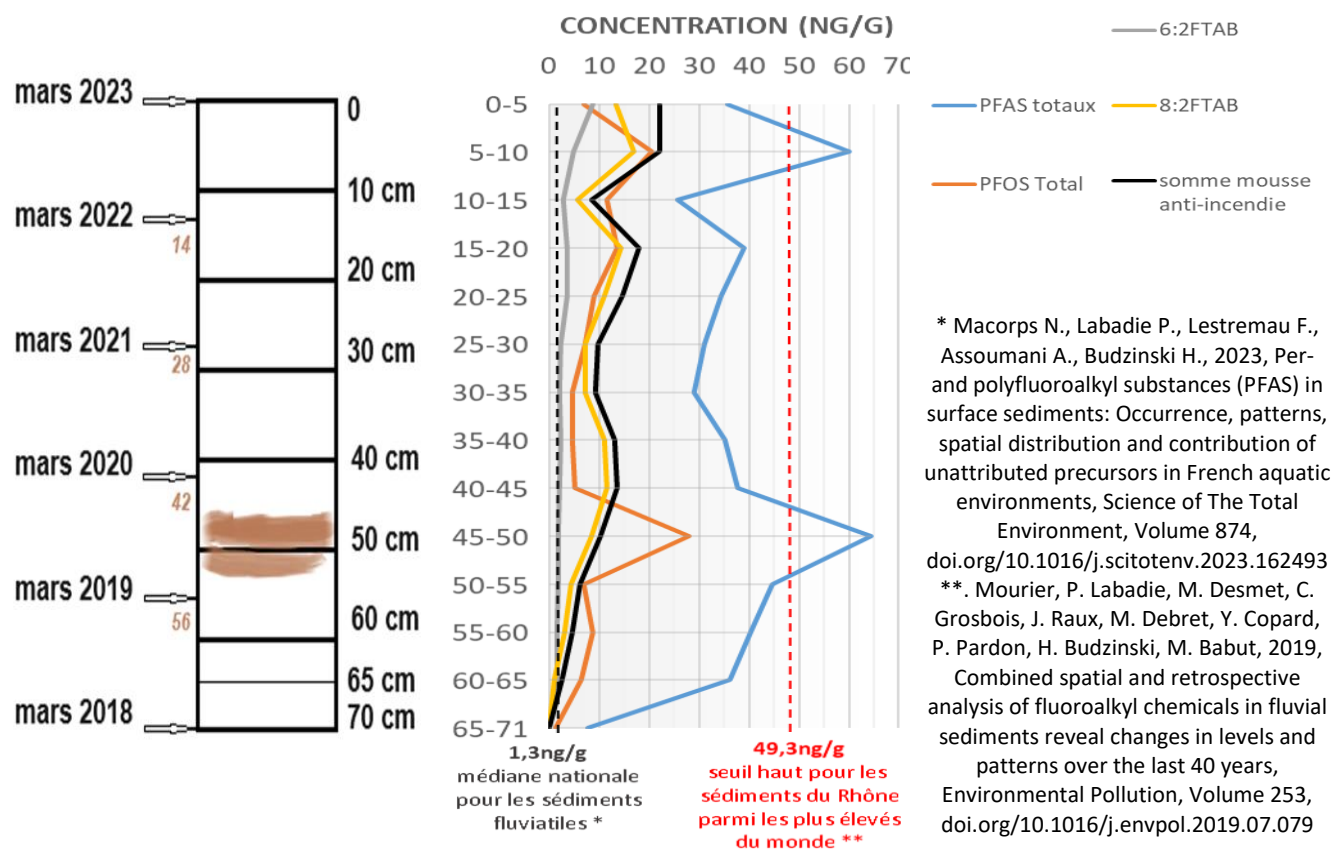


Figure 53 : Niveaux de contamination en PFAS de la carotte sédimentaire de la Darse aux bois

iii. Résultat des analyses ciblées : polluants métalliques dans les sédiments

Analyse multi-éléments dans les sédiments

Quasiment tous les éléments inorganiques mesurés, qu'ils soient des majeurs ou des éléments traces, suivent la même tendance, à l'exception du calcium et du manganèse. Ils sont prépondérants dans les sections 40-50 et 50-60 cm de profondeur, qui correspondent a priori aux sections qui ont enregistré les retombées de l'incendie de Lubrizol. En dessous de 60 cm de profondeur, ces sections ont été accumulées dans la darse avant l'accident et les teneurs en éléments traces sont significativement inférieures. Au-dessus de 40 cm de profondeur, les sédiments accumulés après l'accident sont moins riches en éléments inorganiques, et cela diminue lorsqu'on s'approche des sédiments de surface. Toutefois, ils sont encore impactés à proximité de la date de l'accident, car les retombées de l'incendie, déposées sur les surfaces, ont continué à être lessivées par les épisodes de pluies et donc à être récoltées dans les sédiments de la darse aux Bois, même après l'accident.

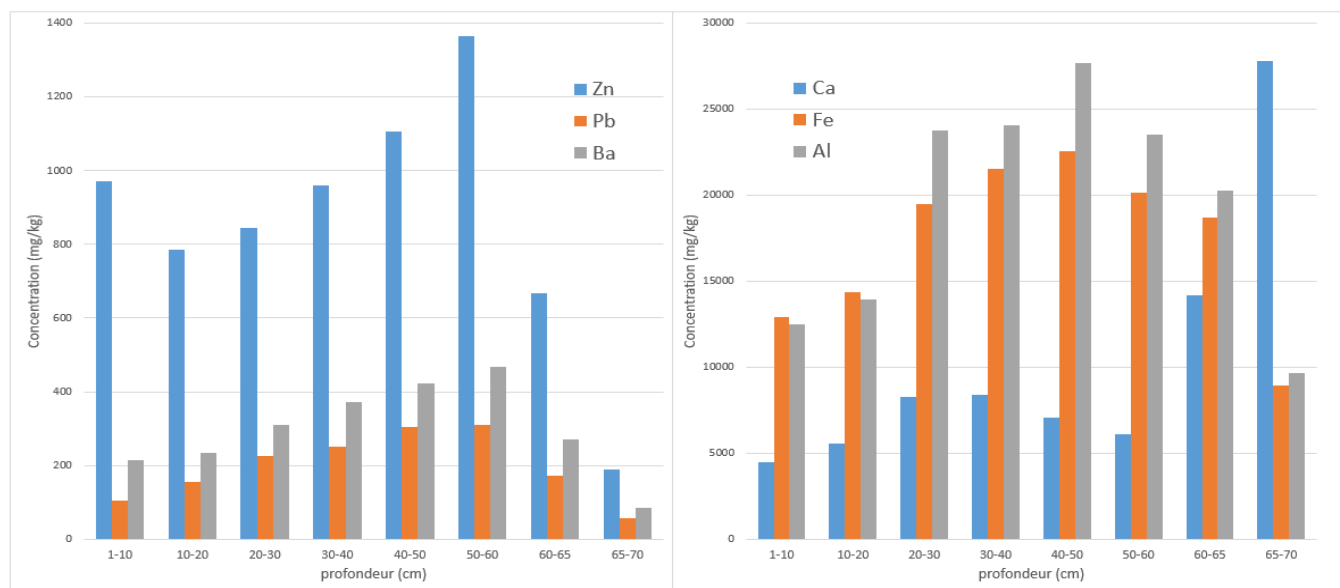


Figure 54 : Teneurs en certains éléments traces (à gauche) ou majeurs (à droite) en fonction de la profondeur des sections de la carotte sédimentaire de la darse aux bois

Tout comme les HAP ou PCB, certains éléments traces dans les sédiments susceptibles d'être dragués, sont soumis à la réglementation GEODE du 9 août 2006. Le Tableau 17 montre les niveaux réglementaires (S1) pour certains métaux présents dans des sédiments fluviaux pouvant être dragués (ce qui est le cas des sédiments de la darse aux Bois qui ont été dragués pour la dernière fois en 2018). Au-dessus du niveau S1, on rappelle que les sédiments sont considérés comme pollués et peuvent impacter négativement l'écosystème aquatique s'ils sont remobilisés (notamment lors des opérations de curage/dragage).

Tableau 17 : Niveaux S1 de la réglementation GEODE du 9 août 2006 pour les éléments traces dans les sédiments fluviaux susceptibles d'être dragués

	Niveau S1 (mg/kg)		Niveau S1 (mg/kg)
As	30	Hg	1
Cd	2	Ni	50
Cr	150	Pb	100
Cu	100	Zn	300

Des éléments traces comme As, Cr ou Ni ne dépassent pas les niveaux S1 dans les différentes sections de la carotte. En revanche, le Cd et le Cu dépassent d'un facteur 2 leur niveau S1 dans la section 50-60 cm la plus impactée, le Pb est multiplié par 3 par rapport à son niveau S1 et **le Zinc multiplié par 4,7**. Les fractions de sédiments directement impactées par l'incendie peuvent donc être considérées comme toxiques, mais c'est aussi le cas pour les sections supérieures qui ont reçu des effluents de lessivage des surfaces après l'accident.

Comme cela a été montré dans les analyses de l'échantillon ASL issu du lessivage des surfaces, des composés stockés sur le site Lubrizol contenant du Zinc ont été détectés dans cet effluent liquide. **Il est donc plus que probable que le déversement des effluents liquides dans la darse aux Bois lors de l'incendie ait conduit à un stockage du Zinc dans les sections 40-50 et 50-60 cm de profondeur.**

Composition isotopique de certains métaux ciblés dans les sédiments

Pour les sédiments de la carotte prélevée dans la darse au Bois, on constate que les sections qui ont reçu les effluents de Lubrizol (i.e. les sections entre 40-50 et 50-60 cm) contiennent les teneurs les plus élevées en Pb (entre 233 et 248 mg/kg) et Zn (entre 1057 et 1284 mg/kg) comparées aux autres sections (116 mg/kg en moyenne pour Pb et 708 mg/kg en moyenne pour Zn). La section entre 40-50 cm est aussi la plus chargée en lithium (26 mg/kg) comparée aux autres sections (18 mg/kg en moyenne).

Les sédiments de la carotte de la darse au Bois ont des compositions isotopiques assez variables d'un niveau à l'autre. On remarquera que les sections de sédiment les plus éloignées de la composition isotopique du Li sur les suies sont les sections les plus profondes antérieures à l'accident (65-70 cm) et les plus proches de la surface, les plus récentes (10-20 cm). Toutefois, les sections relativement éloignées de l'accident (notamment la section 20-30 cm) sont encore marquées par une composante pouvant provenir de l'accident, probablement du fait du lessivage des surfaces à proximité de l'usine Lubrizol, qui continue à entraîner et déverser des effluents vers la darse aux Bois.

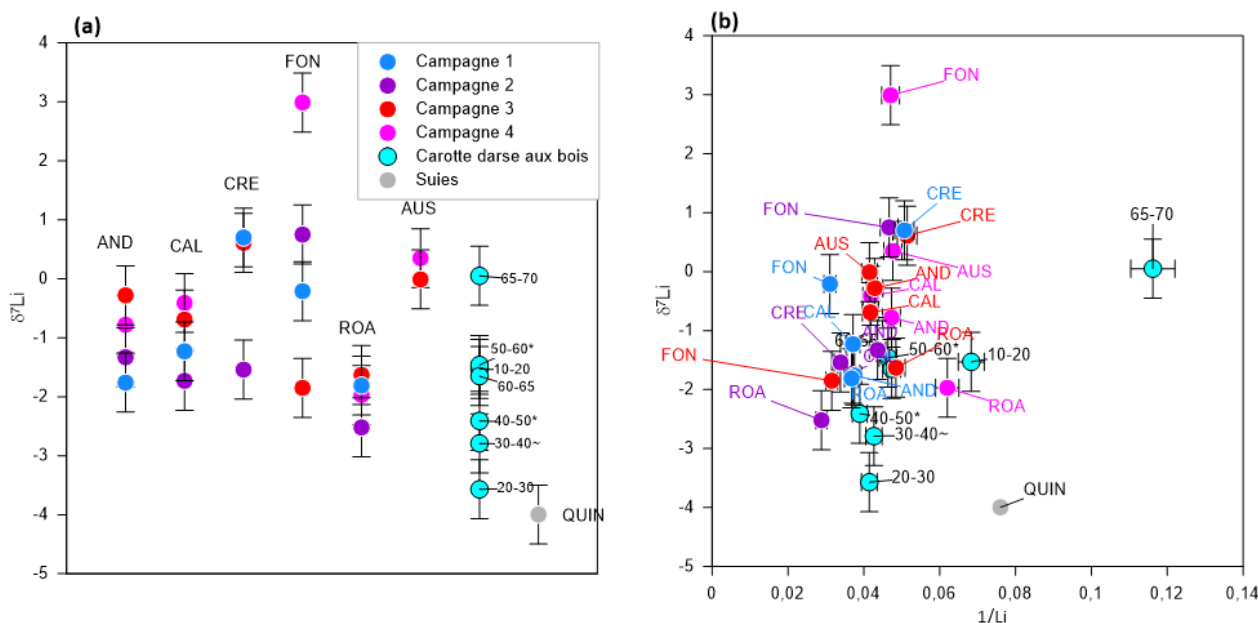


Figure 55 : Représentation graphique (a) des compositions isotopiques en Li, et (b) des compositions isotopiques en Li en fonction de l'inverse de la teneur en Li pour les échantillons de sédiments (et des MES des 5 rivières étudiées)

5. Liste des marqueurs de l'incendie imprégnant l'environnement après l'accident

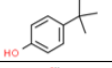
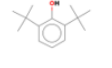
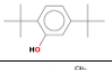
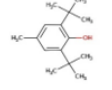
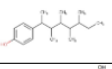
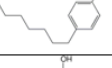
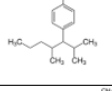
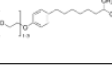

Cette partie du rapport présente une liste de **molécules organiques spécifiques qui sont considérées comme des marqueurs de l'incendie ne pouvant provenir de celui-ci** et :

- qui ont été identifiées dans les fractions gazeuses émises le jour de l'accident avec une probabilité très élevée qu'elles proviennent de l'incendie ; ou qui ont été identifiées sur des dépôts solides (suies) et des lixiviats (ASL) issus de ruissellements des surfaces peu après l'incendie et qui correspondent à des produits ou des dérivés transformés de produits présents dans les stocks de Lubrizol. On notera que ces échantillons prélevés le jour ou peu après l'incendie sont des **échantillons primaires**.
- qui ont également été identifiées dans les fractions gazeuses et particulaires lors de simulations de feux en enceinte de laboratoire d'huiles additivées contenant certaines molécules identiques à celles répertoriées dans les stocks Lubrizol ;
- qui ont également été retrouvées plusieurs mois après l'accident, disséminées dans l'environnement, dans un périmètre exposé au nuage de fumées, dans les eaux, les matières en suspension véhiculées dans les cours d'eau de surface ou souterraines, dans des sols ou encore des sédiments à proximité du site Lubrizol. On notera que ces échantillons prélevés plusieurs mois ou années après l'incendie sont des **échantillons secondaires**.

Le Tableau 18 suivant présente la liste de ces molécules. Rappelons que les niveaux d'identification avec la confiance la plus élevée correspondent aux niveaux 1 et 2, et que dans ce tableau sont également répertoriées les molécules présentes dans les stocks de Lubrizol.

On notera que dans le rapport ont été mentionnées de nombreuses autres molécules détectées dans les échantillons primaires ou secondaires, qui pourraient correspondre à des produits de dégradation/transformation de substances présentes sur le site de Lubrizol le jour de l'accident. En effet, les conditions extrêmes de combustion, de même que les conditions environnementales (hydrolyse, oxydation...) ont contribué à transformer certaines molécules, ce qui rend difficile de les lier directement à l'accident.

Tableau 18 : Liste des 30 molécules marqueurs identifiées, spécifiquement liées à l'incendie Lubrizol, retrouvées dans les effluents gazeux, liquides et solides peu après l'accident (échantillons primaires), retrouvées dans les échantillons gazeux ou particuliers lors de la simulation de feu en laboratoire, et retrouvées dans l'environnement plusieurs mois après l'accident (échantillons secondaires)

Molécule marqueur	Structure	m/z	Niveau confiance	Provenance	Air (gaz)	Dépôts solides et lixiviats		Rejeu du feu	eaux		sols	Sédiments
						suies	ASL		Phase dissoute	MES		
4-tbutyl phénol C10H14O		150.10392	2	1 référence Lubrizol FTICR GC-orbitrap				x	x (2)		x (4)	x (2)
Phénol, 2,6-bis(1,1-diméthylethyl) C14H22O		206.16652	2	références Lubrizol GC-Orbitrap FTICR		x (2)	x (4)	x	x (2)			x (2)
Phénol, 2,5-bis(1,1-diméthylethyl) C14H22O		206.16652	2	GC-Orbitrap FTICR			x		x (2)			
2,6-di-tbutyl-p-cresol (Hydroxytoluène bulylated C15H24O		220.182168	3-4	5 références Lubrizol FTICR LC-Orbitrap				x (4)	x (3)	x (4)	x (4)	
Phénol, dodécyl-branché C18H30O			4	124 produits Lubrizol FTICR							x (4)	
Phénolheptyl derivatives C13H20O		192.15142	4	1 référence Lubrizol FTICR LC-Orbitrap					x (4)		x (4)	
Nonylphénol et dérivés (dont 4-(1,1,3,3-tétraméthylbutyl)phénol C15H24O		206.16652	2-4	Fiches Lubrizol FTICR GC-Orbitrap			x		x (4)	x (4)	x (4)	x (2)
Nonylphénol branché ethoxylated			4	Fiches Lubrizol FTICR GC-orbitrap						x (4)		x (4)
1-Phényl-1-decanol C16H26O			4	GC-orbitrap FTICR			x (4)			x (4)		

PARTIE III : RESULTATS
 Chapitre E : imprégnation environnementale suite à l'incendie

Molécule marqueur	Structure	m/z	Niveau confiance	Provenance	Air (gaz)	Dépôts solides et lixiviats		Rejeu du feu	eaux		sols	Sédiments
						suies	ASL		Phase dissoute	MES		
Benzothiazole 2-phenyl C13H9NS		211.0447	2	références Lubrizol GC-Orbitrap FTICR	x (2)	x (4)		x (2)	x (3)	x (3)		x (4)
di-tButyldisulfide C8H18S2			1	9 références Lubrizol FTICR GC-Orbitrap	x (1)			x	x (4)			
2-acetyl thiophene C6H6OS			1	GC-Orbitrap	x (1)			x				
2-propionylthiophene C7H8OS			1	GC-Orbitrap	x (1)			x				
2-2'bithiophene C8H6S2			1	GC-Orbitrap	x (1)			x				
3-3' bithiophene C8H6S2			1	GC-Orbitrap	x (1)			x				
2,4-dimethylthiophene (ou 2-ethylthiophene) C6H8S		112.03412	3	GC-Orbitrap	x (3)							x (3)
Trisulfide, bis(1,1-dimethylethyl) C8H18S3		210.0565	3	GC-Orbitrap	x (4)	x (4)						x (3)
Thieno[3,2-b]thiophene C6H4S2			1	GC-Orbitrap	x (1)			x				
2-butylthiophène C8H12S		140,0652	2	GC-Orbitrap	x (2)	x		x				
3,4-diéthylthiophène C8H12S		140,0654	3	GC-Orbitrap	x	x		x				

Molécule marqueur	Structure	m/z	Niveau confiance	Provenance	Air (gaz)	Dépôts solides et lixiviats		Rejeu du feu	eaux		sols	Sédiments
						suies	ASL		Phase dissoute	MES		
Diphenylamine C12H11N		169.088578	2	34 références Lubrizol GC-orbitrap FTICR		x		x	x (2)			x (2)
Pyrazine C4H4N2			1	GC-Orbitrap	x							
Trioxane C3H6O3			1	GC-Orbitrap	x							
Benzoic acid 4-ethoxy-ethyl ester C11H14O3		194.09375	2	références Lubrizol GC-Orbitrap FTICR	x (2)	x (4)			x (2)			
Dithiophosphate de zinc (ZDTP) et dérivés C14H32O4P2S4Zn			4	références Lubrizol FTICR			x (4)					
O,O,O-triphenyl phosphorothioate C18H15O3PS		342,0475	4	34 références Lubrizol FTICR		x	x(4)			x (4)		
N, N'-Methylene-Bis-Morpholine C9H18N2O2		186.13683	1-4	1 référence Lubrizol FTICR LC-Orbitrap GC-Orbitrap		x (1)			x (4)	x (4)	x (4)	
Morpholides C20H39NO2 ou C22H43NO2		325.2972	4	FTICR GC-orbitrap		x (4)					x (4)	
Morpholine dérivatives dont C11H17NO2		195.1251	4	Références Lubrizol GC-orbitrap FTICR		x (4)				x (4)		
4- ou 5-methylbenzotriazole C7H7N3		134.07127	2	10 références Lubrizol LC-orbitrap				x	x (2)			

Bien qu'un très grand nombre d'autres molécules organiques aient pu être identifiées avec un niveau de confiance plus ou moins élevé dans les effluents gazeux, liquides et solides peu après l'accident, ou retrouvées dans

l'environnement plusieurs mois après l'accident, elles n'ont pas été recensées dans ce tableau car nous n'avons pas estimé qu'elles étaient uniquement liées à l'accident de Lubrizol. En effet, un certain nombre de molécules sont aussi liées à une imprégnation de l'environnement liée aux activités industrielles nombreuses près de la zone d'étude (produits issus de processus de combustion, comme les hydrocarbures aromatiques monocycliques, les HAP et leurs dérivés, produits issus de l'industrie pétrochimique, automobile, pharmaceutique, agroalimentaire, agents tensioactifs, métaux traces...) mais aussi liée à l'activité humaine dans une zone urbaine dense (substances émises par les moteurs thermiques ou le chauffage urbain, tels les HAP et certains de leurs dérivés, produits issus de la dégradation de matériaux plastiques ou métalliques, détergents, acides gras...) ou dans des zones rurales exposées à l'agriculture intensive (pesticides, éléments traces issus de l'érosion accélérée...).

Par conséquent, **les molécules organiques recensées dans ce Tableau 18 sont considérées comme des marqueurs spécifiques de l'incendie, qui ont été disséminées dans l'environnement, et dont une majorité peuvent être considérées comme persistantes car toujours présentes dans l'environnement plusieurs années après l'accident.**

Par ailleurs, certains éléments inorganiques peuvent être suspectés d'avoir été disséminés dans l'environnement suite à l'incendie Lubrizol (lors de la combustion des produits entreposés ou des matériaux des bâtiments/revêtements...), mais l'un d'eux semble **plus particulièrement être un marqueur de l'incendie : il s'agit du Zinc**, bien que cet élément continue à être relargué de manière chronique dans l'environnement.

F. Toxicité des marqueurs de l'incendie

1. Toxicologie des produits marqueurs de l'incendie

Cette partie concerne les résultats d'une analyse bibliographique des propriétés toxicologiques des 32 molécules organiques et du zinc identifiées comme marqueurs de l'incendie. Pour réaliser cette analyse, un recensement des classifications existantes par les instances nationales ou internationales a été mise en œuvre grâce. Ces classifications concernent les effets cancérigènes (CIRC³⁴ ; CLP³⁵), mutagènes (CLP), reprotoxiques (CLP), toxiques pour les expositions aiguës et répétées (CLP), sensibilisants, irritants, corrosifs (CLP), les effets perturbateurs endocriniens (PE) (DEDuCT³⁶ ; liste Anses 2021³⁷), toxiques pour l'environnement (CLP). Les sites de l'INERIS³⁸ et de l'INRS³⁹ ont également été consultés pour compléter avec des données de valeurs toxicologiques de référence quand elles existent (informations additionnelles dans le tableau). À noter que sur le site de l'ECHA, et conformément à la réglementation REACH, la richesse des informations disponibles dépend du tonnage de substance importée ou fabriquée en Europe. Les différentes informations recueillies sont répertoriées dans le Tableau 19, dans lequel chaque molécule est identifiée par son nom, formule brute et n° CAS. Parmi les 30 molécules listées, les 17 ayant les niveaux de confiance les plus élevés sont indiquées en jaune (niveaux de confiance 1 ou 2). Ces 17 molécules, les molécules apparentées (soit 24 molécules au total) et le zinc sont détaillés à la suite du tableau, reprenant les classifications et complétés le cas échéant par une recherche sur Pubmed et Google Scholar.

Beaucoup de molécules identifiées sont classées irritantes cutanées et/ou oculaires, voire respiratoires, ce qui est en accord avec les signes cliniques observés sur la population pendant et après l'incendie (toux, gêne respiratoire, irritation, irritation, mal de gorge, nausées, vomissements)⁴⁰. Parmi ces molécules, on peut citer les dérivés alkylphénols, le benzothiazole-2-phényl, le di-tbutyldisulfide, certains thiophènes, la pyrazine, l'acide benzoïque 4-ethoxy-ethylether, la morpholine et dérivés, le 4-méthylbenzotriazole, le trioxane. Certaines molécules possèdent par ailleurs des effets narcotiques pouvant entraîner somnolence et vertiges, signes également retrouvés dans la population en phase aiguë¹³. Parmi ces molécules on peut citer le di-tbutyldisulfide et la diphenylamine.

Peu de molécules sont classées cancérigènes ou mutagènes. On peut citer de nouveau la diphenylamine, cancérigène possible et la N, N'-méthylène-bis-morpholine, classée mutagène et cancérigène 1B dans le règlement CLP. Plusieurs molécules présentent des propriétés de perturbateurs endocriniens et/ou reprotoxiques. On peut citer le 4-tbutylphénol et molécules apparentées, le 2,6-di-tbutyl-p-crésol, le trioxane, le O,O,O-triphenylphosphorothioate.

En terme de dangers pour l'environnement, plusieurs molécules sont classées toxiques, voire très toxiques pour les organismes aquatiques tels que le 4-tbutylphénol et molécules apparentées, le 2,6-di-tbutyl-p-crésol, la diphenylamine, le di-tbutylsulfide, le trisulfide bis(1,1-diméthyléthyl), le O,O,O-triphenyl phosphorothioate.

À noter que cette description est limitée par le manque de données toxicologiques, en particulier pour les molécules qui ne rentrent pas dans le cadre des exigences réglementaires.

³⁴ <https://monographs.iarc.who.int/list-of-classifications>

³⁵ <https://echa.europa.eu/fr/search-for-chemicals>

³⁶ <https://cb.imsc.res.in/deduct/>

³⁷ <https://www.anses.fr/fr/system/files/REACH2019SA0179Anx-1.pdf>

³⁸ <https://substances.ineris.fr/>

³⁹ <https://www.inrs.fr/publications/bdd/vlep.html>

⁴⁰ <https://www.santepubliquefrance.fr/regions/normandie/documents/enquetes-etudes/2024/incendie-industriel-de-rouen-de-septembre-2019.-presentation-du-dispositif-d-etudes-sante-post-incendie-76-et-premiers-resultats>

Tableau 19 : Liste des marqueurs de l'incendie et classification des dangers

Substances (CAS)	Classification des dangers [classification CLP; Libellé (code; catégorie de danger)]		Effets PE (DEDuCT)	Classification CIRC	Informations additionnelles
	dangers pour la santé	dangers pour l'environnement			
4-tbutyl phénol C10H14O (98-54-4)	Provoque une irritation cutanée (H315; cat. 2); Provoque de graves lésions des yeux (H318; cat. 1); Susceptible de nuire à la fertilité (H361f; cat. 2)	Très toxique pour les organismes aquatiques, provoque des effets néfastes à long terme (H410; cat.1)	Preuves d'effets PE in vivo chez le rongeur et in vitro sur des cellules humaines (DEDuCT cat. II)	nd	
Phenol, 4-(1,1,3,3-tetramethylbutyl) C14H22O (27193-28-8)	Nocif par contact cutané (H312; Toxicité aiguë (par voie cutanée), cat. 4); Provoque une irritation cutanée (H315; cat. 2); Provoque de graves lésions des yeux (H318; cat. 1);	Données manquantes	nd	nd	
Phenol, 2,6-bis(1,1-diméthylethyl) (= 2,6-di-tert-butyl phenol) C14H22O (128-39-2)	Provoque une irritation cutanée (H315; Corrosion/irritation cutanée, cat. 2);	Très toxique pour les organismes aquatiques, provoque des effets néfastes à long terme (H410; Dangers pour le milieu aquatique – Danger chronique, cat. 1); Très toxique pour les organismes aquatiques (H400; Dangers pour le milieu aquatique – Danger aigu, cat. 1)	nd	nd	
Phenol, 2,5-bis(1,1-diméthylethyl) C14H22O (5875-45-6)	Provoque une irritation cutanée (H315; Corrosion/irritation cutanée, cat. 2); Provoque une sévère irritation des yeux (H319; Lésions oculaires graves/irritation oculaire, cat. 2); Peut irriter les voies respiratoires (H335; Toxicité spécifique pour certains organes cibles – Exposition unique, cat. 3 : Irritation des voies respiratoires)	Peut être nocif à long terme pour les organismes aquatiques (H413; Dangers pour le milieu aquatique – Danger chronique, cat. 4)	nd	nd	

PARTIE III : RESULTATS
Chapitre F : toxicité des marqueurs de l'incendie

Substances (CAS)	Classification des dangers [classification CLP; Libellé (code; catégorie de danger)]		Effets PE (DEDuCT)	Classification CIRC	Informations additionnelles
	dangers pour la santé	dangers pour l'environnement			
2,6-di- <i>t</i> butyl- <i>p</i> -cresol (Hydroxytoluène butylated C15H24O (128-37-0))	non classée (classe de danger non applicable)	Très toxique pour les organismes aquatiques, provoque des effets néfastes à long terme (H410; cat.1); Très toxique pour les organismes aquatiques (H400; cat. 1)	Preuves d'effets PE uniquement <i>in vitro</i> sur des cellules humaines (DEDuCT cat. IV); inclus comme substances prioritaires pour évaluation (Anses)	3	possède une VLEP à seuil par inhalation (10 mg/m ³) pour les professionnels (INRS)
Diphenylamine C12H11N (122-39-4)	Toxique en cas d'ingestion (H301; Toxicité aiguë (par voie orale), cat. 3); Toxique par contact cutané (H311; Toxicité aiguë (par voie cutanée), cat. 3); Toxique par inhalation (H331, Toxicité aiguë (par inhalation), cat. 3); Risque présumé d'effets graves pour les organes (H373; Toxicité spécifique pour certains organes cibles – Exposition répétée, cat. 2); Provoque une sévère irritation des yeux (H319; Lésions oculaires graves/irritation oculaire, cat. 2); Susceptible de provoquer le cancer (H351; Cancérogénicité, cat. 2)	Très toxique pour les organismes aquatiques, provoque des effets néfastes à long terme (H410; Dangers pour le milieu aquatique – Danger chronique, catégorie 1) + danger aigu (H400; Dangers pour le milieu aquatique – Danger aigu, catégorie 1)	nd	2B	Possède une VLEP à seuil par inhalation (10 mg/m ³) pour les professionnels (INRS); Substance inscrite dans les Tableaux des maladies professionnelles: Tableaux RG 15 et RG15 bis Valeur Anses (pop générale; vo; à seuil): ADI (acceptable daily intake) 75 µg.kg-1.j-1 Anses 2016 EFSA (2012)
Benzothiazole 2-phenyl C13H9NS (883-93-2)	H319 (100%): provoque une sévère irritation oculaire (Lésions oculaires graves/irritation oculaire, cat. 2)	Données manquantes	nd	nd	
di- <i>t</i> Butyldisulfide C8H18S2 (110-06-5)	Peut être mortel en cas d'ingestion et de pénétration dans les voies respiratoires (H304; Danger par aspiration, cat 1); cause une irritation oculaire/grave (H320/319; Lésions oculaires graves/irritation oculaire cat 2B/2A); Peut provoquer somnolence ou vertiges (H336; Toxicité spécifique pour certains organes cibles – Exposition unique, cat 3 : Effets narcotiques);	Toxique pour les organismes aquatiques, entraîne des effets néfastes à long terme (H411; Dangers pour le milieu aquatique – Danger chronique, cat 2)	nd	nd	

PARTIE III : RESULTATS
Chapitre F : toxicité des marqueurs de l'incendie

Substances (CAS)	Classification des dangers [classification CLP; Libellé (code; catégorie de danger)]		Effets PE (DEDUCT)	Classification CIRC	Informations additionnelles
	dangers pour la santé	dangers pour l'environnement			
2-acetyl thiophene (Methyl 2-thienyl ketone) C6H6OS (88-15-3)	Nocif en cas d'ingestion (H302; Toxicité aiguë (par voie orale), cat 4); Toxique par contact cutané (H311; Toxicité aiguë (par voie cutanée), cat 3; Nocif par contact cutané (H312; Toxicité aiguë (par voie cutanée, cat 4); Nocif par inhalation (H332; Toxicité aiguë (par inhalation), cat 4)	Données manquantes ou non concluantes	nd	nd	
2-propionylthiophene C7H8OS (13679-75-9)	Nocif en cas d'ingestion (H302; Toxicité aiguë (par voie orale), cat 4); Nocif par contact cutané (H312; Toxicité aiguë (par voie cutanée, cat 4); Nocif par inhalation (H332; Toxicité aiguë (par inhalation), cat 4)	données manquantes	nd	nd	
2-2'bithiophene C8H6S2 (492-97-7)	Provoque une irritation cutanée (H315; Corrosion/irritation cutanée, cat. 2); cause une irritation oculaire grave (H319; irritation oculaire cat 2A); Peut irriter les voies respiratoires (H335; Toxicité spécifique pour certains organes cibles – Exposition unique, cat 3 : Irritation des voies respiratoires)	données manquantes	nd	nd	
3-3' bithiophene C8H6S2 (3172-56-3)	pas d'infos (site ECHA; INERIS; DEDUCT; CIRC)		nd	nd	
2,4-dimethylthiophene C6H8S (638-00-6)	Comme 2-2'bithiophene + Nocif par inhalation (H332; Toxicité aiguë (par inhalation), cat. 4)	données manquantes	nd	nd	
Trisulfide, bis(1,1-diméthylethyl) C8H18S3 (4253-90-1)	Provoque une sévère irritation des yeux (H319; Lésions oculaires graves/irritation oculaire, cat. 2); Peut provoquer une allergie cutanée (H317; Sensibilisation cutanée, cat. 1)	Très toxique pour les organismes aquatiques, entraîne des effets néfastes à long terme (H410; Dangers pour le milieu aquatique – Danger chronique, cat. 1); Très toxique pour les organismes aquatiques (H400; Dangers pour le milieu aquatique – Danger aigu, cat. 1)	nd	nd	

PARTIE III : RESULTATS
Chapitre F : toxicité des marqueurs de l'incendie

Substances (CAS)	Classification des dangers [classification CLP; Libellé (code; catégorie de danger)]		Effets PE (DEDuCT)	Classification CIRC	Informations additionnelles
	dangers pour la santé	dangers pour l'environnement			
Pyrazine C4H4N2 (290-37-9)	Provoque une sévère irritation des yeux (H319; Lésions oculaires graves/irritation oculaire, cat. 2); Peut irriter les voies respiratoires (H335; Toxicité spécifique pour certains organes cibles – Exposition unique, cat 3 : Irritation des voies respiratoires); Provoque une irritation cutanée (H315; Corrosion/irritation cutanée, cat. 2);	données manquantes	nd	nd	
Trioxane C3H6O3 (110-88-3)	Peut irriter les voies respiratoires (H335; Toxicité spécifique pour certains organes cibles – Exposition unique, cat. 3 : Irritation des voies respiratoires); Susceptible de nuire à la fertilité ou au fœtus (H361; Toxicité pour la reproduction, cat. 2)	données concluantes pour la toxicologie aiguë (pas d'effets) et manquante pour l'exposition chronique	nd	nd	
Benzoic acid 4-ethoxy- ethyl ester C11H14O3 (23676-09-7)	Nocif en cas d'ingestion (H302; Toxicité aiguë (par voie orale), cat. 4); Provoque une irritation cutanée (H315; Corrosion/irritation cutanée, cat. 2); Provoque une sévère irritation des yeux (H319; Lésions oculaires graves/irritation oculaire, cat. 2)	données manquantes ou non concluantes	nd	nd	
O,O,O-triphenyl phosphorothioate C18H15O3PS (597-82-0)	Susceptible de nuire à la fertilité ou au fœtus (H361; Toxicité pour la reproduction, cat. 2)	Très toxique pour les organismes aquatiques, entraîne des effets néfastes à long terme (H410; Dangers pour le milieu aquatique – Danger chronique, cat. 1); en cours d'évaluation comme substance PBT	nd	nd	

PARTIE III : RESULTATS
Chapitre F : toxicité des marqueurs de l'incendie

Substances (CAS)	Classification des dangers [classification CLP; Libellé (code; catégorie de danger)]		Effets PE (DEDUCT)	Classification CIRC	Informations additionnelles
	dangers pour la santé	dangers pour l'environnement			
N, N'-Méthylène-Bis-Morpholine C9H18N2O2 (5625-90-1)	Nocif en cas d'ingestion (H302; Toxicité aiguë (par voie orale), cat 4); Provoque des brûlures de la peau et des lésions oculaires graves (H314; Corrosion /irritation cutanée, cat. 1C; H318; Lésions oculaires graves/irritation oculaire, cat. 1); Nocif par inhalation (H332; Toxicité aiguë (par inhalation), cat. 4); Peut provoquer une allergie cutanée (H317; Sensibilisation cutanée, cat. 1); Susceptible d'induire des anomalies génétiques (H341; Mutagénicité sur les cellules germinales, cat. 2); Peut provoquer le cancer (H350; Cancérogénicité, cat. 1B); Risque présumé d'effets graves pour les organes (H373; Toxicité spécifique pour le tractus gastro-intestinal et respiratoire – Exposition répétée; cat. 2)	données manquantes	nd	nd	
Morpholides C20H39NO2	pas d'infos (site ECHA; INERIS; DEDUCT; CIRC)		nd	nd	
Morpholines derivatives (110-91-8 (morpholine))	Nocif en cas d'ingestion (H302; Toxicité aiguë (par voie orale), cat 4); Provoque des brûlures de la peau et des lésions oculaires graves (H314; Corrosion /irritation cutanée, cat. 1C); Nocif par contact cutané (H312; Toxicité aiguë (par voie cutanée), cat. 4); Nocif par inhalation (H332; Toxicité aiguë (par inhalation), cat. 4)	data conclusive but not sufficient for classification	nd	3	Possède une VLEP à seuil par inhalation (10 mg/m3) pour les professionnels (INRS); Les principaux effets aigus décrits avec la morpholine sont des effets irritants de la peau, des muqueuses nasales et oculaires et des voies respiratoires. Les effets de l'exposition chronique à la morpholine sont peu documentés ;
4-Méthylbenzotriazole C7H7N3 (29878-31-7)	Nocif en cas d'ingestion (H302; Toxicité aiguë (par voie orale), cat. 4); Provoque une sévère irritation des yeux (H319; Lésions oculaires graves/irritation oculaire, cat. 2); Nocif par inhalation (H332; Toxicité aiguë (par inhalation), cat. 4)	Nocif pour les organismes aquatiques, entraîne des effets néfastes à long terme (H412; Dangers pour le milieu aquatique – Danger chronique, cat. 3)	nd	nd	
1-Phenyl-1-decanol C16H26O (21078-95-5)	pas d'infos (site ECHA; INERIS; DEDUCT; CIRC)		nd	nd	

PARTIE III : RESULTATS
Chapitre F : toxicité des marqueurs de l'incendie

Substances (CAS)	Classification des dangers [classification CLP; Libellé (code; catégorie de danger)]		Effets PE (DEDuCT)	Classification CIRC	Informations additionnelles
	dangers pour la santé	dangers pour l'environnement			
Phenol, dodecyl-, branched C18H30O (121158-58-5)	Provoque des brûlures de la peau et des lésions oculaires graves (H314; Corrosion /irritation cutanée, cat. 1C); Provoque des lésions oculaires graves (H318; Lésions oculaires graves/irritation oculaire, cat. 1; Peut nuire à la fertilité ou au fœtus (H360F; Toxicité pour la reproduction, cat. 1B)	Très toxique pour les organismes aquatiques, entraîne des effets néfastes à long terme (H410; Dangers pour le milieu aquatique – Danger chronique, cat. 1); Très toxique pour les organismes aquatiques (H400; Dangers pour le milieu aquatique – Danger aigu, cat. 1)	nd	nd	inclue dans la liste des substances extrêmement préoccupantes candidates en vue d'une autorisation (REACH) compte tenu de ses effets PE suspectés pour l'environnement et l'homme et pour son effet sur la reproduction
Phenolheptyl derivatives C13H20O (72624-02-3)	Nocif en cas d'ingestion (H302; Toxicité aiguë (par voie orale), cat. 4); Provoque des brûlures de la peau et des lésions oculaires graves (H314; Corrosion /irritation cutanée, cat. 1C); Peut provoquer une allergie cutanée (H317; Sensibilisation cutanée, cat. 1); Provoque des lésions oculaires graves (H318; Lésions oculaires graves/irritation oculaire, cat. 1)	Très toxique pour les organismes aquatiques, entraîne des effets néfastes à long terme (H410; Dangers pour le milieu aquatique – Danger chronique, catégorie 1); Très toxique pour les organismes aquatiques (H400; Dangers pour le milieu aquatique – Danger aigu, cat. 1)	nd	nd	inclue dans la liste des substances extrêmement préoccupantes candidates en vue d'une autorisation (REACH) compte tenu de ses effets PE suspectés pour l'environnement
Nonylphenol derivatives C15H24O (25154-52-3)	Nocif en cas d'ingestion (H302; Toxicité aiguë (par voie orale), cat. 4); Provoque des brûlures de la peau et des lésions oculaires graves (H314; Corrosion /irritation cutanée, cat. 1C); Susceptible de nuire à la fertilité ou au fœtus (H361fd; Toxicité pour la reproduction, cat. 2)	Très toxique pour les organismes aquatiques, entraîne des effets néfastes à long terme (H410; Dangers pour le milieu aquatique – Danger chronique, cat. 1); Très toxique pour les organismes aquatiques (H400; Dangers pour le milieu aquatique – Danger aigu, cat. 1)	nd	nd	inclue dans la liste des substances extrêmement préoccupantes candidates en vue d'une autorisation (REACH) compte tenu de ses effets PE suspectés pour l'environnement; possède une VTR par voie orale (Anses)
Nonylphenol branched ethoxylated (127087-87-0)	Provoque une irritation cutanée (H315; Corrosion/irritation cutanée, cat. 2); Provoque des lésions oculaires graves (H318; Lésions oculaires graves/irritation oculaire, cat. 1)	Toxique pour les organismes aquatiques, entraîne des effets néfastes à long terme (H411; Dangers pour le milieu aquatique – Danger chronique, cat. 2)	nd	nd	inclue dans la liste des substances extrêmement préoccupantes candidates en vue d'une autorisation (REACH) compte tenu de ses effets PE suspectés pour l'environnement ; Substances présentes dans la liste des restrictions (annexe XVII) et autorisations pour certains usages (annexe XIV) dans le cadre de REACH.

PARTIE III : RESULTATS
Chapitre F : toxicité des marqueurs de l'incendie

Substances (CAS)	Classification des dangers [classification CLP; Libellé (code; catégorie de danger)]		Effets PE (DEDUCT)	Classification CIRC	Informations additionnelles
	dangers pour la santé	dangers pour l'environnement			
Thieno[3,2,b]thiophène C6H4S2 (251-41-2)	Nocif en cas d'ingestion (H302; Toxicité aiguë (par voie orale), cat. 4); Provoque une irritation cutanée (H315; Corrosion/irritation cutanée, cat. 2); Provoque une sévère irritation des yeux (H319; Lésions oculaires graves/irritation oculaire, cat. 2)	données manquantes	nd	nd	
2-butylthiophène C8H12S (1455-20-5)	Nocif en cas d'ingestion (H302; Toxicité aiguë (par voie orale), cat. 4);	données manquantes	nd	nd	
3,4-diéthylthiophène C8H12S (35686-14-7)	pas d'infos (site ECHA; INERIS; DEDUCT; CIRC)		nd	nd	
Dithiophosphate de zinc (ZDTP) et dérivés C14H32O4P2S4Zn	pas d'infos (site ECHA; INERIS; DEDUCT; CIRC)		nd	nd	
Zinc Zn (7440-66-6)	non classée (données manquantes ou non applicables pour classification)	Très toxique pour les organismes aquatiques, entraîne des effets néfastes à long terme (H410; Dangers pour le milieu aquatique – Danger chronique, cat. 1); Très toxique pour les organismes aquatiques (H400; Dangers pour le milieu aquatique – Danger aigu, cat. 1)	nd	nd	

2. Evaluation *in vitro* de la toxicité des aérosols et des particules générées lors d'un incendie impliquant des huiles minérales et lubrifiants pour moteurs

Comme illustré dans le chapitre précédent, les dangers que représentent les molécules identifiées dans l'environnement sont très souvent peu documentés. Indépendamment de leur masse, ces PM peuvent également se caractériser par une composition chimique variable qui peut induire des effets sanitaires. Les effets sur la santé peuvent se manifester durant l'incendie mais une fois la phase aiguë terminée, des questions persistent parmi la population exposée sur les conséquences potentielles à long terme.

Les études de toxicité contrôlées utilisant des paramètres biologiques pertinents sont complémentaires de l'analyse chimique pour évaluer les dangers des mélanges environnementaux complexes. En ce qui concerne les nouvelles méthodes d'approche pour les essais de toxicité par inhalation, les études *in vitro* deviennent de plus en plus pertinentes pour étudier la toxicité des polluants produits pendant les incendies, ce qui permet d'étudier les mécanismes toxiques sous-jacents qui peuvent conduire à des pathologies. C'est pourquoi, au cours de ce projet, il a été développé une approche innovante d'évaluation de la toxicité par inhalation des aérosols formés (gaz et PM) ou des PM (sans la phase gazeuse) émises lors d'un incendie en enceinte confinée (cf méthodologie générale). Ce travail expérimental est structuré en trois volets :

1. Evaluation de la toxicité des aérosols générés lors d'un incendie en enceinte confinée après exposition à l'interface air-liquide de cellules bronchiques en culture ;
2. Evaluation de la toxicité sur des cellules épithéliales bronchiques des PM collectées lors de l'incendie en enceinte confinée ;
3. Evaluation de la virulence bactérienne après exposition aux PM collectées lors de l'incendie en enceinte confinée.

i. Evaluation de la toxicité des aérosols d'incendie après une exposition à l'interface air-liquide de cellules bronchiques en culture

Les particules déposées à l'issue des feux expérimentaux sont restées en contact avec les cellules durant 3 heures ou 24 heures afin d'évaluer la réponse biologique. Nous avons ainsi mesuré les taux d'ATP intracellulaires par insert (Figure 56) et observé une diminution de près de 50% de ce marqueur après expositions aux aérosols provenant de la combustion de l'huile minérale spécifiquement. Cette diminution est essentiellement liée à une perte de la viabilité cellulaire puisque le ratio ATP/ADP n'a pas permis de mettre en évidence de façon statistiquement différente, des effets au niveau de l'énergétique cellulaire (Figure 56).

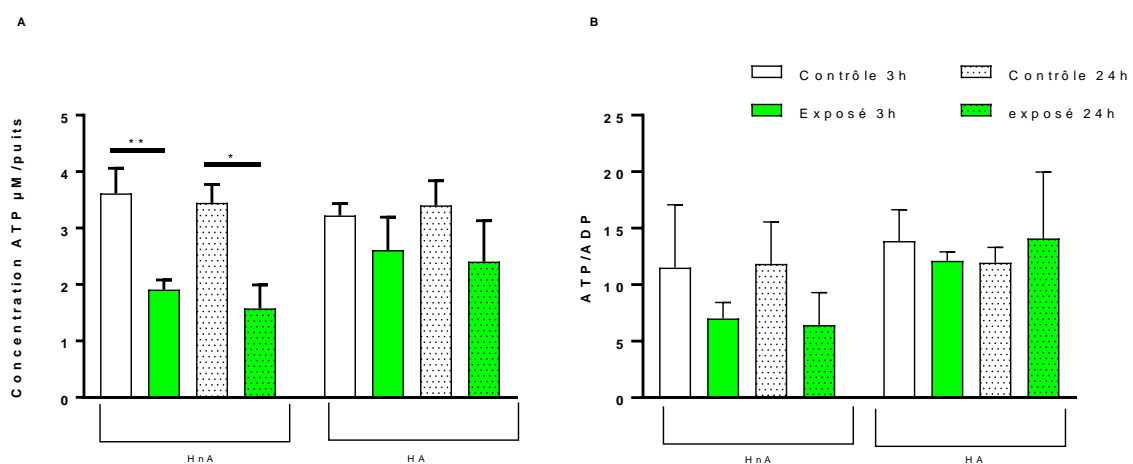


Figure 56 : Concentrations en ATP (μM) par insert (A) et ratio ATP/ADP (B) mesurés après 3h et 24h d'exposition aux PM. Les valeurs sont exprimées en moyenne +/- écart-type de 4 expérimentations indépendantes, * $p < 0.05$; ** $p < 0,01$

Afin de mettre en évidence l'influence de l'exposition aux aérosols sur la morphologie cellulaire, une analyse en microscopie électronique a été réalisée et les résultats présentés dans la figure suivante (Figure 57).

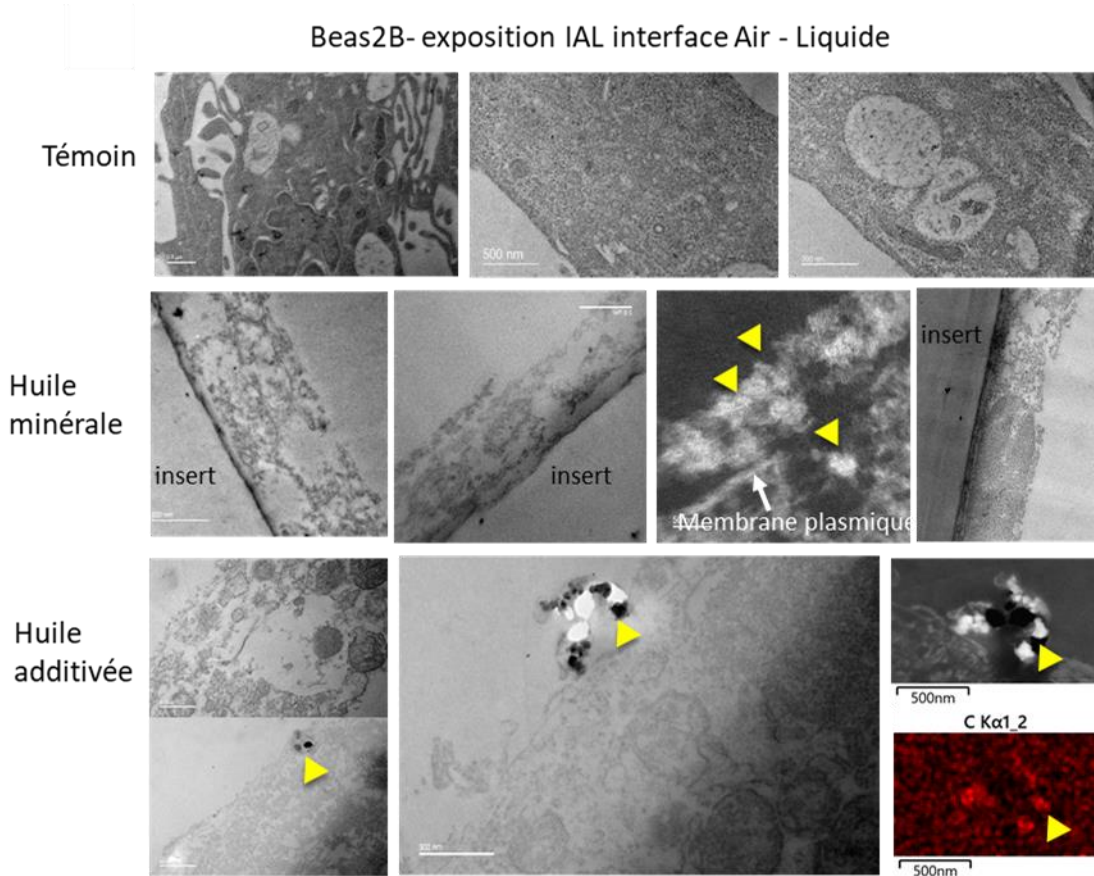


Figure 57 : Impact de l'exposition à l'interface Air-liquide de cellules BEAS 2B aux aérosols issus de la combustion de l'huile minérale et de l'huile additivée. Les têtes de flèches jaunes indiquent la présence et accumulation des particules. Micrographie rouge : Cartographie élémentaire du carbone montrant la présence de particules de combustion à proximité de la cellule

L'observation des cellules exposées à l'air (Témoin) a permis de vérifier la préservation de leur intégrité avec la présence de protrusions cytoplasmiques, des membranes plasmiques et intracellulaires préservées, un noyau présentant une chromatine définie, et des organites intracellulaires également préservés (golgi, réticulum endoplasmique, mitochondries). Par contre, les cellules exposées à l'interface air-liquide montrent une forte dégradation de leur structure comparée aux cellules témoin. Les cellules exposées aux aérosols issus de combustion de l'huile minérale, révèlent une totale désorganisation cellulaire avec absence de la membrane plasmique, désorganisation des compartiments intra-cellulaires présence de cytoplasme lacuneux traduisant une lyse cellulaire. Pour l'huile additivée, l'effet semble similaire à un moindre degré ; les mitochondries sont encore visibles, ainsi que la membrane plasmique. Ces observations sont en accord avec les résultats de viabilité cellulaire présentés précédemment (Figure 56)

Concernant l'étude par RT-qPCR, nous nous sommes intéressés à l'expression des gènes impliqués dans le métabolisme de biotransformation et de la réponse antioxydante (Figure 58).

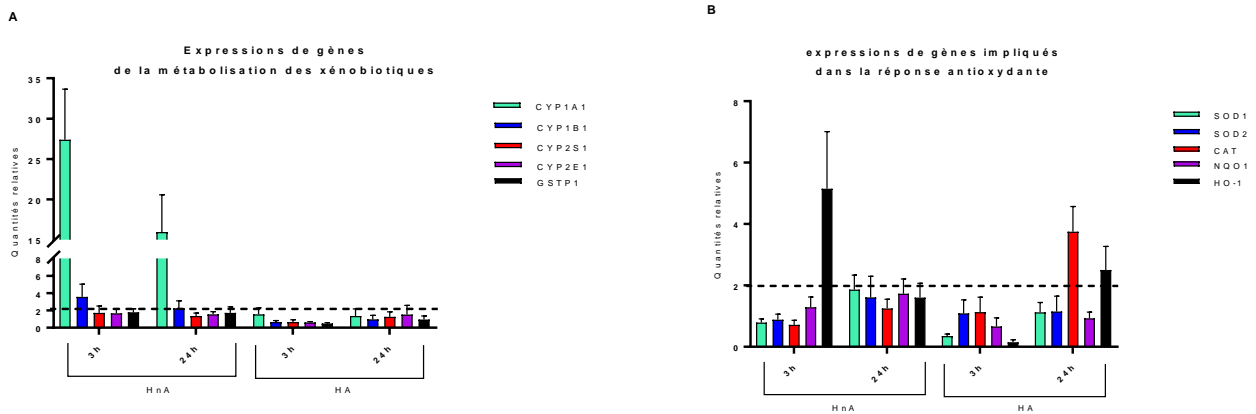


Figure 58 : Expression de gènes impliqués dans le métabolisme de biotransformation (A) et dans la réponse antioxydante (B) après exposition de cellules Beas-2B 3h ou 24h aux particules obtenues des conditions « Huile minérale » et « huile additivée ». Les résultats sont exprimés en moyenne \pm écart-type de 4 conditions expérimentales indépendantes et mesurées en duplicat

La condition « huile minérale » a induit de façon plus marquée l'expression de *CYP1A1* après 3h et 24h d'incubation, et dans une moindre mesure, de *CYP1B1* après 3h (Figure 58A). Ces inductions peuvent être responsables d'une augmentation de la synthèse des protéines correspondantes et de la métabolisation des HAP en métabolites réactifs, dont certains sont connus pour être cancérigènes⁴¹. Concernant l'étude des gènes impliqués dans la réponse au stress oxydant, seule l'expression de HO-1 après 3h d'exposition dans la condition « huile minérale » a été observée (Figure 58B). Après 24h, seules les expressions de la catalase, et dans une moindre mesure de HO-1, ont été observées dans la condition « huile additivée ». La surexpression transcriptionnelle de HO-1, et par conséquent de la synthèse *de novo* de la protéine correspondante, peut survenir dans plusieurs situations, par exemple en réponse à un stress pro-inflammatoire et/ou à la présence d'un stress oxydant puisque cette enzyme est une protéine inductible en réponse à un stress cellulaire⁴². De nombreux agents qui induisent HO-1 sont associés au stress oxydant en ce sens qu'ils (i) favorisent directement ou indirectement la génération intracellulaire d'espèces réactives de l'oxygène (ERO), (ii) appartiennent à une classe de composés antioxydants électrophiles comme des substances polyphénoliques, ou (iii) forment des complexes avec du glutathion réduit intracellulaire et d'autres thiols. La catalase quant à elle est une enzyme antioxydante capable de dégrader le peroxyde d'hydrogène.

Afin de vérifier la réponse inflammatoire, nous avons ensuite évalué l'expression des gènes de cytokines MCP-1, IL6 et IL8 (Figure 59A), ainsi que les protéines correspondantes sécrétées dans le milieu basal par la méthode ELISA (Figure 59D).

⁴¹ <https://doi.org/10.1093/toxsci/kfv040>.

⁴² <https://doi.org/10.1165/ajrcmb.15.1.8679227>

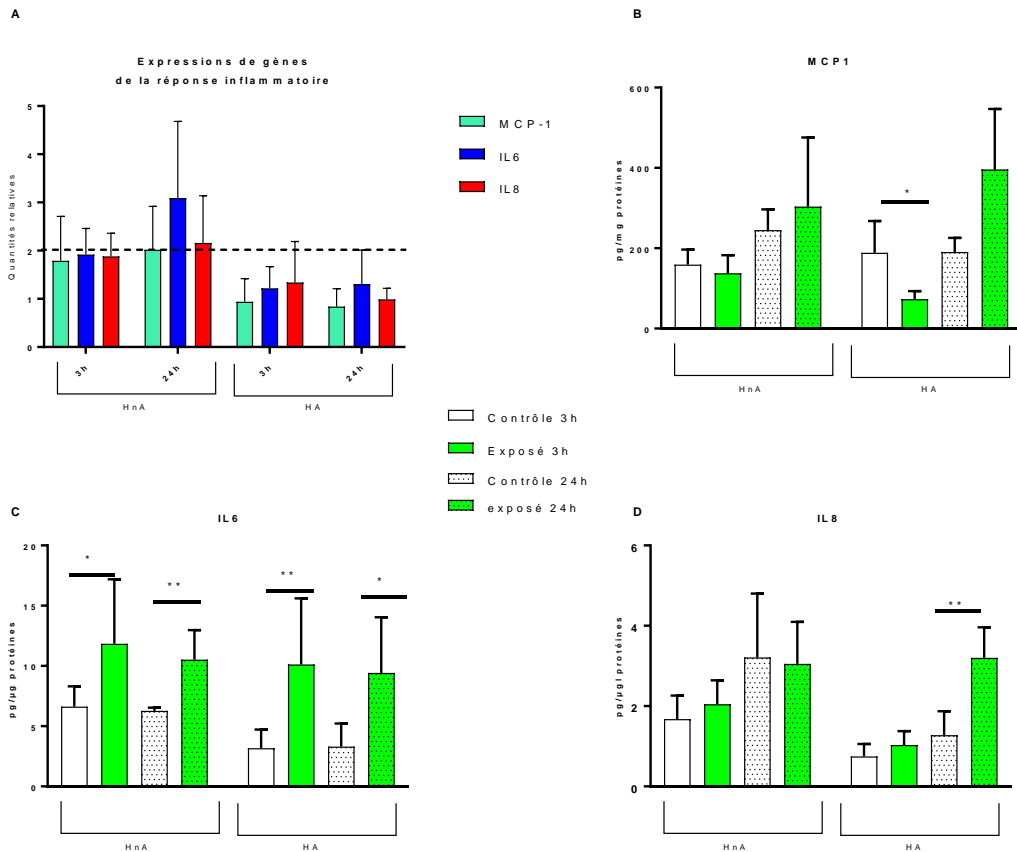


Figure 59 : Étude de la réponse inflammatoire après exposition de cellules Beas-2B 3h ou 24h aux particules obtenues des conditions « Huile minérale » et « huile additivée ». (A) Expression d'IL6, d'IL8 et de MCP-1 mesurées par RT-qPCR, (B) Taux de MCP-1 sécrété (C) Taux d'IL6 et (D) taux d'IL8. Les résultats sont exprimés en moyenne \pm écart-type de 4 conditions expérimentales indépendantes mesurées en duplicat

Les expressions géniques de l'IL6 et de l'IL8 ont été multipliées par 3 et 2, respectivement, à 24 heures après l'exposition dans la condition « huile minérale », tandis qu'aucun changement n'a été observé dans la condition « huile additivée » (Figure 8A). L'expression de la MCP-1 n'a pas été modifiée, alors qu'une réduction de sa sécrétion a été observée après une exposition de trois heures dans la condition « huile additivée » (Figure 8B). Des augmentations significatives des niveaux de sécrétion d'IL6 ont également été mesurées quelles que soient les conditions testées (Fig. 8C). Pour IL8, alors qu'aucune induction de l'expression n'avait été mesurée, on peut noter toutefois une augmentation de la sécrétion de ce marqueur après 24 heures d'exposition à la condition huile additivée (Fig. 8D).

Les cellules épithéliales bronchiques sont équipées de nombreux récepteurs de surface capables de reconnaître des agents pathogènes, des allergènes, des polluants et de déclencher l'activation intracellulaire de voies pro-inflammatoires. L'expression de gènes pro-inflammatoires est une des étapes initiales de la mise en place d'une inflammation, suivie de la synthèse des protéines correspondantes. Les profils observés ici mettent bien en évidence l'induction d'une réponse inflammatoire objectivée par des modifications de sécrétions d'IL6, d'IL8 et de MCP-1, présentant des profils cinétiques différents ce qui indique des voies de régulation mises en jeu différentes entre les conditions testées.

Conclusion

Dans ce travail, nous avons comparé, pour des conditions de combustion équivalente, la toxicité *in vitro* par inhalation de deux mélanges d'huiles, un mélange constitué d'huiles minérales légère et lourde sans additifs (Condition huiles non additivées, « HnA ») et un mélange de lubrifiant automobile et d'additifs anti-usure

(Condition huiles additivées « HA »). L'analyse microphysique a permis de mettre en évidence des particules de suie de très petites tailles, de l'ordre de quelques dizaines de nanomètres, permettant leur pénétration jusque dans les voies respiratoires distales. Les paramètres biologiques mesurés après exposition de cellules épithéliales bronchiques ont mis en évidence une réponse inflammatoire, une légère augmentation de la réponse antioxydante ainsi qu'une expression marquée de gènes impliqués dans le métabolisme de biotransformation des hydrocarbures, en particulier en ce qui concerne la condition « HnA ».

ii. Evaluation de la toxicité des PM collectées lors de l'incendie en enceinte confinée

Nous avons ensuite évalué la toxicité de la fraction particulaire seule (PM). Pour cela, nous avons prélevé des particules sur des filtres en sortie de chambre et réalisés des expositions à ces PM de différents modèles biologiques, afin de mettre en évidence spécifiquement la toxicité respiratoire des PM, leur génotoxicité éventuelle ainsi que leur impact sur la virulence bactérienne.

Potentiel oxydant

Les deux lots de particules ont un faible PO puisqu'elles n'ont induit l'épuisement du DTT et de l'AA qu'aux plus fortes concentrations. Toutefois, les PM provenant de la combustion d'huile non additivée présentent un PO^{AA} plus important que celui mesuré avec les PM provenant de l'huile additivée pour les concentrations de 50 et 100 µg/mL. Le DTT a été déplété de manière dose-dépendante par les deux lots de particules avec une déplétion d'environ 50% à la plus forte concentration.

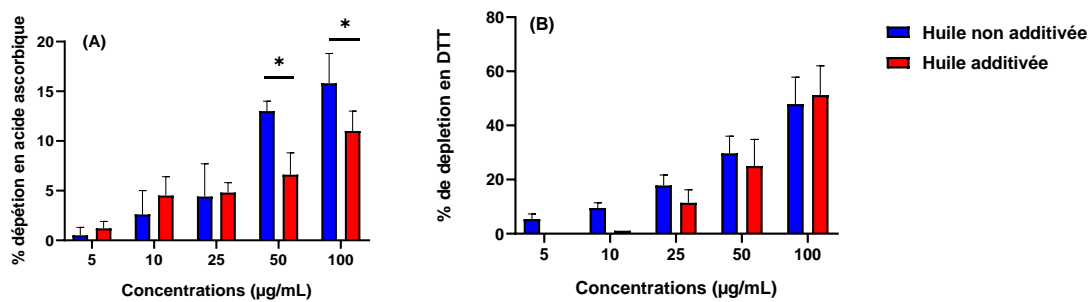


Figure 60 : Pourcentage de déplétion en acide ascorbique (A) ou en dithiothréitol (DTT ; B) par les PM provenant de la combustion d'huile minérale ou d'huile additivée. Les valeurs sont exprimées en moyenne ± écart-type de 4 expérimentations indépendantes, *p<0.05; **p<0,01

Le potentiel oxydant permet de prédire, dans une certaine mesure, l'apparition d'un stress oxydatif cellulaire, qui est un mécanisme de toxicité cellulaire ubiquiste pouvant participer au développement ou à l'aggravation de pathologies. Il s'agit d'un indicateur intéressant dans le domaine de la qualité de l'air puisque la réglementation actuelle ne prend en compte que la quantité des particules atmosphériques selon leur taille sans prise en compte de leur diversité chimique qui peut conditionner les effets sanitaires. Les résultats obtenus ici indiquent que les particules testées sont peu pro-oxydantes puisque seules les concentrations les plus fortes ont permis d'obtenir une déplétion.

Réponse inflammatoire

La réponse inflammatoire des cellules (IL-6, IL-8 et MCP-1) après exposition aux particules issues de la combustion d'huile non additivée et additivée a également été évaluée (Figure 61). Premièrement, une diminution significative de l'interleukine 8 a été mesurée dans le surnageant des cellules BEAS-2B exposées à 5 µg/mL pendant 24h et 20 µg/mL pendant 3h et 24h. Deuxièmement, le niveau de sécrétion de MCP-1 a également été modifié avec une augmentation de la chemokine induite par l'huile non additivée pour 2 conditions (1,25 µg/mL et 5 µg/mL après 3h et 24h d'exposition respectivement) et une diminution après une exposition de 24h à 20 µg/mL de PM huile additivée.

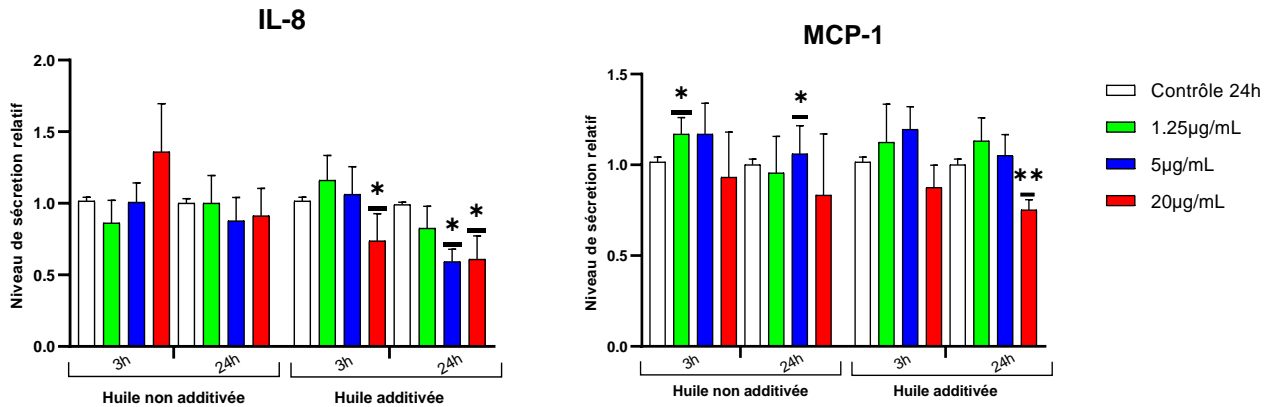


Figure 61 : Taux d'IL-8 et de MCP-1 après exposition de cellules Beas-2B 3h ou 24h aux particules obtenues des conditions « Huile non additivée » et « Huile additivée ». Les résultats sont exprimés en moyenne \pm écart-type de 4 conditions expérimentales indépendantes mesurées en duplicat

Mutagenicité

Les particules obtenues par brulage d'huiles minérales véhiculent donc des composés capables d'induire des mutations. Les profils de mutagenicité indiquent qu'il s'agit de composés de type HAPs et de leurs dérivés nitrés, ce qui est en cohérence avec le mode de formation de ces particules. L'additivation renforce la mutagenicité des composés formés par combustion.

Mesures du potentiel génotoxique

L'exposition aux deux types de particules induit des modifications significatives du pourcentage de noyaux dans les trois premières catégories : il y a une augmentation significative du pourcentage de noyaux endommagés dans les catégories 2 et 3 au détriment des noyaux les moins endommagés (catégorie 1) dont le pourcentage diminue significativement (Figures 20a et 20b). Un effet-dose significatif est également observé, mais uniquement pour les particules HnA (Figure 20b). D'autre part, les effets génotoxiques semblent ici encore renforcés avec les particules HA comparées aux particules HnA.

Conclusion

Dans cette seconde partie expérimentale, nous nous sommes intéressées à l'évaluation de la toxicité de la fraction particulaire solide, les suies. L'étude réalisée sur des cellules bronchiques humaines a permis de mettre en évidence l'absence de cytotoxicité de ces particules qui par ailleurs n'ont pas induit de modification de la fonction mitochondriale. Comme dans la première partie, nous avons pu constater une induction très marquée d'un gène impliqué dans le métabolisme des hydrocarbures. La quasi-absence de réponse cellulaire antioxydante est probablement due au fait que ces particules possèdent un faible potentiel oxydant intrinsèque. Les cytokines proinflammatoires ne sont que faiblement modulées, avec parfois des niveaux diminués par rapport aux témoins. L'état redox montre une augmentation de la réduction du glutathion. Dans les deux cas, une étude complémentaire permettrait de comprendre les mécanismes sous-jacents.

L'absence de cytotoxicité a été confirmée en utilisant un second modèle cellulaire, des cellules alvéolaires humaines adaptées à l'étude de génotoxicité. Ces dernières ont permis de montrer que les particules générées par combustion des huiles sont susceptibles de provoquer des dommages à l'ADN comme en atteste l'induction significative de la phosphorylation de l'histone H2AX, mais aussi des effets mutationnels sur un modèle bactérien. Le profil des réponses laisse supposer l'implication de composés de la famille des HAPs et de leurs dérivés nitrés. L'additivation de l'huile majore la génotoxicité des molécules véhiculées par ces particules. Ces propriétés génotoxiques et mutagènes questionnent sur l'impact éventuel sur le long terme de l'inhalation de ces particules.

iii. Evaluation de la virulence bactérienne après exposition aux PM collectées lors de l'incendie en enceinte confinée

L'objectif des travaux vise à rechercher les effets des suies HA et HnA sur une modulation de la physiologie de ces deux modèles bactériens, notamment en termes de virulence et formation de biofilm.

Effet des suies HA et HnA sur la croissance de *P. aeruginosa* H103 et *P. fluorescens* MFAF76a.

Comme représenté sur la Figure 62, aucune différence significative de croissance n'a été observée pour la souche *P. aeruginosa* H103 (Figure 62A) ou *P. fluorescens* MFAF76a (Figure 62B), quelle que soit la concentration de suies ajoutées, qu'elles soient additivées (HA) ou non (HnA). Cette donnée est confortée par les calculs de temps de génération (Figure 63), suggérant que les suies testées n'impactent pas la croissance des 2 bactéries de cette étude.

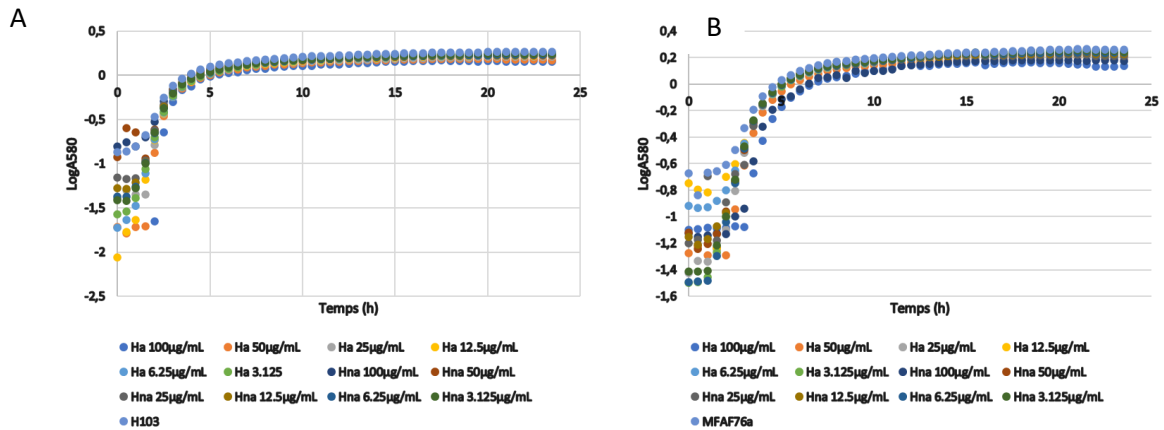


Figure 62 : Cinétique de croissance des deux souches bactériennes modèles en présence ou non des suies issues d'huiles additivées (HA) et non additivées (HnA). (A) *P. aeruginosa* H103. (B) *P. fluorescens* MFAF76a

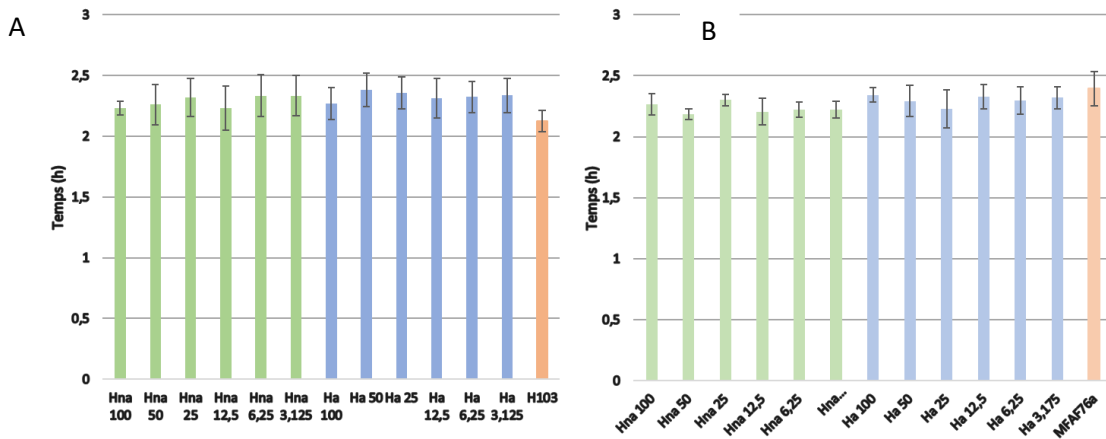


Figure 63 : Temps de génération des deux souches bactériennes modèles en présence ou non des suies issues d'huiles (HA) ou non (HnA). (A) *P. aeruginosa* H103. (B) *P. fluorescens* MFAF76a

Effet des suies HA et HnA sur les biofilms bactériens

Le biofilm constitue le mode de vie principal des bactéries. Un biofilm est une communauté polymicrobienne formée par des bactéries, des archées, des champignons, et des virus. Ces êtres vivants sont enchâssés dans une matrice, formée principalement par des polysaccharides, de l'ADN extracellulaire, des protéines, qui les protège des agressions extérieures (dessiccation, température, pression, biocides...). Dans le cas de bactéries pathogènes, le biofilm est couramment associé à une infection de type chronique. En effet, lorsque les conditions nutritionnelles ou respiratoires se dégradent, certaines bactéries se détachent du biofilm pour aller développer leur biofilm sur une autre surface, dont les conditions seront plus adéquates. Il est donc important, dans le cadre de cette étude d'évaluer à la fois l'effet des suies HnA et HA sur la capacité à former un biofilm, et sur un potentiel effet dispersif. L'ensemble de ces données montre que les suies, qu'elles soient additivées ou non, peuvent exercer un effet

modulateur sur la formation du biofilm, qui dépend à la fois de la souche étudiée et des concentrations utilisées. Ces résultats suggèrent que les suies pourraient s'adsorber à la surface de bactéries, impactant leur capacité à former un biofilm. L'importance de cette adsorption sera fonction des propriétés de surface intrinsèque à chaque souche.

Effet des suies HA et HnA sur la production de facteurs de virulence

Un autre aspect de la virulence des bactéries peut être évalué au travers de leur production de facteurs de virulence. L'ensemble de ces données montre que les suies, selon leur polarité et/ou leur grossièreté, pourraient affecter la production de facteurs de virulence, suggérant un impact sur la physiologie de certaines bactéries.

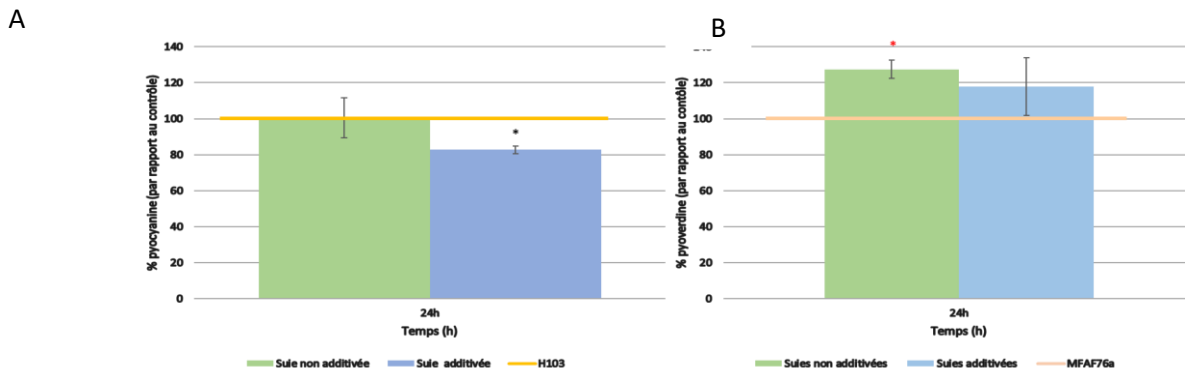


Figure 64 : Production de facteurs de virulence par *P. aeruginosa* H103 (A ; pyocyanine) et *P. fluorescens* MFAF76a (B, pyoverdine) en présence de 100µg/mL de suies additivées ou non après 24h de culture. Trois réplicats biologiques ont été réalisés. Les étoiles noires représentent une diminution significative de la formation du biofilm. Les étoiles rouges représentent une augmentation significative de la formation du biofilm. La barre représente la production de facteurs de virulence par les 2 souches modèles en absence de suies. * 0.05<p, *** 0.001<p

Conclusion

Cette étude a permis d'évaluer les effets des suies additivées HA et non additivées HnA sur deux modèles bactériens : *P. aeruginosa* H103, pathogène opportuniste majeur de l'homme, responsable d'infections aiguës et d'infections chroniques particulièrement sous la forme biofilm, et *P. fluorescens* MFAF76a, souche environnementale, isolée dans le port de Rouen. L'ensemble des essais microbiologiques réalisés tendent à montrer que les suies HnA et HA n'ont pas d'effet sur la croissance des bactéries modèles étudiées, suggérant qu'elles n'impactent pas profondément la physiologie des bactéries. On observe un effet variable de ces suies sur la capacité des bactéries à former un biofilm, et à le disperser. Les suies HA en particulier limitent la formation du biofilm de *P. aeruginosa*, alors qu'elles augmentent la capacité de *P. fluorescens* à former ce biofilm. Ces effets pourraient être indirects puisqu'ils pourraient potentiellement être plutôt liés à l'additif, à la granularité ou à la polarité des suies HA et HnA, plutôt qu'à un mécanisme général de réponse moléculaire liée à la perception d'un stress par ces bactéries. L'effet sur la dispersion par contre est très limité. Un léger effet a été observé sur la production de pyoverdine par *P. fluorescens* MFAF76a. La pyoverdine est considérée comme étant un facteur de virulence. Cependant son rôle premier chez une souche environnementale est de rechercher dans cet environnement du fer, un élément crucial à la survie de tout être vivant. Il est possible que la présence de suies gêne la capture du fer par ces bactéries, ou séquestre le fer du milieu de culture, ce qui pourrait se traduire par une telle augmentation. Cependant, cette variation, significative dans le cas de suies issues d'huiles HnA reste très limitée. Chez *P. aeruginosa*, on observe une légère diminution de la production de pyocyanine dans le cas de suies HA, d'environ 20%, ce qui pourrait se traduire par une diminution de sa virulence en aigu. Enfin, une même tendance semble se dessiner pour les 2 souches modèles en termes de viabilité cellulaire, les suies HA et HnA pouvant en effet augmenter le taux de cellules altérées ou mortes.

Dans l'ensemble, nos résultats montrent un faible effet des suies HA ou HnA, dans nos conditions d'essais, effets qui pourraient plus être liés aux suies elles-mêmes et à leurs effets physicochimiques voire mécaniques sur les bactéries, plutôt qu'à une modification profonde de la physiologie des bactéries.

IV. PERSPECTIVES

A. La culture du risque au sein de la Métropole Rouen Normandie

1. Enquête sur la connaissance du signal d'alerte et des consignes de sécurité

Réalisée en 2018 sur l'agglomération rouennaise, cette enquête portait sur la connaissance du signal national d'alerte et des consignes telles que décrites dans les documents officiels ainsi que sur les comportements réflexes possibles des populations en cas d'alerte. Elle s'intéressait aux résidents de la zone du Plan Particulier d'Intervention (PPI) et aux personnes la fréquentant occasionnellement (touristes) ou régulièrement (navetteurs). Un questionnaire complémentaire destiné aux responsables des ERP (équipements recevant du publics) privés et publics a permis un éclairage particulier sur la faisabilité de la mise à l'abri des populations.

i. Les chiffres

- Moins de 20% des enquêtés font le lien entre le signal d'alerte et les consignes, connaissent le sens de l'un (sirène) et les modalités de l'autre (se mettre à l'abri, écouter la radio ...).
- 24 % connaissent le signal d'alerte (sirène) mais n'y associent pas de comportement.
- 46% ne connaissent ni l'un ni l'autre.
- 60% des responsables d'ERP ou de sécurité ne laisseraient pas entrer les personnes situées à l'extérieur dans leurs établissements en cas d'alerte.

ii. Les enseignements saillants

➤ Les résultats de cette enquête mettent en évidence l'absence de réflexes normés tels que prescrits par les autorités alors que, dans les exercices de crise, le scénario le plus souvent joué est celui de populations qui se comportent selon les procédures transmises lors des campagnes d'information.

➤ Cette enquête constate une variété de comportements déclarés au moment du déclenchement d'une alerte. Ainsi, au-delà de la simple connaissance des consignes, leur mise en pratique reste un défi. Elles sont parfois mal comprises ou pas adaptées.

➤ Alors que la conduite à tenir est principalement la mise à l'abri dans le bâtiment le plus proche, cette consigne n'est pas réaliste en milieu urbain non équipé en abri refuge. Dans ce contexte, l'accueil dans les ERP (publics et privés) est un enjeu qui n'est aujourd'hui pas identifié.

iii. Une illustration

Parmi les premiers réflexes déclarés suite au déclenchement du signal d'alerte, les comportements majoritaires sont l'indifférence et le questionnement. La protection des populations n'est pas le premier réflexe suite au déclenchement du signal d'alerte (la sirène en 2018, avant l'arrivée du Cell Broad Cast et FR-Alert)

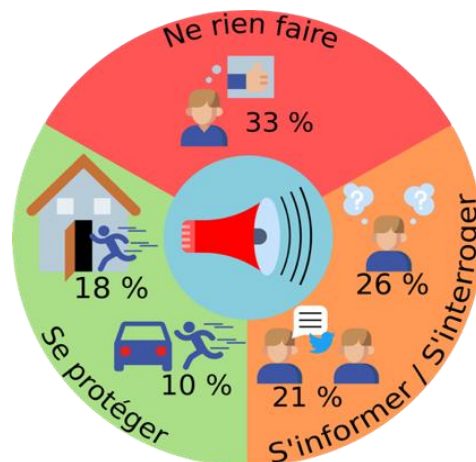


Figure 65: Les premiers réflexes déclarés par la population suite au déclenchement du signal d'alerte

2. Tactiques et outils de la gestion de crise

i. Structuration des messages d'information et d'alerte

Contexte

- En 2019, l'alerte officielle passe par les sirènes d'alerte, le compte de la préfecture de Seine-Maritime et les messages sur Radio France Bleu.
- D'autres canaux officiels ont été mobilisés, la télévision, les réseaux sociaux (Facebook et Twitter pour l'essentiel) et les canaux inter-individuels (appels téléphoniques).
- Certaines mairies ont pris l'initiative d'envoyer des messages à leurs administrés via le site web de la mairie ou la page Facebook.
- Depuis 2019 la Métropole Rouen Normandie a mis en place un système d'information et d'alerte par SMS via un abonnement (InfoRisques)
- En France, depuis juin 2022, les autorités préfectorales ont la possibilité d'envoyer une notification d'alerte sur les téléphones portables des individus situés dans une zone de danger, depuis une plateforme appelée FR-Alert®.

Le cas particulier des accidents technologiques

Quand une situation à risque survient sur un site industriel, les autorités ne diffusent pas immédiatement l'alerte :

- Elles regardent le type d'établissement concerné,
- Elles identifient les produits en jeu (grâce aux remontées des sapeurs-pompiers et des exploitants),
- Elles caractérisent l'existence (ou non) d'un danger,
- Avant de déterminer les habitations pouvant être touchées.

La dimension géographique de l'évènement, et les responsabilités qui en découlent, jouent aussi un rôle important!

- Si l'incendie a lieu au sein d'un site SEVESO, et s'il sort de l'enceinte de l'exploitation, le préfet, en lien avec les acteurs de secours et la mairie concernée, arme le Centre Opérationnel Départemental (COD). Il devient le directeur des opérations, et active au plus vite le Plan Particulier d'Intervention (PPI).
- Si l'incendie reste circonscrit à l'intérieur d'un site ou d'une exploitation, les exploitants vont activer leur Plan d'Opérations Internes (POI), faire sonner les sirènes et confiner, si nécessaire, les personnes présentes en temps réel au sein du site. Mais aucune alerte ne sera en revanche diffusée aux riverains, l'incident étant très localisé.

Or, entre ces deux configurations, il existe une grande diversité de situations ! Et comme les seuils d'activation des opérations et les actions en matière d'information sont vite hétérogènes, une période plus ou moins longue de temps subsiste durant laquelle des doutes ou des incertitudes peuvent perdurer.

La multiplicité des canaux d'information et d'alerte

Le risque de confusion lié à la prolifération des messages officiels et non-officiels est donc grand en cas de crise. En l'absence de données communiquées par les autorités, les populations se tourneront vers différents canaux (presse locale, médias sociaux ou chaînes d'informations en continu). **Or, plus les informations officielles prennent du temps à être formulées, plus la viralité d'informations non vérifiées est risquée, surtout dans un contexte où la**

culture du risque est peu développée. La complémentarité de la plateforme FR-Alert et d'InfoRisques est donc un atout, si les cellules de communication possèdent les mêmes éléments de langage et se concertent avant et pendant la crise sur l'évolution de la situation et les informations / consignes à transmettre. **Quels sont ces éléments de langage ?**

Les enseignements saillants

Les études empiriques permettent d'établir un cadre normatif pour rédiger des messages d'alerte clairs, précis, efficaces (i.e. destinés à motiver les destinataires pour une application des mesures de mise en sécurité). Soulignons ici l'importance de plusieurs invariants et de leur hiérarchisation avec le déploiement de l'alerte par diffusion cellulaire :

➤ L'émetteur **(1)** doit être identifié, légitime, connu et considéré comme crédible par les destinataires, pour permettre à ces derniers d'accorder leur confiance et limiter la méfiance induite par toute sorte de sollicitations reçues au quotidien.

➤ La nature de l'événement **(2)** doit être décrite de manière compréhensible, avec des mots simples et non scientifiques, ce qui induit un effort sur le langage utilisé. Le défi consiste surtout à utiliser des mots ayant du sens pour les destinataires, à utiliser un vocabulaire explicite (*dangereux* à la place de *grave* par exemple), et à bannir le moindre langage opérationnel ou scientifique.

➤ Les consignes **(3)** doivent être incitatives, et éviter les négations ou les imprécisions pour ne pas compromettre la clarté du message. Le message "idéal" doit pouvoir être très détaillé, notamment en cas d'événements laissant du temps à la réflexion, et contenir de nombreuses informations pour éviter une recherche supplémentaire, qui est souvent destinée à confirmer la véracité de l'alerte. En revanche un message court est requis en cas de danger immédiat.

➤ Le lieu **(4)** renvoie à la dénomination des zones à éviter ou à évacuer. C'est une étape importante : les destinataires peuvent avoir des difficultés à se repérer dans l'espace, d'autant plus si ces derniers ne connaissent pas la zone de danger (étant de passage ou nouvellement arrivés).

➤ Pour finir, les informations temporelles **(5)** ont pour objectif de décrire et de borner la temporalité de l'événement (heure et date de début, et une fin à indiquer si possible).

Une illustration

Une grille d'analyse mise en place par l'équipe pour évaluer les messages envoyés depuis la plateforme FR-Alert permet d'accompagner les préfectures dans la prise en main de l'outil. Pour une synthèse des expériences menées en 2022-2023, voir : <https://storymaps.arcgis.com/stories/1aa7849e09094cdf9b8936e0faecd52c>

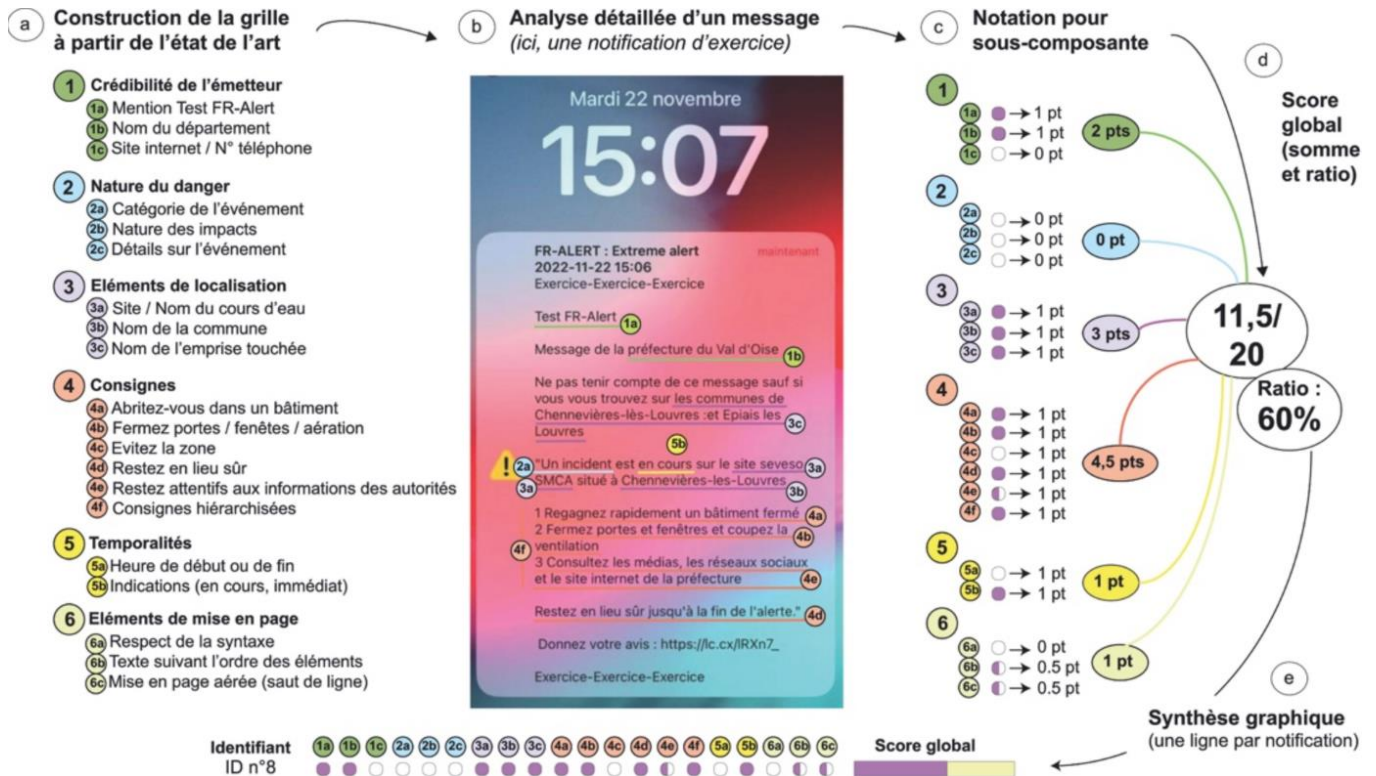


Figure 66 : Grille d'analyse pour l'évaluation des messages envoyés depuis la plateforme FR-Alert

ii. Des pistes de travail concernant la gestion des risques

- Former et informer largement en amont la population sur les différentes procédures de l'alerte (rôle, fonctionnement, émetteur, suivi) ;
- Mettre en place des programmes de formation sur le confinement et l'évacuation auprès des personnels de sécurité et des responsables des ERP ;
- Réaliser un diagnostic sur les zones refuges et de mise à l'abri présentes sur les territoires à risques industriels afin d'évaluer la cohérence de la consigne avec les capacités d'accueil du territoire ;
- La création d'un statut de personnes référentes de sécurité civile pour les agents de sécurité ou responsables d'ERP ;
- Organiser des séances de travail sur l'information et l'alerte entre les responsables de communication des mairies, de la métropole et de la préfecture.

iii. Des pistes de travail en gestion de crise et en situation de crise

- Donner l'alerte et diffuser des informations officielles en continu en cas de crise ;
- Communiquer sur les dangers d'être à l'extérieur en cas de nuage toxique ;
- Réaliser des exercices de confinement, à domicile et dans des lieux publics, en situation ordinaire ;
- Distribuer des kits de confinement (plaquette, adhésif) ;
- Former aux bonnes pratiques les responsables de transport en commun.

iv. Des pistes de travail pour la communication et la gestion des réseaux sociaux

- Diversifier les canaux de diffusion de l'information ;
- Préparer en amont des messages-types à diffuser tout au long de l'évènement et même après pour informer sur les procédures en cours et les analyse a posteriori ;
- Favoriser les collaborations avec les associations de MSGU (Médias sociaux en gestion d'urgence) pour la lutte contre les rumeurs et l'identification de comportements particuliers ;
- Favoriser la coordination de la communication entre les acteurs (industriels, et différents échelons administratifs).

B. L'incendie dans la trajectoire politique rouennaise

L'incendie des sites Lubrizol et Normandie Logistique survenu le 26 septembre 2019 a immédiatement entraîné de nombreuses réactions politiques : une inquiétude, une défiance et une colère très grande au sein de la population de l'agglomération ; une perturbation de la gouvernance locale, une prise en main des opérations par les représentants de l'État (le préfet, la DREAL, l'ARS, plusieurs ministres et le président de la République lui-même) et une relative marginalisation des élus locaux ; une mobilisation de la société civile (visible à travers la création d'associations de victimes, plusieurs dépôts de plaintes, la constitution d'une association des entreprises de la chimie) et du Parlement (avec le lancement d'enquêtes parlementaires suivies de rapports officiels). Passé l'émoi des premiers mois, on pourrait conclure à un retour progressif à la normale et à la disparition des stigmates de l'incendie, remplacé à partir de février 2020 par l'irruption d'inquiétudes nouvelles liées à la pandémie de covid-19. À cette aune, l'agglomération rouennaise aurait réagi à l'incendie avec une prompte résilience, passant rapidement à une autre actualité. Une telle lecture néglige que les événements traumatiques ne sont jamais réductibles à de simples *inputs* qui exerceraient des effets directs de plus ou moins grande ampleur. La lecture que nous développerons ici considère au contraire que les événements n'ont d'effets qu'au regard des contextes géohistoriques dans lesquels ils surviennent, selon qu'eux-mêmes connaissent de l'inertie ou du changement. Cela signifie que l'influence de l'incendie ne tient pas exclusivement à l'ampleur de ses caractéristiques propres (sa durée, les dégâts occasionnés ou les pollutions engendrées) mais aussi à la dynamique du territoire dans lequel il surgit. Or, contrairement à d'autres accidents industriels survenus par le passé, l'incendie du 26 septembre 2019 s'est produit dans un contexte de profonds changements politiques qui ont conduit à en faire un moment local important dans une chaîne de transformations générales de grande ampleur. Ces changements sont de plusieurs natures :

Dans ce contexte, nous formulons l'hypothèse que l'incendie du 26 septembre 2019, par son caractère spectaculaire et perturbant, a créé les conditions pour que s'opère un réalignement idéologique des autorités métropolitaines rouennaises et un changement incrémental du paradigme politique dominant, faisant de Rouen un des laboratoires contemporains d'expérimentation du néo-progressisme urbain en Europe.

L'examen de la trajectoire politique de l'agglomération rouennaise au cours des dernières décennies montre que l'incendie du 26 septembre du 2019 n'a ni induit de rupture fondamentale, ni été un événement anodin. Il se présente plutôt comme un accélérateur de transformations inscrites dans une chaîne d'événements ayant conduit les élus locaux à s'engager avec une vigueur accrue en faveur des politiques urbaines de transition sociale et écologique et à rompre partiellement avec le modèle du néolibéralisme urbain. S'il n'a pas conduit à faire basculer la mairie de Rouen aux mains d'EELV, comme cela s'est produit pour une dizaine de grandes agglomérations lors des élections municipales de 2020, l'incendie a contribué à la redéfinition des rapports de force au sein des gauches rouennaises, la confirmation du leadership du PS local ayant été réalisée au prix d'un alignement idéologique sur l'ambition programmatique traditionnelle des forces écologistes. Cette conversion se traduit aujourd'hui par une politique urbaine conforme aux idéaux néo-progressistes, également expérimentés dans d'autres métropoles françaises, dans le cadre d'une stratégie réformiste qui consiste à engager la rupture avec le modèle antérieur de façon graduelle, pragmatique et précautionneuse, de façon à éviter tout blocage avec les forces néolibérales traditionnelles.

C. L'incendie dans la trajectoire socio-économique rouennaise : perception, adaptation, évaluation des dommages et d'une culture multi-risque

Dans nos sociétés industrialisées, une part importante des externalités environnementales sont le fruit de l'activité industrielle, avec des niveaux de pollutions diverses, portant encore plus atteinte à la qualité de vie en cas de réalisation de risques industriels. À cet égard, l'incendie des sites de Lubrizol, classé SEVESO seuil haut, et Normandie Logistiques le 26 septembre 2019 à Rouen constitue un exemple parfait de nuisances liées à la réalisation d'un risque industriel dont l'évaluation du dommage global est délicate. Au cours de la nuit 26 septembre 2019, 617 références différentes de produits « Lubrizol » pour un tonnage de 9 419 tonnes ont brûlé (Institut national de l'environnement industriel et des risques, 2019) laissant planer dans le ciel de la métropole de Rouen un épais panache de fumée noire. Aussi, **cet accident industriel notable de par son ampleur et les conséquences potentielles sur l'agglomération rouennaise pose la question de l'évaluation socio-économique des dommages.**

L'incendie du 26 septembre 2019 ayant touché une usine de produits chimiques classée Seveso seuil haut, Lubrizol, est susceptible d'avoir provoqué une rupture dans les perceptions qu'ont les habitants de la métropole autour de leur sécurité sanitaire et, probablement dans une moindre mesure, de leur sécurité économique. Une adaptation immédiate des comportements des ménages de la métropole s'est mise en place face à l'urgence. L'enquête socio-économique réalisée invite à une temporalité différente. Près de quatre années après l'incendie, que reste-t-il dans les esprits du traumatisme subi par la population à la suite de l'incident majeur, sous quelles modalités se construit la résilience des ménages de la métropole et comment intègrent-ils la culture du risque ?

Pour répondre à ces questions et à des questions connexes participant à l'analyse des conséquences de l'incendie et à la préparation de réponses en matière de politiques publiques, un questionnaire a été élaboré en sept parties et largement diffusé à destination des habitants majeurs de la métropole du 4 juillet 2023 au 3 octobre 2023. **Notre approche relève de l'analyse multirisque ; le point de départ de l'enquête étant la réalisation d'un risque industriel, qui interroge sur la façon dont cela a induit la perception d'un risque environnemental, d'un risque sanitaire et entraîné un risque social. La réponse à la problématique s'entend par un diagnostic des changements de comportements socio-économiques des ménages mais aussi par une tentative d'évaluation monétaire du dommage subi par ces derniers ainsi qu'un recueil de leurs perceptions et de leurs attentes. Ces données sont collectées à une distance nécessaire de l'événement permettant une mitigation des biais liés à l'affect face à un événement donnant lieu à des émotions intenses. Enfin, l'analyse se veut à portée constructive avec un volet analysant l'acceptabilité sociale de politiques publiques visant à apporter des réponses à la population exposée ou à risque d'exposition aux accidents industriels.**

L'accident industriel du 26 septembre 2019 a provoqué une élévation soudaine du risque environnemental, du risque sanitaire et du risque social invitant à adopter une approche multirisque lors de l'élaboration et de l'analyse du questionnaire. Quatre années après l'incendie, les données collectées dans le questionnaire permettent d'affirmer que cette élévation du risque est encore perçue par la population des enquêtés bien que ces derniers aient majoritairement appris à surmonter en partie le traumatisme causé par l'incendie.

Sur les comportements socio-économiques, si un tiers des interrogés ont déclaré avoir pensé à un déménagement après l'incendie, seulement 30% d'entre eux l'ont effectivement réalisé. Le déménagement étant une action qui demande un temps de préparation et de réflexion important, le fait que 70% des ménages aient abandonné ce projet peut, certes, résulter d'un écart entre les intentions et les moyens de les réaliser, mais aussi, être le reflet d'une évolution en matière de perception du risque et de son acceptation, une manifestation de résilience. Cette résilience se retrouve encore dans l'évolution des activités pratiquées et dans l'évolution des consommations des ménages. Quatre ans après l'incendie, la plus grande partie des répondants a déclaré être restée stable dans ses activités et sa consommation. Toutefois, il apparaît clairement la marque de la persistance de la perception d'un risque environnemental et sanitaire pour une partie des répondants puisque la seconde plus grande partie des réponses sur les activités et la consommation va dans le sens d'une certaine prudence voire méfiance vis-à-vis de la contamination voire la pollution engendrée par l'incendie. Une autre modalité de construction de la résilience de la population est à noter : si une part relativement majoritaire des répondants affirme ne pas avoir changé ses

modalités de transport, la tendance pour ceux qui ont changé de comportement est ensuite dominée par un mouvement vers les mobilités douces. Une partie de la population semble donc vouloir être actrice du progrès environnemental.

L'analyse des réponses à la partie du questionnaire portant sur l'évaluation monétaire du dommage permet d'aller un peu plus loin que son objectif d'origine. En effet, le refus de certains répondants de participer aux contributions financières proposées, que cela soit pour que l'incendie n'ait jamais eu lieu ou pour des fonds de prévention, est en lui-même instructif. Les raisons invoquées pour ce refus rappellent que la population se considère bien comme victime de l'accident et qu'en premier lieu, les répondants imputent la responsabilité de celui-ci à Lubrizol. Les enquêtés ayant accepté le principe des situations hypothétiques avec lesquels ils pouvaient « effacer l'incendie » ou éloigner leur domicile du lieu de l'accident grâce au paiement respectivement d'une cotisation annuelle ou d'un montant à versement unique ont déclaré des montants assez importants. De même, les déclarations de variations de dépenses de parapharmacie ou d'autres dépenses de protection montrent un budget non négligeable investi. Cela atteste encore de l'importance du dommage subi par les répondants et de sa persistance quatre ans après l'accident. De plus, les travaux réalisés par les répondants constituent une mise à niveau de leur équipement face aux risques de l'environnement témoignant d'un niveau plus élevé de culture du risque.

L'examen du recueil des perceptions montre que quatre ans après l'accident industriel, plus de la moitié des répondants sont inquiets ou très inquiets de la qualité de l'air, de l'eau et des sols dans leur quartier et que ce chiffre passe au moins à deux tiers des répondants à l'échelle de la métropole. En comparaison à la période d'avant l'incendie, cette proportion a presque doublé en ce qui concerne l'air et plus que doublé en ce qui concerne l'eau et les sols. Le degré de résilience apparaît donc assez faible vis-à-vis de cette question. La localisation de cette source d'inquiétude pour les répondants est située principalement autour de l'usine Lubrizol en ce qui concerne Rouen et Le Petit-Quevilly. C'est plus la proximité de cette zone, que la direction du vent et du nuage de fumée au moment de l'incendie, qui semble guider les perceptions des répondants quant à la pollution. Les réponses au questionnaire confirment aussi que l'incendie du 26 septembre 2019 a provoqué une perception accrue et persistante du risque d'accident industriel sur le territoire et une hausse de l'inquiétude vis-à-vis du risque sanitaire. Enfin, une majorité des répondants considèrent que l'incendie a eu un impact négatif sur l'attractivité du territoire, au niveau de leur quartier et de la métropole.

Les inquiétudes manifestées par les répondants et mises en exergue par l'enquête font ressortir le besoin d'une action publique dans la durée. Son orientation peut être adaptée en prenant en considération les attentes de la population. Un des objectifs de cette enquête réside dans la recherche des besoins de la population et des solutions qu'ils pensent être les plus adéquates avec la réalité de terrain. En matière d'équipement pour se protéger de potentiels futurs accidents industriels, les préférences des répondants ne semblent pas nettement tranchées même si ce qui est en rapport avec les fenêtres (triple vitrage, filmage des fenêtres anti-éclats de verre) semble l'emporter en ce qui concerne l'attente de subventions. Au regard des réponses apportées par les interrogés, le soutien aux politiques publiques dépendrait de l'adéquation avec trois notions : la prévention, la sanction-désincitation des usines contrevenantes et la préparation face à un nouvel accident. Ainsi, les répondants ont souhaité voir financés majoritairement des fonds destinés à poursuivre le renforcement des contrôles sur les sites et activités industriels sensibles, à renforcer la capacité de réaction et d'analyse en matière sanitaire et environnementale face à des accidents industriels, à améliorer encore la prévention et la gestion des risques au sein des plateformes industrielles (respectivement plus de 90%, 82% et 78% d'avis favorables). Ce constat se confirme lorsque l'action publique la plus prioritaire pour les habitants est celle consistant à renforcer le contrôle du respect des normes ou encore celle visant à taxer les entreprises à l'origine d'externalités négatives. Se révèle alors tout à fait cohérent que la politique publique la plus plébiscitée par les répondants soit celle, dont les éléments précédents pourraient constituer les volets, de la protection des habitants face au risque industriel. Ainsi, ce que voudraient avant tout les répondants ce serait qu'un incendie tel que celui du 26 septembre 2019 ne se reproduise jamais.

L'enquête menée, originale par la diversité des thèmes abordés, son approche multirisque et sa temporalité à quatre années de distance de l'incendie, a pu, en s'appuyant sur les données collectées, montrer que l'incendie a donné lieu à une transformation sociale à moyen terme : adaptation des comportements socio-économiques aux risques, développement d'une culture du risque mais aussi orientation dans une certaine mesure vers les mobilités

douces. Ce dernier point entre en résonance avec la seconde politique publique la plus prioritaire aux yeux des répondants : la renaturation de la ville. Faudrait-il y voir le signe d'une volonté de transformation plus profonde, la volonté d'un changement de paradigme, s'appuyant sur une prise de distance avec le productivisme et ses usines qui localement auraient dégradé les conditions de vie d'une partie des habitants ? Et peut-être la volonté de prendre part à cette transformation, de devenir acteurs « du monde d'après ».

CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS

Suite à l'incendie des usines Lubrizol et Normandie Logistique le 26 septembre 2019, un panache de fumée a disséminé des produits sur une large zone géographique. La période de gestion de crise centrée sur la protection immédiate des populations a traité des risques aigus. Le projet scientifique COP HERL a été bâti pour explorer des questionnements de recherche dont les réponses peuvent améliorer la compréhension des conséquences de l'incendie sur l'environnement et les populations et fournir un retour d'expérience dans la gestion des futurs accidents industriels. Il s'inscrit comme un projet de territoire dont l'enjeu est d'apporter des réponses scientifiques à l'ensemble des acteurs locaux sur l'incendie lui-même, ses conséquences potentielles sur l'environnement et l'Homme et sur la perception des risques, la gestion de crise et la résilience du territoire. Son caractère innovant réside à la fois dans les méthodologies analytiques développées dans le cadre du projet puis dans l'ampleur de l'interdisciplinarité avec une quinzaine de laboratoires et une centaine de personnels physiciens, chimistes, environnementalistes, médecins, biologistes, géographes, économistes, sociologues et psychologues. De par son expertise, son indépendance et son emprise locale, le projet COP HERL suscite une attente sociétale importante pour répondre aux questions orphelines que les périodes de gestion de crise et de suivi renforcé n'ont pas apportées puisque hors champ de l'urgence.

La simulation du panache de fumée a permis de corroborer les observations des pompiers avec une stabilisation autour de 475m d'altitude et d'expliquer les caractéristiques des retombés de suies à l'approche et sur le plateau nord-est de l'agglomération.

L'étude concernant **l'imprégnation par les HAP et les métaux des cheveux** d'habitantes de la métropole **ne montre pas d'exposition significativement plus importante après l'incendie qu'avant celui-ci** et ne présente pas de concentrations supérieures à celles observées dans une étude menée dans la région du Havre.

La recherche de molécules dans les échantillons primaires (prélevés durant l'incendie sur les matrices air, eau, sol, suies, sédiments, ainsi que via la liste des produits Lubrizol ayant brûlés puis dans les huiles additivées et non-additivées utilisées pour simuler un feu en enceinte confinée en absence de produits fournis par Lubrizol, puis un effluent de ruissellement sortant de l'usine lors de l'incendie) a permis la constitution d'une base de données de **10.630 références de formules moléculaires, témoignant de la diversité et de la complexité des produits à caractériser**. La recherche de molécules dans les échantillons secondaires (prélevés dans l'environnement après l'incendie : eaux superficielles et souterraines, matières en suspension, sédiments, sols) a montré **jusqu'à plus de 6.000 analytes par échantillon**, constituant une deuxième base de données. Le suivi environnemental post-incendie a duré 30 mois (début 2021-fin 2023) sur 5 hydrosystèmes situés sous le panache de fumée (2 sources d'eau souterraine et l'aval du Cailly, de l'Andelle et du Robec-Aubette).

Concernant le suivi des molécules réglementées, **aucune pollution aux métaux, dioxine, furane, HAP et PCB n'a été mise en évidence dans les sols et les eaux** même si des augmentations de niveaux de contamination ont pu être attribuées à l'incendie. En revanche, dans les sédiments de la darse aux bois ayant reçu les effluents de l'incendie, **les concentrations de cadmium, cuivre, plomb, zinc, HAP, et PCB dépassent les seuils S1 de la réglementation GEODE du 9 août 2006**. Elles sont également très largement supérieures pour les PFAS aux valeurs habituellement observées dans les sédiments en France. **Les niveaux de contamination en PFAS dépassent par deux fois (au moment de l'incendie puis fin 2022-début 2023) les valeurs maximales observées dans les sédiments en aval de Lyon (aucune norme existe pour définir une pollution)**. Ces sédiments doivent donc être considérés comme toxiques pour l'environnement et soumis à une réglementation stricte avec mise en décharge spécifique en cas de curage futur de la darse.

Un des objectifs du projet COP HERL était d'identifier des marqueurs fiables uniquement à l'incendie. Pour ce faire, une intercomparaison des deux bases de données référençant les signaux moléculaires issus des échantillons primaires (10.630) et secondaires (>6.000/échantillon) a été effectuée en supprimant les molécules ubiquistes de l'environnement et celles présentes dans le bruit de fond urbain de la métropole. Ainsi, **30 molécules organiques, plus le zinc (de par les concentrations atteintes), sont clairement identifiées comme des marqueurs de l'incendie**

avec des niveaux de confiance allant de 1 (certitude) à 4 (fortement probable). La plupart sont classées irritantes cutanées et/ou oculaires, voire respiratoires ; ce qui est en accord avec les signes cliniques observés sur la population (toux, gêne respiratoire, irritation, mal de gorge, nausées, vomissements). Parmi elles, certaines molécules possèdent par ailleurs des effets narcotiques pouvant entraîner somnolence et vertiges ; signes également retrouvés dans la population en phase aiguë. **8 molécules sont classées cancérigènes ou mutagènes, perturbateurs endocriniens et/ou reprotoxiques, ou toxiques pour les organismes aquatiques.**

Le suivi environnemental de ces 30 molécules a mis en évidence la **présence de 12 de ces marqueurs à l'état dissous dans l'eau et 8 à l'état fixé sur les matières en suspension, dont 6 parmi celles présentant un risque plus élevé.** On observe 4 dynamiques spatio-temporelles : i) il existe un gradient d'exposition avec des eaux souterraines mieux protégées contre les contaminations, excepté pour la Diphénylamine, et l'Andelle moins impactée de par son plus fort éloignement, ii) certains marqueurs ont disparu depuis au cours du suivi, iii) certains montrent des variations de présence en lien avec le contexte météorologique et sont restitués au moment des pluies et donc présents dans les sols, iv) certains sont constamment présents. **7 et 8 marqueurs ont été retrouvés respectivement dans les sols et sédiments, dont 5 parmi ceux présentant un risque plus élevé.**

Un protocole expérimental spécifique a été développé afin d'étudier la toxicité cellulaire d'aérosols et de suies générés par un feu dans une enceinte confinée. En absence de produit Lubrizol, il a été utilisé des huiles minérales pour voiture avec ou sans additifs. **Certaines molécules ont pu être retrouvées lors de ces essais mais sans tous les marqueurs et la complexité moléculaire des produits issus de l'incendie.** L'analyse microphysique des aérosols a permis de mettre en évidence des particules de suie de très petites tailles, de l'ordre de quelques dizaines de nanomètres, permettant leur pénétration jusque dans les voies respiratoires distales. Les paramètres biologiques mesurés après exposition de cellules épithéliales bronchiques ont mis en évidence une réponse inflammatoire, une légère augmentation de la réponse antioxydante ainsi qu'une expression marquée de gènes impliqués dans le métabolisme de biotransformation des hydrocarbures. L'étude réalisée sur des cellules bronchiques humaines a permis de mettre en évidence **l'absence de cytotoxicité des suies mais des propriétés génotoxiques et mutagènes, potentiellement liée aux HAPs et de leurs dérivés nitrés,** questionnant sur l'impact éventuel sur le long terme de l'inhalation de ces particules. L'étude de **l'impact de ces suies sur la croissance de 2 types de bactérie n'a montré aucune incidence sur la physiologie et la virulence.**

L'analyse comportementale des populations durant l'incendie a montré **un traumatisme généralisé caractérisé par une hypermnésie et une sidération mêlées d'un sentiment d'abandon et de défiance.** L'étude des réseaux sociaux montre que c'est moins la perception de l'incendie que la communication institutionnelle jugée tardive, lacunaire ou incohérente qui a présidé à la survenue de ces ressentis. A ce titre, le décalage entre la préfecture, communiquant sur les faits quantitatifs du risque, et la population, vivant une perception sensorielle (vision, odeur, gêne respiratoire, maux de tête, nausées), est particulièrement illustratif du travail qui reste à produire pour améliorer la culture du risque au sein de la métropole. En effet, les enquêtes ont montré **une méconnaissance des consignes de sécurité** en cas d'alerte et une **absence de réflexes normés** tels que prescrits par les autorités alors que, dans les exercices de crise, le scénario le plus souvent joué est celui de populations qui se comportent selon les procédures transmises lors des campagnes d'information. Ainsi à l'inverse de ce qui est attendu, une variété de comportements a été constatée mettant en évidence qu'au-delà de la simple connaissance des consignes, leur mise en pratique reste un défi. Néanmoins, si le conseil donné à la population de rester à l'abri a globalement été respecté, un événement de cette nature commençant en plein jour pourrait entraîner des départs massifs d'autant plus que la consigne de mise à l'abri dans le bâtiment le plus proche n'est pas réaliste en milieu urbain non équipé en abri refuge. Dans ce contexte, **l'accueil dans les ERP (publics et privés) est un enjeu qui n'est aujourd'hui pas identifié.**

L'incertitude et la temporalité des consignes officielles ont créé un espace d'inquiétude et d'abandon dans lequel des professions en situation de gestion de crise ont dû faire face. Parmi elles, les stratégies d'adaptation de médecins généralistes et de gestionnaires d'établissements scolaires ont été analysées. Durant l'incendie, le manque de savoir scientifiquement étayé et d'informations institutionnelles communiquées aux médecins a été un véritable défi. Ceux-ci ont alors cherché des informations via les ressources professionnelles ordinaires et extra-professionnelles (réseaux amicaux et conjugaux ayant accès aux informations venant du CHU ou sur les risques

industriels). **Cette situation d'absence de savoir officiel diffusée de façon homogène dans la profession médicale a engendré un report sur l'expérience personnelle, et conduit alors à des postures différenciées.** Dans ce brouillard diagnostique, les médecins ne se sont pas limités à des réponses strictement médicales mais ont parfois eu recours à des réponses très pragmatiques, relevant du sens commun s'appuyant sur les perceptions sensorielles et corporelles de l'incendie. L'absence de système d'alerte interne à l'Éducation nationale a été regrettée et l'attente des seules consignes de la préfecture a été vécue comme un abandon du rectorat.

Cet incendie a provoqué une élévation soudaine de la perception du risque environnemental, sanitaire et social dans la population mais cinq années après l'incendie, les données collectées dans l'enquête socio-économique permettent d'affirmer que cette élévation du risque est encore perçue par la population bien que ces derniers aient majoritairement appris à surmonter en partie le traumatisme tout en changeant leur comportement. Sur les comportements socio-économiques, si un tiers des interrogés ont déclaré avoir pensé à un déménagement après l'incendie, seulement 30% d'entre eux l'ont effectivement réalisé. Mais certains de ceux qui sont restés à proximité des usines ont réalisés des travaux de mise à niveau de leur équipement face aux risques de l'environnement, de dépenses de parapharmacie ou d'autres dépenses de protection témoignant d'un niveau plus élevé de culture du risque. Cette culture du risque est à mettre en lien avec **une perception de l'environnement dégradé** où 2/3 des enquêtés sont inquiets ou très inquiets de la qualité de l'air, de l'eau et des sols dans la métropole et perçoivent un risque d'accident industriel et un risque sanitaire de manière accrue et persistante. Ainsi, la majorité des répondants considèrent que l'incendie a eu un **impact négatif sur l'attractivité du territoire**, au niveau de leur quartier et de la métropole. Les inquiétudes manifestées dans l'enquête font ressortir le **besoin d'une action publique autour de 3 notions : prévention, sanction-désincitation des usines contrevenantes et préparation face à un nouvel accident.** Ainsi, les répondants ont souhaité voir financés majoritairement des fonds destinés à poursuivre le renforcement des contrôles sur les sites et activités industriels sensibles, à renforcer la capacité de réaction et d'analyse en matière sanitaire et environnementale face à des accidents industriels, à améliorer encore la prévention et la gestion des risques au sein des plateformes industrielles.

L'enquête socio-économique montre quatre ans après que l'incendie a donné lieu à une **transformation sociale à moyen terme : adaptation des comportements socio-économiques aux risques, développement d'une culture du risque, volonté de renaturation de la ville.** Faudrait-il y voir le signe d'une volonté de transformation plus profonde, la volonté d'un changement de paradigme ? L'examen de la trajectoire politique de l'agglomération rouennaise au cours des dernières décennies montre que l'incendie n'a ni induit de rupture fondamentale, ni été un événement anodin. Il se présente plutôt comme un accélérateur de transformations inscrites dans une chaîne d'événements ayant conduit les élus locaux à s'engager avec une vigueur accrue en faveur des politiques urbaines de transition sociale et écologique.

Les résultats issus du projet COP HERL amène la communauté scientifique à émettre 3 recommandations aux acteurs décisionnels et gestionnaires locaux et nationaux sur :

- La caractérisation du risque lors d'un accident :

La gestion de crise suite à un accident industriel répond à une procédure très calibrée soumise à la réception des informations quantitatives et qualitatives sur la caractérisation du risque dans le but de répondre aux besoins immédiats de protection des populations. Le temps de la crise n'est pas le temps de la science néanmoins, et le projet COP HERL en est une illustration, au-delà de ce temps de crise qui ne vise qu'à évaluer le risque aiguë et immédiat, **il existe un grand nombre de questions et de risques qui ne sont pas traités dans le temps de la crise mais qui font sens pour les populations, les gestionnaires et les décideurs sur un temps plus long.** Dans ce cadre, l'expertise des scientifiques, leurs capacités analytiques et leurs démarches méthodologiques peuvent apporter des réponses aux questionnements sociétaux. La caractérisation spectrale des molécules et leur bancarisation internationale permet d'identifier une grande diversité de produits au sein des échantillons de manière ciblée et non-ciblée. **Il est dommageable que la communauté scientifique n'ait pas eu accès à des échantillons natifs de l'incendie pour mener ses investigations car elle a été privée d'informations essentielles.** Ce n'est que par l'indépendance des chercheurs qui ont prélevé eux-mêmes des échantillons dans l'environnement plus ou moins immédiat et dispersé au sein de la métropole que ces informations ont pu permettre de caractériser les 30 marqueurs de l'incendie. Aussi **la communauté scientifique recommande que des échantillons conservatoires**

puissent être prélevés lors d'accidents industriels majeurs afin de permettre ultérieurement des caractérisations complètes en dehors du cadre de l'urgence et répondre aux questionnements sociétaux éventuels sur un temps plus long.

- Le plan de communication de crise :

L'acquisition des informations permettant la caractérisation du risque nécessite du temps et des moyens techniques incompressibles de sorte qu'il y aura toujours un délai entre la diffusion des consignes et les besoins de celles-ci, temps désormais utilisés par les réseaux sociaux et l'information continue. Plusieurs recommandations ont été faites dans la partie IV.A.2 afin d'établir un cadre normatif pour rédiger des messages d'alerte clairs, précis, efficaces en soulignant l'importance de plusieurs invariants et de leur hiérarchisation dans le déploiement de l'alerte. Mais au-delà de la réduction des délais, des objectifs de transparence et de la nécessaire cohérence des consignes, **il conviendrait de rapprocher la communication de crise faite par les institutions, basée sur le registre factuel, du ressenti de la population, basé sur le registre sensoriel et émotionnel.** En effet, il a été montré qu'un discours quantitatif pouvait entrer en opposition avec les sensations et les inquiétudes de la population pour finir par nourrir des sentiments d'incompréhension, de suspicion voire de défiance. **La communication de crise gagnerait peut-être à intégrer un registre sensoriel en plus du factuel pour faire corps avec la population.**

- La continuité du suivi des marqueurs dans les matrices environnementales :

30 marqueurs de l'incendie ont été identifiés plus le zinc au sein des échantillons primaires et secondaires environnementaux. Certains ont été retrouvés dans les sols, dans les sédiments, et dans les eaux à l'état dissous ou fixé sur des particules en suspension. Si les 2/3 de ces marqueurs présentent des risques mineurs voire nuls, **1/3 de ceux-ci présentent des risques plus ou moins importants pour l'Homme et l'environnement (8 marqueurs + morpholides et morpholines).** Certains étaient constamment retrouvés et d'autres l'étaient à la faveur des épisodes de pluie. Le suivi environnement s'est achevé fin 2023 et la communauté scientifique pose la question de la continuité de ce suivi pour ces molécules marqueurs. Aussi, **nous recommandons que ces molécules marqueurs soient quantifiées et intégrées aux plans de surveillance (DREAL, AESN, ARS)** des eaux superficielles, souterraines et brutes destinées à la consommation humaine menés sur les bassins versant du Cailly et du Robec-Aubette. Nous recommandons également que les **concentrations en cadmium, cuivre, plomb, zinc, HAP, PFAS et PCB soient mesurées dans les eaux de la darse aux bois pour vérifier que les sédiments ne relarguent pas dans l'eau des doses toxiques pour l'environnement.** Les sédiments devront être mis en décharge selon une procédure spécifique.