

PROJET COP HERL

Incendie des usines Lubrizol et Normandie Logistique : COnséquences Potentielles pour l'Homme et l'Environnement, perception et RésiLience

DE LA CARACTERISATION DU RISQUE PHYSICO-CHIMIQUE,
ENVIRONNEMENTAL ET SANITAIRE A LA PERCETION SOCIETALE
DE L'INCENDIE : VERS UNE RESILIENCE DU TERRITOIRE

PHASE 1

NOVEMBRE 2020 – DECEMBRE 2021

Table des matières

1	Préambule	7
2	Objectifs et attendus	8
3	Structuration, calendrier et livrables du projet COP HERL	10
4	Livrables de la phase 1 : 2020-2021	16
5	Résultats du WP1 : caractérisation de l'incendie	17
5.1	Simulation chronologique de la dispersion et du rabattement des particules présentes dans le panache de fumées	17
5.1.1	Contexte et Objectifs	17
5.1.2	Set up Numérique	18
5.1.2.1	Topographie et Maillage	18
5.1.2.2	Données météorologiques et hypothèses simplificatrices	19
5.1.2.3	Modélisation de la turbulence atmosphérique	20
5.1.2.4	Source des fumées	21
5.1.3	Résultats et analyses	22
5.1.3.1	Comparaisons qualitatives	23
5.1.3.2	Influence de la topographie	24
5.1.3.3	Estimation de la trajectoire	25
5.1.4	Conclusions et perspectives	26
5.2	Analyses non ciblées des polluants présents sur les suies générées lors de l'accident	27
5.2.1	Échantillonnage	27
5.2.2	Analyse des composés inorganiques	28
5.2.2.1	Instrumentation et méthodes	29
5.2.2.2	Paramètres instrumentaux utilisés	29
5.2.2.3	Résultats	30
5.2.3	Analyse des composés organiques dans les suies	33
5.2.3.1	Extractions	33
5.2.3.2	Méthodologie par FTICR-MS	35
5.2.3.3	Méthodologie par GC X GC - Orbitrap	38
5.2.3.4	Résultats	40
5.3	Analyses multi-résidus de la fraction gazeuse émise et collectée durant l'incendie	57
5.3.1	Échantillonnage	57
5.3.2	Instrumentation et méthodes	58
5.3.3	Résultats	59
5.3.4	Conclusion sur les analyses de l'air	65
6	Résultats du WP2 : Contamination des matrices environnementales, installation des stations de suivi de la contamination	66
6.1	Objectifs	66
6.2	Synthèse du suivi renforcé des eaux souterraines suite à l'incendie	66
6.3	Mise en place des stations de mesure et de prélèvements	67
6.3.1	Stratégie	67
6.3.2	Campagne de terrain	69
7	Résultats du WP3 : santé et toxicité des produits de l'incendie, analyse des HAP et métaux dans les cheveux	70
7.1	Contexte	70
7.2	Hydrocarbures aromatiques polycycliques et métaux	70

7.3	Objectifs	71
7.4	Méthodes	71
7.4.1	Population ciblée	71
7.4.2	Prélèvement de cheveux	71
7.4.2.1	Critères d'inclusion	71
7.4.2.2	Critères d'exclusion	72
7.4.2.3	Paramètres mesurés	72
7.4.3	Analyse des cheveux	72
7.5	Résultats	72
7.5.1	Résultats des dosages des HAP	74
7.5.2	Résultats des dosages de métaux	79
7.6	Discussion	79
7.7	Conclusion	80
8	Résultats WP4 : Perceptions sociales de l'incendie	81
8.1	Comportements des populations lors de l'incendie du 26 septembre 2019	81
8.1.1	Introduction	81
8.1.2	Questionnaire : description	81
8.1.3	Diffusion et passation du questionnaire	82
8.1.4	Premiers résultats	84
8.1.5	Conclusion et perspectives	89
8.2	La gestion de la crise dans les collèges de l'agglomération rouennaise	91
8.2.1	Méthodologie et objectif	91
8.2.2	Principaux résultats	91
8.3	La perception des risques industriels chez les jeunes de l'agglomération rouennaise suite à l'incendie de Lubrizol-Normandie logistique	93
8.3.1	Objectifs	93
8.3.2	Méthodologie	93
8.3.2.1	Enquête quantitative : questionnaire	93
8.3.2.2	Enquête qualitative : entretiens individuels et Focus groups	94
8.3.3	Principaux résultats	94
8.3.3.1	Euphémisation des risques	94
8.3.3.2	Perceptions sensorielles du risque	95
8.3.3.3	Les émotions ressenties dans l'immédiat : anxiété et peur, et à 9 mois : intensité persistante de la colère	96
8.3.3.4	Méconnaissance des comportements à adopter en cas d'alerte	99
8.3.3.5	Parents lanceurs d'alerte et protecteurs	99
8.3.4	Conclusion	100
8.4	Les médecins généralistes face aux évènements de Lubrizol – Normandie Logistique	101
8.4.1	Naissance d'un collectif pluridisciplinaire : une rencontre entre la recherche en médecine générale et les sciences sociales de la santé	101
8.4.1.1	D'une crise à l'autre : l'évolution lucide du collectif	101
8.4.1.2	Les vertus de l'approche pluridisciplinaire en tandem de l'enquête	102
8.4.2	De l'incendie d'une usine Seveso à la Covid-19 : le médecin généraliste en situation de crise ? »	103
8.4.2.1	Méthodologie	103
8.4.2.2	Résultats principaux	104
8.4.3	Enrichir la compréhension de l'incertitude dans l'exercice de la médecine générale	106
8.4.3.1	Une incertitude amplifiée en temps de crise : savoirs distants, patients insistants et information difficilement accessible	106
8.4.3.2	Expertise professionnelle des généralistes et expérience personnelle des crises	107
8.5	Perspectives et conclusion	108

Index des figures

Figure 1 : Structures et laboratoires participants au projet COP HERL	11
Figure 2 : Structuration du projet COP HERL	11
Figure 3 : Organisation du projet COP HERL	14
Figure 4 : Représentation schématique des phénomènes physiques à modéliser dans le cas d'une étude sur la dispersion de polluants.	17
Figure 5 : Capture d'écran du logiciel Blender	18
Figure 6 : Visualisation du volume fluide choisi.	19
Figure 7 : Vue de côté d'une extrémité du maillage	19
Figure 8 : Évolution temporelle et spatiale de la vitesse du vent (26/09/2019).....	20
Figure 9 : Boîte de Mann.	21
Figure 10 : Évolution temporelle de la superficie du feu	21
Figure 11 : Vue 3D du profil Gaussien 2D d'injection des fumées, gauche, et superposition de la Gaussienne et de la fonction à support compact (vue en coupe), droite.....	22
Figure 12 : Comparaison qualitative des panaches numérique et réel.	23
Figure 13 : Visualisation des deux structures au niveau de la source d'injection des fumées.....	23
Figure 14 : Photo du panache le jour de l'incendie.	24
Figure 15 : Influence de la topographie sur les vitesses. Composante horizontale de la vitesse U_y (haut) et Composante verticale de la vitesse U_z (bas).	24
Figure 16 : Vue en coupe dans le plan $Y=3500m$ de l'isocontour instantanée du scalaire Z (ligne bleue) et de sa valeur moyenne (ligne noire).	25
Figure 17 : Vue en coupe dans le plan $X=0m$	25
Figure 18 : Estimation de l'altitude du panache pour un terme source dimensionné sur la puissance maximale P_{max} et pour la puissance moyenne \bar{P}	26
Figure 19 : Localisation des prélèvements	27
Figure 20 : Blancs analysés en chromatographie ionique avec à gauche, les anions et à droite, les cations	30
Figure 21 : Échantillons analysés en chromatographie ionique avec à gauche, les anions et à droite, les cations. La première ligne correspond à l'échantillon dilué 30 fois, la seconde à l'échantillon dilué 10 fois et la troisième l'échantillon non dilué	31
Figure 22 : Protocole d'extraction des résidus carbonés L-FDV-1 (14,9 mg), L-FDV-2 (11,4 mg), L-FDV-3 (8,2 mg) et L-FDV-4 (35,5 mg), ainsi que des suies NIST pour l'analyse en GC/MS.	33
Figure 23 : Protocole d'extraction des écouvillons.....	34
Figure 24 : Protocole d'extraction des lingettes Kimtech	34
Figure 25 : Photo du spectromètre de masse FTICR Bruker Solarix du laboratoire COBRA et rappel sur la précision de mesure et résolution en spectrométrie de masse.....	35
Figure 26 : Exemple de représentations graphiques utilisées pour les données FTICR MS avec a) diagramme de Venn, b) histogramme d'intensité relative en fonction des classes moléculaires, c) diagramme DBE vs C, d) diagramme de van Krevelen.	36
Figure 27 : : GC x GC – Orbitrap	38
Figure 28 : 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.	41
Figure 29: Diagramme d'intensité relative en fonction des classes moléculaires pour les échantillons de suie Préaux, Fond-Du-Val et Quincampoix. L'insert à droite correspond aux classes moléculaires HC, CHO1-5, CHN et CHNO1-2 prenant en compte la somme des adduits Na, Ca, K et radicaux/protonés.....	42
Figure 30 : Diagrammes de van Krevelen pour les échantillons de Fond du Val, Préaux et Quincampoix, le code couleur correspond à l'intensité des ions avec une échelle \log_{10}	42
Figure 31 : Diagramme DBE vs C des classes HC, CHO1-5 et CHNO0-5 des échantillons Fond du Val et Préaux. Le code couleur correspond à l'intensité normalisée des ions.....	44
Figure 32 : Comparaison des spectres de masse des suies de Préaux avec des suies issues de la combustion de propane avec à gauche, le spectre de masse global des deux échantillons et à droite, un agrandissement à m/z 265.....	44
Figure 33 : Diagramme DBE vs C des classes CHO2Ca, CHO3Ca et CHO4Ca des échantillons Fond du Val, Préaux et Quincampoix. Le code couleur correspond à l'intensité normalisée des ions.....	45
Figure 34 : Diagramme DBE vs C des classes CHO2K, CHO3K et CHO4K des échantillons Préaux et Quincampoix. Le code couleur correspond à l'intensité normalisée des ions.....	47
Figure 35 : Diagramme DBE vs C des classes CHO2Na, CHO3Na et CHO4Na des échantillons Fond du Val, Préaux et Quincampoix. Le code couleur correspond à l'intensité normalisée des ions.....	48

Figure 36 : Diagramme de Venn des formules brutes attribuées pour les échantillons Fond Du Val, Quincampoix et Préaux	49
Figure 37 : Visualisation via « GC image » d'un chromatogramme en 2 dimensions de l'échantillon L-FdV-4	51
Figure 38 : Lieu de prélèvement : Université Rouen Pasteur et hall de l'université	57
Figure 39 : Vision d'une partie de l'appareillage avec l'unité de thermodésorption (TDU) placée en amont de l'injecteur	58
Figure 40 : Chromatogrammes obtenus lors de la recherche des ions de rapport m/z caractéristiques des alcanes : 57,0699 (C ₄ H ₉ ⁺ .) et 71,0854 (C ₅ H ₁₁ ⁺ .)	60
Figure 41 : Géolocalisation des dépassements de valeur réglementaire limite dans les eaux brutes souterraines	66
Figure 42 : Localisation des sites de carottage proximaux	67
Figure 43 : Emplacements des Lac des deux Amants et Lac de la Chevette. Les points rouges correspondent à des témoignages de dépôts de suies avérés, les points verts à des sites situés sous le nuage sans dépôts de suies et les points blancs n'ont pas reçu de suies	68
Figure 44 : Poids des interventions médiatiques dans la diffusion de l'enquête	83
Figure 45 : Contribution des répondants à l'enquête	83
Figure 46 : Le rôle des réseaux d'acointance dans la diffusion de l'information	84
Figure 47 : Les principaux vecteurs de communication durant la crise	85
Figure 48 : Les principaux moyens pour s'informer après la première phase d'alerte	85
Figure 49 : Des départs importants mais étalés dans le temps de la crise	86
Figure 50 : Combien ont fui leur domicile, et d'où sont-ils partis ?	86
Figure 51 : Activités des répondants pour la journée du 26/11/2019 (à gauche l'activité réalisée, à droite celle prévue)	87
Figure 52 : Nombre d'établissements Seveso dans la MRN selon les enquêtés	88
Figure 53 : Comportements et exposition au danger en cas d'accident en plein jour	89
Figure 54 : Zonage d'acquisition des données de téléphonie mobile	90
Figure 55 : Réponses en % à la question posée aux élèves « Le jour de l'incendie et les 4 jours suivants, vous avez »	95
Figure 56 : évocation d'expérience sensorielle dans le texte demandé à la question " Écrire ce que vous avez ressenti suite à l'incendie Lubrizol " (ou une liste d'au moins 5 mots ou expressions)	95
Figure 57: Intensité des émotions en septembre 2019 et juin 2020 pour l'ensemble des jeunes sous nuage et hors nuage	96
Figure 58 : intensité des émotions chez les collégiens en septembre et juin	97
Figure 59 : intensité des émotions chez les lycéens en septembre et juin	97
Figure 60 : fréquence lexicale des mots émotionnels dans le texte écrit par les collégiens et lycéens	98
Figure 61 : analyse lexicale par nuage de mots pour les collégiens	98
Figure 62 : La régulation émotionnelle	99
Figure 63 : canal d'informations par lequel collégiens et lycéens ont appris l'incendie Lubrizol	100
Figure 64 : 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	101
Figure 65 : Répartition des enquêtés selon leur lieu de vie, de cabinets Réalisées par Mélodie Delamare (Ingénieure d'Étude Géographie)	104

Index des tableaux

Tableau 1 : Diagramme de Gant du projet COP HERL	12
Tableau 2 : Budget du projet COP HERL	14
Tableau 3 : Etat d'avancement des objectifs de la phase 1	16
Tableau 4 : Classes et longueur de rugosité.	18
Tableau 5 : Classes de stabilité de Pasquill	20
Tableau 6 : Paramètres du terme source de fumées	22
Tableau 7 : Performances de calcul pour un point de fonctionnement.....	22
Tableau 8 : Récapitulatif des échantillons de suies analysés durant la phase 1	28
Tableau 9 : Méthodes d'acquisition utilisées pour la caractérisation des anions et cations présents dans l'échantillon Fond Du Val	29
Tableau 10 : Détermination de la limite de quantification en ppm des anions et cations caractérisés.....	30
Tableau 11: Teneurs en anions de l'échantillon Fond Du Val avec et sans dilution. La concentration réelle des ions est obtenue en prenant en compte la différence d'aire entre le blanc et l'échantillon.	31
Tableau 12 : Teneurs en cations de l'échantillon Fond Du Val avec et sans dilution. La concentration réelle des ions est obtenue en prenant en compte la différence d'aire entre le blanc et l'échantillon.	32
Tableau 13 : Concentration en mg/L et teneur en ions en mg/g de suies	32
Tableau 14 : Paramètres LDI FTICR MS des échantillons de suie Préaux, Fond-Du-Val et Quincampoix	37
Tableau 15 : Conditions d'analyse pour les échantillons de suie	39
Tableau 16 : Exemple de formules brutes de l'échantillon Fond Du Val et Préaux pour les classes HC, CHO ₃ et CHO ₄ . Ces ions font partie des plus intenses de chaque classe.....	44
Tableau 17: Exemple de formules brutes de l'échantillon Fond Du Val et Préaux pour les classes CHO ₂ Ca, CHO ₃ Ca et CHO ₄ Ca. Ces ions font partie des plus intenses de chaque classe.	46
Tableau 18 : Exemple de formules brutes des échantillons Préaux et Quincampoix pour les classes CHO ₂ K, CHO ₃ K et CHO ₄ K. Ces ions font partie des plus intenses de chaque classe.	47
Tableau 19 : Exemple de formules brutes des échantillons Fond du Val, Préaux et Quincampoix pour les classes CHO ₂ Na, CHO ₃ Na et CHO ₄ Na	48
Tableau 20 : HAPs retrouvés dans les échantillons de suie provenant des résidus carbonés	51
Tableau 21 : Recherche ciblée de composés oxygénés et azotés à partir des résultats obtenus dans l'air	52
Tableau 22 : Recherches non ciblées de composés oxygénés et azotés	53
Tableau 23 : Composés soufrés retrouvés dans les échantillons de suie à partir des résultats de la partie air	54
Tableau 24 : Recherche ciblée de composés phosphorés	54
Tableau 25 : Recherche non ciblée de composés phosphorés	55
Tableau 26 : Échantillons d'air prélevés dans la semaine suivant l'accident (2019).....	57
Tableau 27 : Échantillons d'air prélevés en 2021	58
Tableau 28 : Conditions d'analyse pour les échantillons d'air	58
Tableau 29 : HAP retrouvés dans les échantillons d'air.....	60
Tableau 30 : Composés oxygénés et azotés retrouvés dans les échantillons d'air	61
Tableau 31 : Composés soufrés retrouvés dans les échantillons d'air	63
Tableau 32 : Composés phosphorés et fluorés retrouvés dans les échantillons d'air	64
Tableau 33 : Description de la population * : entre la date de l'incendie et la date de prélèvement	73
Tableau 34 : Dosage des HAP et des métabolites (pg/mg)	74
Tableau 35 : Dosage des métaux (concentrations en ng/mg)	79
Tableau 36 : Grandes parties et thématiques des questions de l'enquête comportements	82
Tableau 37 : caractéristiques socio professionnelles des enquêtés (février-juillet 2020)	103

1 Préambule

L'accident 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 la situation et l'évolution du risque pour les populations. Après avoir écarté le risque aigu, un protocole de suivi renforcé des milieux environnementaux (air, sol, végétaux, denrées alimentaires, eaux de surface 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 sur ce territoire parmi les plus investigués de France de pollution reliée à l'incendie. 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 éventuelles pollutions 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 les industries polluantes et dangereuses, 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), des biologistes, des spécialités de sciences humaines et sociales (sociologues, économistes...) pour la perception des risques et de la gestion de crise. Les laboratoires de recherche universitaires normands 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. Le projet COP HERL fédère 19 laboratoires normands 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. Au-delà de la réponse aux questionnements soulevés par l'incendie, le projet COP HERL doit permettre une structuration de la recherche normande capable de répondre à des AAP nationaux et internationaux.

2 Objectifs et attendus

La plupart des très nombreuses analyses réalisées durant l'incendie et le suivi renforcé des mois suivants ont été effectuées dans le but d'identifier certaines molécules ciblées présentant un risque pour l'Homme et l'environnement. Dans le cas de cet incendie, qui a permis de mélanger un nombre de réactifs importants dans des conditions de feu intense, la possibilité de création de molécules complexes mal voire pas connues est probable de sorte que les seules analyses ciblées ne permettent pas d'obtenir une vision totale des produits et sous-produits issus de l'accident. Il faut alors mettre en place des analyses non-ciblées permettant de caractériser l'ensemble de la composition atomique de l'échantillon pour ensuite identifier les molécules et fonctions moléculaires des produits présents. C'est cette double identification atomique et moléculaire par le croisement de techniques analytiques ciblées et non-ciblées, non utilisée dans le cadre des suivis réglementaires utilisés dans le cadre de la procédure d'urgence et de suivi renforcé, qui sera déployée dans le cadre du projet COP HERL et qui fait sa plus-value et sa spécificité.

Les objectifs portent sur les questions suivantes :

- Quels sont les produits qui ont été émis lors de l'incendie et peut-on dégager des marqueurs spécifiques ?
- Comment se sont réalisés la progression et la dispersion du panache et le rabattement des suies ?
- Quelle peut être la contamination des sols, des sédiments et des eaux de surface et souterraine et peut-elle être différenciée du "bruit de fond" enregistré sur le territoire avant l'accident ? Quelle sera son évolution dans le temps ?
- Quels sont les produits qui peuvent présenter une toxicité ? et laquelle ?
- Quelle est l'exposition de la population aux éventuelles contaminations ?
- Quelle est 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 résultats escomptés sont les suivants :

- Les analyses ciblées et non-ciblées des échantillons prélevés lors de l'accident sur les différentes matrices (suies, sols, sédiments, eaux), ainsi que le rejeu de l'incendie avec des produits « type Lubrizol » dans une enceinte confinée devront permettre d'identifier des marqueurs. Leur comparaison permettra de vérifier la représentativité du feu simulé.
- La simulation complexe de la progression du panache de fumée en intégrant les conditions atmosphériques et la simulation du rabattement des suies permettra de redéfinir la cartographie des retombées qui sera croisée par des données terrain.
- La caractérisation de l'imprégnation de l'environnement aux marqueurs de l'incendie ainsi qu'aux contaminants provenant de l'activité humaine actuelles et passées. La transformation, la dégradation et le transfert de ces produits et sous-produits seront suivis au sein des bassins versants.
- Le potentiel dangereux des marqueurs sera évalué par analyse bibliographique, mesuré expérimentalement par des approches in vitro sur cellules pulmonaires et sur la fertilité.
- Un diagnostic précis des processus sociaux qui se sont joués au moment de la crise et des propositions pour améliorer le champ de la communication en situation de crise sera réalisé à partir d'une série d'enquêtes afin de fournir un retour d'expérience pour définir des stratégies de gestion de crise.
- Une analyse des effets socio-économiques à moyen terme de l'accident sur le système urbain rouennais permettra d'identifier des axes de développement de la résilience.
- Une analyse comparative de la perception du risque au regard de sa caractérisation scientifique permettra d'améliorer la compréhension des réactions sociales.

Le projet COP HERL est résolument pluridisciplinaire avec l'implication de chercheurs en sciences physiques, chimiques, environnementales, médicales et humaines. Mais il vise aussi à développer une recherche interdisciplinaire où les résultats des différents questionnements disciplinaires deviennent la base du questionnement des autres disciplines. La problématique interdisciplinaire développée dans le projet COP HERL 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.

Le caractère innovant de COP HERL réside à la fois dans les méthodologies analytiques développées dans le projet et dans l'ampleur de la multidisciplinarité engagée avec une vingtaine de laboratoires et une centaine de personnels physiciens, chimistes, environnementalistes, médecins, biologistes, géographes, économistes, sociologues et psychologues. Cette multidisciplinarité sera 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 servira de fil directeur au projet afin de comprendre

les mécanismes qui fondent l'opinion des populations par rapport aux faits établis et à leurs incertitudes dans le but d'améliorer la gestion des crises futures par une communication adaptée.

Sur les aspects analytiques, l'innovation du projet est caractérisée d'une part par l'utilisation de méthodologies de haut niveau d'analyses ciblées et non-ciblées et par le développement d'approches nouvelles comme :

- Une enceinte confinée pour rejouer l'incendie,
- Des analyses par le FTICR le plus puissant de France combinés aux analyses ciblées à haute résolution pour caractériser tous les atomes et molécules présentes dans les échantillons,
- Des développements méthodologiques pour l'extraction des marqueurs et contaminants dans les matrices,
- Des suivi source to sink dans l'hydrosystème des marqueurs et contaminants,
- Des reconstitutions historiques du bruit de fond urbain de contamination des 50 dernières années par carottage sédimentaire,
- Une organisation de la bancarisation des données avec mise en place de la démarche qualité « FAIR » permettant la traçabilité, le partage et l'interopérabilité des données,
- Une 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,
- Des 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

3 Structuration, calendrier et livrables du projet COP HERL

Le projet COP HERL s'inscrit comme un projet de territoire dont l'enjeu est d'apporter des réponses scientifiques à l'ensemble des acteurs du territoire 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 une approche multi et inter-disciplinaire mettant en jeu des chimistes, des spécialistes de la santé, de la combustion, des environnements naturels, des Sciences Humaines et Sociales. Il vise à caractériser le risque industriel en identifiant les produits spécifiquement générés par l'incendie (WP1.1) et leur dispersion atmosphérique (WP1.2) 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 méfiance et de rejet qu'il convient d'analyser afin d'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.

La première phase du projet (Novembre 2020-décembre 2021) a eu pour enjeux de répondre aux actions prioritaires les plus urgentes.

Le projet global (sur 3 ans : Novembre 2020-décembre 2023) a ainsi pour enjeux d'apporter les éléments 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
- Cartographie du bruit de fond des contaminants avant l'incendie, cartographie de l'exposition aux contaminants spécifiques, flux hydrosédimentaires annuels et temps de séjour des contaminants 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 résidents en zone industrielle et non industrielle et impact sur la fertilité
- 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.

Un rapport sera remis aux financeurs pour décrire les résultats à la fin de cette première phase. Sur la durée totale du projet (3 ans), les coordinateurs s'assureront que les partenaires valorisent leur travail en publiant dans des revues scientifiques soumises à l'examen des pairs ou en participant à des colloques ou conférences scientifiques. Le laboratoire M2C coordinateur et ses partenaires s'efforceront également de faire connaître et de promouvoir l'ensemble des travaux auprès des financeurs et d'autres partenaires institutionnels intéressés et du grand public au travers de la mise en place d'un site internet du projet, d'une plaquette de vulgarisation des résultats et de l'organisation d'un colloque final de restitution.

Le Projet COP HERL a également pour enjeu de structurer la recherche normande sur le thème du risque et de la résilience territoriale. Dans le cadre de la création d'un observatoire régional multirisques ayant pour objectif de fédérer les différents acteurs locaux sur la caractérisation et la maîtrise des risques technologiques, environnementaux, sanitaires et sociétaux, le projet COP HERL constitue les prémices d'une recherche universitaire multi et inter disciplinaires sur ces thèmes.

L'incendie, outre la mise en lumière des risques industriels importants liés à la présence d'usines SEVESO seuil haut au sein de la métropole, a installé un climat de défiance envers les représentants de l'Etat et les industriels entraînant la remise en cause des actions de contrôles et des résultats scientifiques et techniques des suivis réalisés. **Le projet COP HERL de par son expertise, son indépendance et son emprise locale suscite une attente sociétale importante. La diffusion régulière auprès des citoyens des interprétations scientifiques et la possible création d'un observatoire citoyen de sciences participatives, pourraient être à même de restaurer un climat de confiance ainsi qu'une réappropriation par la population des enjeux et risques de leur territoire.**

Le projet COP HERL fédère une centaine de chercheurs répartis dans 19 laboratoires (Figure 1) s'organise autour de 4 work packages (WP) (Figure 2).



Figure 1 : Structures et laboratoires participants au projet COP HERL

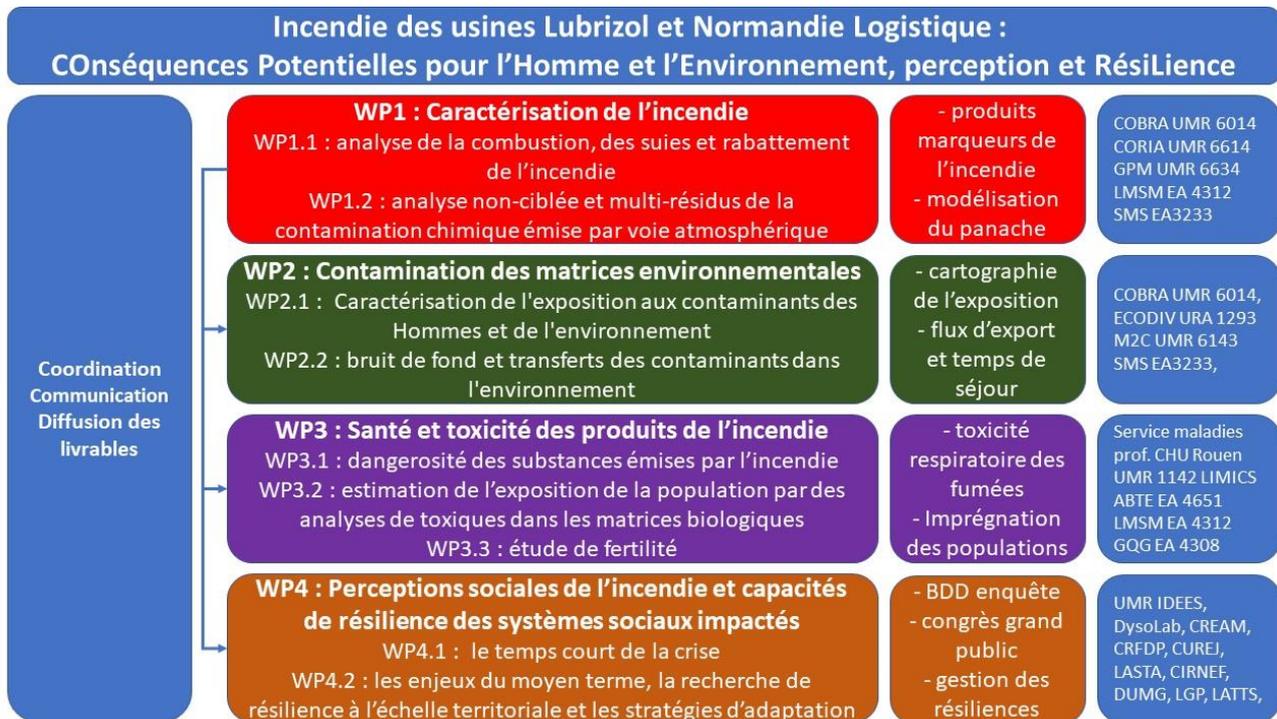


Figure 2 : Structuration du projet COP HERL

Outre les personnels permanents de l'Université de Rouen Normandie, 6 post-doctorants, 3 ingénieurs de recherches et 8 ingénieurs d'études, 1 attaché de recherches puis 1 technicien seront recrutés pour les tâches suivantes (Tableau 1) :

WP1

- 1 Post-Doc 2 ans mutualisé pour les différentes tâches expérimentales du CORIA
- 1 Post-Doc 2 ans pour analyser les matrices complexes par FTICR au COBRA
- 1 Ingénieur d'études 1an pour analyses chimiques au SMS

WP2

- 2 Post-doc (2*6mois) 1an mutualisé pour les prélèvements et analyses au M2C
- 1 Ingénieur d'études 1an pour analyses chimiques au SMS

1. Quels sont les produits toxiques qui ont été émis lors de l'incendie ? Peut-on identifier des marqueurs spécifiques issus de l'incendie ? Cette partie comprendra une identification physique et chimique des échantillons de suies récoltées sur le terrain et la reproduction des produits de combustion par expérimentation.

2. Comment s'est réalisée la progression du panache en fonction des conditions atmosphériques et le rabattement des suies ?

3. Comment peut-on améliorer la gestion de ce type de crise et développer des outils adaptés à ces situations d'urgence ?

WP2 : Contamination des matrices environnementales

1. Caractérisation du bruit de fond et différenciation par rapport aux marqueurs spécifiques issus de l'incendie.

2. Cartographie de l'exposition des Hommes et de l'environnement aux contaminants (marqueurs).

3. Flux d'export annuel des contaminants depuis les matrices environnementales

4. Temps de séjour des contaminants dans l'environnement

WP3 : Santé et toxicité des produits de l'incendie

1. Mesures des concentrations de 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, en comparant la concentration avant et après l'incendie de Lubrizol.

2. Aide à l'interprétation des résultats des analyses chimiques

3. Evaluation de la toxicité respiratoire des fumées d'incendie par une approche in vitro

4. Evaluation de la virulence bactérienne après exposition expérimentale à des fumées d'incendie

WP4 : Perceptions sociales de l'incendie et capacités de résilience des systèmes sociaux impactés

1. Une base de données en open-data sur la population générale et les comportements

2. Un retex sur les comportements des populations en situation de crise.

3. Un diagnostic de la communication de crise.

4. Un plan de communication de crise adapté à la gestion des accidents industriels régionaux.

5. Plaquettes de 4 à 8 pages synthétisant les résultats obtenus pour le grand public.

6. Organisation de colloques.

La communication liée au projet COP HERL possèdera 3 dimensions (interne au projet, interne à l'URN et externe) et 3 natures (scientifique, institutionnelle, citoyenne).

- La communication interne au projet sera sous la responsabilité de la coordination et se fera par une lettre d'information trimestrielle en direction de la centaine de personnels du projet.
- La communication interne à l'URN sera sous la responsabilité du service communication de l'établissement et se fera à travers les lettres d'informations aux personnels et usagers.
- La communication externe sera sous la responsabilité du comité de pilotage qui définira la stratégie de diffusion des résultats en amont de ceux-ci sans altérer la transparence du projet mais pour assurer la primauté de l'information dans un but d'anticipation des réponses à apporter.
- La communication scientifique sera sous la seule responsabilité des personnels de recherche liés aux projets.
- La communication institutionnelle sera sous la responsabilité du comité de pilotage.
- La communication citoyenne sera en direction du comité des acteurs et sera définie par le comité de pilotage à travers le choix des prérogatives données à l'observatoire citoyen de sciences participatives.

La stratégie de communication sera déployée selon les choix opérés par le comité de pilotage au travers :

- d'un site Internet dédié au projet mis en place au début de la phase 2,
- d'un dossier de presse rédigé par le service communication de l'URN
- de communiqués de presse rédigés par le service communication de l'URN selon les événements (colloques, rapports, création de l'observatoire citoyen)
- de colloques annuels de restitution,
- de rapports scientifiques vulgarisés
- animation du comité des acteurs
- initiation de l'observatoire citoyen de sciences participatives

Des rapports annuels seront remis aux financeurs pour décrire l'avancement du projet. Des rapports intermédiaires pourront également être produits sur demande si cela s'avère nécessaire.

Les coordinateurs s’assureront que les partenaires valorisent leur travail en publiant dans des revues scientifiques soumises à l’examen des pairs ou en participant à des colloques ou conférences scientifiques. Le laboratoire M2C coordinateur et ses partenaires s’efforceront également de faire connaître et de promouvoir l’ensemble des travaux auprès des financeurs et d’autres partenaires institutionnels intéressés au travers de la mise en place d’un site internet du projet et de l’organisation d’un colloque final de restitution. Ceci permettra de donner une visibilité au projet et à ses productions, tant pour le public scientifique / technique qu’opérationnel. Le budget du projet COP HERL est de 1,3631 million d’Euros.

Tableau 2 : Budget du projet COP HERL

	BUDGET FINAL	URN	PHASE 1 REGION	PHASE 2 REGION (60% FEDER)	MRN	ANR (Région)
TOTAL	1 363.1	100	300	740.6	86	136.5
EQUIPEMENT	206	100	40	53		13
FONCTIONNEMENT	331.5		103	177		51.5
MISSION, DEPLACEMENT	24		13	11		
PERSONNEL (dont primes de précarité)	801.6		144	499.6	86	72

Le projet COP HERL est structuré (Figure 3) autour d’une coordination assurée par Benoît Laignel et Matthieu Fournier assistés d’un chargé de projet de l’Université de Rouen Normandie, formant, avec les représentants de la Région Normandie, de la Métropole Rouen Normandie et des services de l’URN, le comité technique chargé de suivre le cadrage du projet. La gestion financière du projet sera assurée par le service administratif compétent de l’Université de Rouen Normandie. De même, les recrutements seront réalisés avec le Service RH de l’Université de Rouen Normandie. Ce comité se réunira semestriellement le mois précédent le colloque de restitution annuel pour discuter de la stratégie de communication des résultats puis le mois suivant le rapport annuel d’étape afin de présenter les avancés du projet.

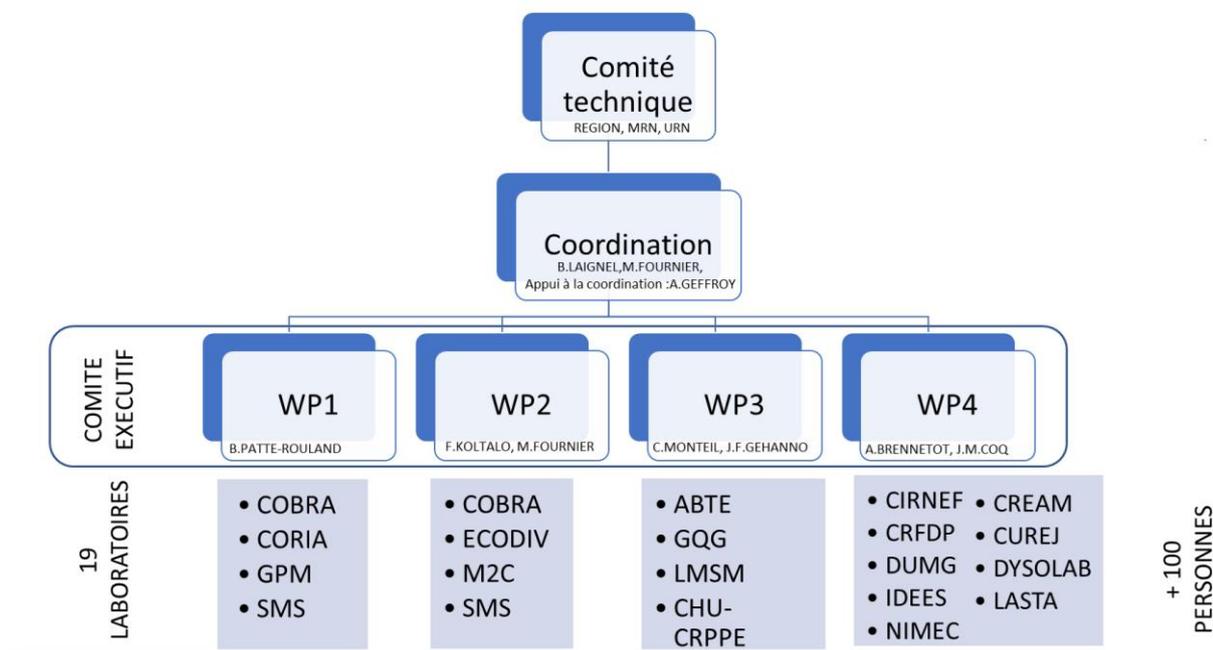


Figure 3 : Organisation du projet COP HERL

Les coordinateurs avec les responsables des 4 work packages (WPL) formeront le comité exécutif chargé d’assurer le bon déroulement des phases du projet ; chaque WPL ayant pour objectif d’être à la fois le relai entre la coordination et les acteurs de leur WP mais également d’assurer la bonne exécution des tâches de leur WP et de faire remonter les difficultés aux coordinateurs. Le comité exécutif se réunira trimestriellement afin d’assurer le bon déroulement du projet et son phasage mais également de coordonner les actions interdisciplinaires. Ces réunions permettront de s’assurer de

l'avancement des travaux et des livrables en temps voulu par rapport au calendrier défini, d'identifier éventuellement certains retards et de faire de potentiels ajustements. Ces réunions permettront également de préparer les documents administratifs (rapports scientifiques, rapports financiers, ressources) et de communiquer auprès des financeurs. Des rapports annuels seront remis aux financeurs pour décrire l'avancement du projet. Des rapports intermédiaires pourront également être produits sur demande si cela s'avère nécessaire.

Il est proposé de constituer un comité des acteurs réunissant les différents protagonistes du territoire (administrations, agences d'état et territoriales, usagers, citoyens, industriels). Sa composition et ses prérogatives seront discutés en comité de pilotage avec pour objectif de créer un observatoire citoyen de sciences participatives intégré au comité des acteurs mais indépendant de celui-ci. Cet observatoire pourrait permettre de mobiliser des compétences et expertises citoyennes, d'échanger sur des connaissances et retour d'expérience et de transférer à la société civile les résultats du projet. Aussi, ces membres pourraient être mis à contribution pour répondre aux questionnaires sur l'évolution de la perception du risque au regard des connaissances sur la réalité physico-chimique, environnemental, et sanitaire de celui-ci suite aux résultats du projet COP HERL. Ce comité des acteurs a pour objectif d'interagir avec les responsables de la gestion du territoire afin d'échanger sur leurs connaissances et qu'ils s'approprient les résultats dans leur retour d'expérience dans la finalité de développer la résilience du territoire. Le comité des acteurs se réunira semestriellement. En marge du projet mais intégré au comité des acteurs tout en lui étant indépendant, il est proposé d'initier la création d'un observatoire citoyen de sciences participatives avec pour objectif de mobiliser l'expertise citoyenne, partager les connaissances aux populations, restaurer la confiance et développer la résilience. Des représentants de cet observatoire intégreront le comité des acteurs.

4 Livrables de la phase 1 : 2020-2021

Les résultats et livrables attendus de la phase 1 du projet concernaient :

- Premiers résultats sur les marqueurs spécifiques issus de l'incendie. Cette partie comprendra une identification physique et chimique des échantillons de suies récoltées sur le terrain
- Premiers résultats sur la progression du panache en fonction des conditions atmosphériques et le rabattement des suies
- Premiers résultats sur la caractérisation du bruit de fond et différenciation par rapport aux marqueurs spécifiques issus de l'incendie
- Premiers résultats sur les mesures des concentrations de 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, en comparant la concentration avant et après l'incendie de Lubrizol-NL
- Résultats des premières enquêtes auprès des acteurs de l'éducation et de la santé et sur la réaction des populations en situation de crise

L'état d'avancement de la phase 1 par rapport aux objectifs annoncés est bon (Tableau 3) ; seuls 2 aspects présentent des limites : le carottage pour la définition du bruit de fond qui est incomplet suite à une casse de matériels rendant impossible les prélèvements dans la darse aux bois et des docks puis le dosage des cheveux dont certains n'ont pas permis une comparaison avant-après par manque de matière. Le prélèvement de la carotte sédimentaire dans les darses auront lieu dès que possible durant la phase 2.

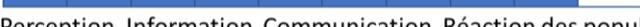
Tableau 3 : Etat d'avancement des objectifs de la phase 1

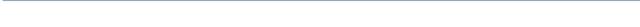
- Simulation chronologique de la dispersion et du rabattement des particules présentes dans le panache de fumées (WP1),

- Analyses non ciblées des polluants présents sur les suies générées lors de l'accident (WP1),

- Analyses multi-résidus de la fraction gazeuse émise et collectée durant l'incendie (WP1),

- Installation des stations de mesures et des points de prélèvement, carottages pour définition du bruit de fond (WP2),

- Analyse des métaux et hydrocarbures aromatiques polycycliques dans les cheveux (WP3),

- Perception, Information, Communication, Réaction des populations (WP4),

- Réactions d'acteurs locaux en situation de responsabilité : l'enseignement et le corps médical (WP4).


5 Résultats du WP1 : caractérisation de l'incendie

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

5.1.1 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 Logistiques de Rouen du 26 septembre 2019. Pour y répondre, nous avons choisi de réaliser une simulation aux grandes échelles (ou Large Eddy Simulation en anglais) avec le code de calcul YALES2 développé au 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 multiphasiques ...).

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 4. 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.

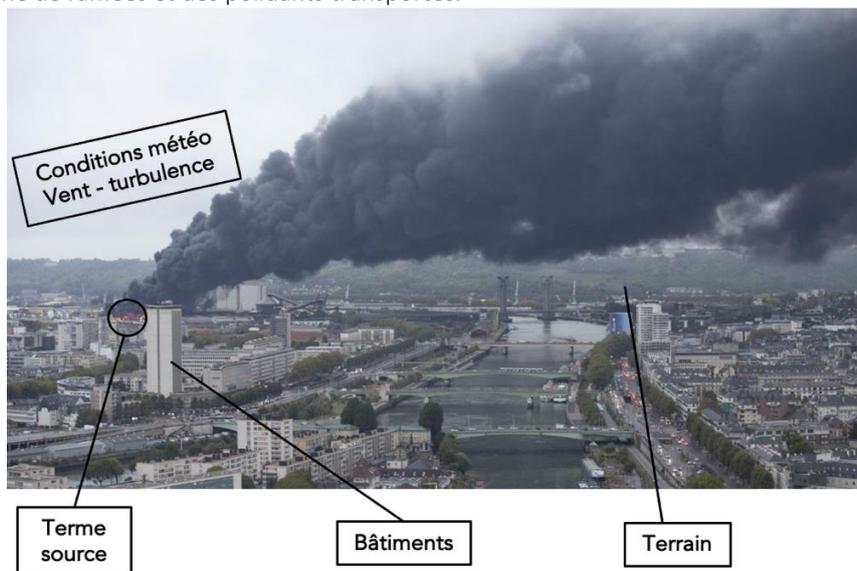


Figure 4 : Représentation schématique des phénomènes physiques à modéliser dans le cas d'une étude sur la dispersion de polluants.

Dans ce rapport on commencera par décrire la manière dont nous avons pris en compte ces différents aspects dans notre calcul avant de décrire plus en détails les résultats obtenus.

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

5.1.2 Set up Numérique

5.1.2.1 Topographie et Maillage

La première étape de ce travail a consisté à extraire la topographie de notre zone d'intérêt. Pour cela, nous avons utilisé le logiciel Blender, une fois doté du plugin BlenderGIS, pour générer des fichiers STL contenant la topographie d'une zone géographique via une base de données (au choix parmi Géoportail, OpenStreetMap, Google Maps...), Figure 5.

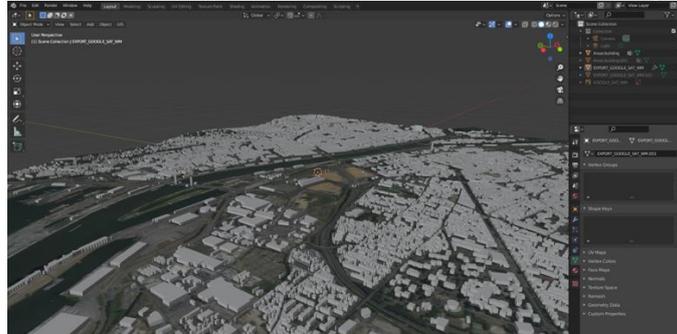


Figure 5 : Capture d'écran du logiciel Blender

Ainsi deux zones centrées autour de l'usine Lubrizol ont été extraites : une de 5x5km (A) et une de 10x15km (B), Figure 6. Nous avons également la possibilité d'insérer les bâtiments sur la topographie étudiée mais ceci s'est avéré trop coûteux en nombre de mailles et n'est donc pas utilisé à ce jour. On tient compte des effets de la présence de ceux-ci dans la modélisation de la couche limite au niveau du sol qui intègre une longueur de rugosité. Cette dernière est déterminée par des critères qualitatifs (la forme du paysage), Tableau 4.

Tableau 4 : Classes et longueur de rugosité².

Type de paysage	Classe de rugosité	Longueur de rugosité z_0 (en m)
Mer ouverte, "Fetch" d'au moins 5 km		0.00002
Surface d'eau	0	0.0002
Terrain complètement dégagé avec une surface lisse, p.ex. une piste d'atterrissage en béton ou de l'herbe fraîchement coupée	0.5	0.0024
Terrain agricole dégagé, sans clôtures ou haies vives, et avec très peu de constructions. Seulement des collines doucement arrondies	1	0.03
Terrain agricole avec quelques constructions et des haies vives de 8 m de haut situées à environ 1.250 m les unes des autres	1.5	0.055
Terrain agricole avec quelques constructions et des haies vives de 8 m de haut situées à environ 500 m les unes des autres	2	0.1
Terrain agricole avec beaucoup de constructions, arbrisseaux et plantes, ou des haies vives de 8 m de haut situées à environ 250 m les unes des autres	2.5	0.2
Villages, petites villes, terrain agricole avec de nombreuses ou de hautes haies vives, des forêts et un terrain très accidenté	3	0.4
Grandes villes avec de hauts immeubles	3.5	0.8
Très grandes villes avec de hauts immeubles et des grattes ciel	4	1.6

Pour ce premier calcul, nous avons choisi de nous focaliser sur la zone A. Avec de telles dimensions, on peut écartier d'au moins 1km la face d'entrée de l'écoulement de la zone de l'incendie pour laisser se stabiliser l'écoulement avant qu'il n'interagisse avec le panache. Et on peut ainsi simuler la dispersion du panache sur plus de 3km en aval de l'incendie.

² Wiki éolienne, <https://eolienne.f4jr.org/rugosite>

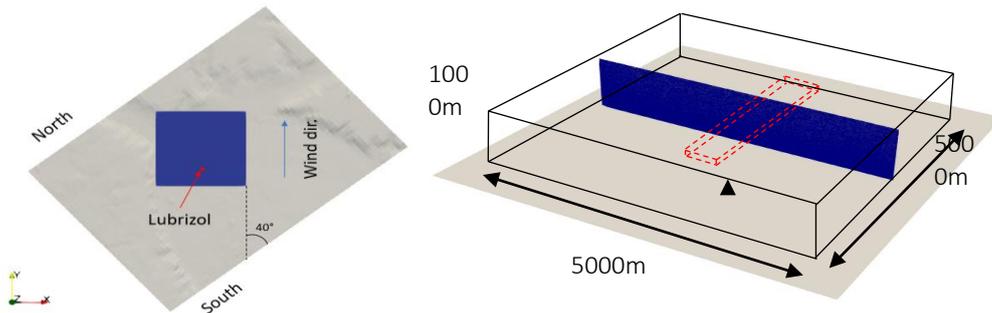


Figure 6 : Visualisation du volume fluide choisi.

Grâce aux outils développés dans la plateforme YALES2, nous avons directement pu utiliser le code et son module *grid_io_STL* pour générer le maillage basé sur la topographie précédemment extraite. Ce dernier, composé de tétraèdres, est non-structuré. Il est plus fin au niveau du sol car c'est dans cette zone que les gradients de vitesse sont les plus forts.

En fixant la plus petite taille de maille à 10m, le maillage que nous avons obtenu compte environ 50 millions d'éléments. Avant d'injecter le terme source, on peut se permettre de raffiner d'avantage le maillage autour de la zone d'injection et dans la direction privilégiée de propagation du panache pour résoudre au mieux les gradients et limiter la diffusion numérique. Ainsi, on obtient un maillage contenant environ 56 millions d'éléments, Figure 7.

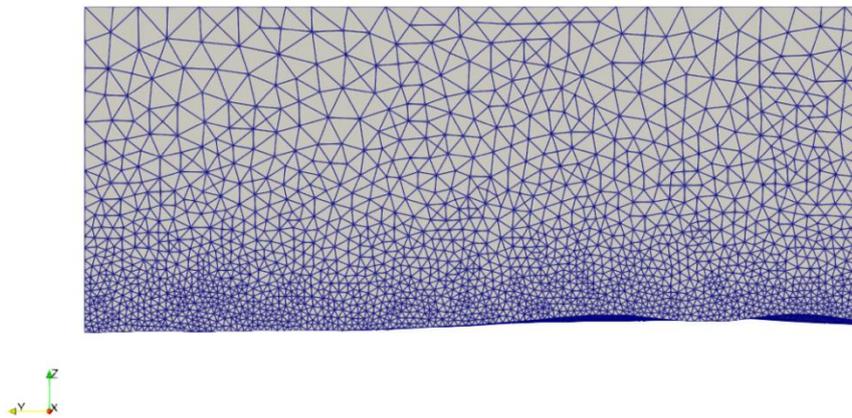


Figure 7 : Vue de côté d'une extrémité du maillage.

5.1.2.2 Données météorologiques et hypothèses simplificatrices

Les données météo issues de la base de données AROME (Météo France) nous ont permis de calculer la direction et la vitesse moyenne du vent à 100m d'altitude. Après avoir tracé l'évolution temporelle de celles-ci, Figure 8, nous avons constaté que la variation de direction du vent était de l'ordre de $\pm 5^\circ$ et que sa vitesse moyenne à 100m était de 9.1 m/s. Pour cette première étude, nous avons fait l'hypothèse simplificatrice que l'intensité ainsi que la direction du vent étaient constantes pendant l'incendie.

En ce qui concerne l'allure du profil de vitesse, nous avons adapter une loi puissance qui passe par le point de coordonnées [9.1m/s,100m] viz.

$$U(z) = 9.1 \left(\frac{z}{100} \right)^{0.13}$$

La puissance 0.13 est cohérente pour une atmosphère neutre et une vitesse proche du sol inférieure à 6 m/s³ On pourrait également se baser sur la hauteur de couche limite atmosphérique parfois fournie dans les données météo AROME pour corriger cette loi.

³ S. BASU, CFD for atmospheric flows and wind engineering. 2021

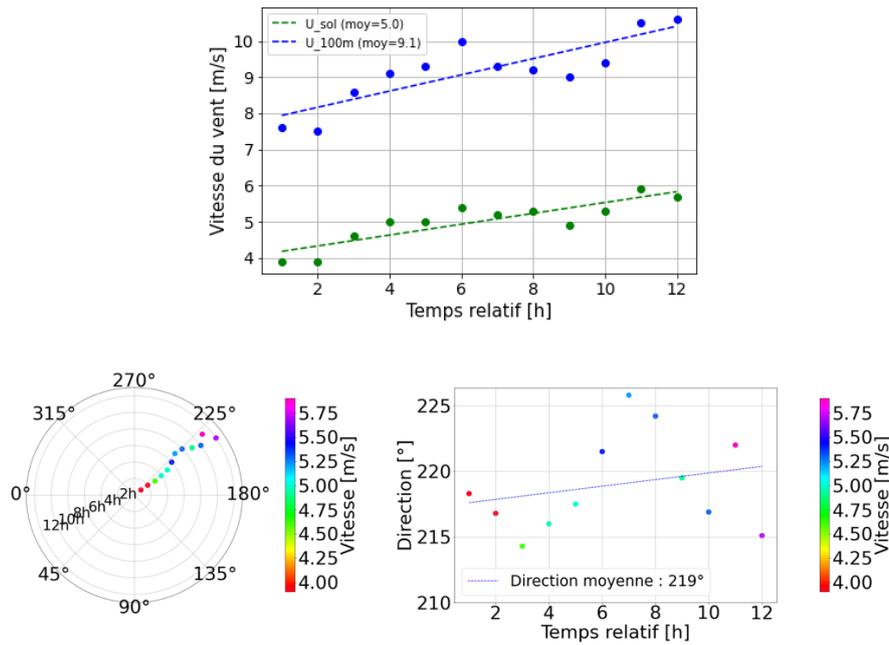


Figure 8 : Évolution temporelle et spatiale de la vitesse du vent (26/09/2019)

5.1.2.3 Modélisation de la turbulence atmosphérique

La notion de stabilité atmosphérique est définie par des critères qualitatifs et quantitatifs. L'atmosphère est dite neutre lorsque le vent est modéré et que le ciel est couvert⁴. Il existe 6 classes de stabilités, caractérisées par l'intensité de la turbulence\cite{modelisation-atmo-gauss}

- classe A : « très instable »
- classe B : « instable »
- classe C : « légèrement instable »
- classe D : « neutre »
- classe E : « stable »
- \ classe F : « très stable »

U_{vent} [m/s]	Jour (Rayonnement solaire)			Nuit (nébulosité)	
	Fort	Modéré	Léger	Couverture nuageuse $> \frac{1}{2}$	Couverture nuageuse $< \frac{1}{2}$
<2	A	A-B	B		
2 à 3	A-B	B	C	E	F
3 à 5	B	B-C	C	D	E
5 à 6	C	C-D	D	D	D
>6	C	D	D	D	D

Tableau 5 : Classes de stabilité de Pasquill

D'après ces critères, nous pouvons faire l'hypothèse d'une atmosphère neutre pour le jour de l'incendie et ainsi estimer l'intensité turbulente dans l'écoulement amont. En première approximation, nous avons choisi une injection de turbulence de type homogène et isotrope (THI) dont les caractéristiques sont déterminées empiriquement à partir de la classe

de Pasquill ie classe D \Leftrightarrow Intensité turbulente $\in [10\% ; 20\%]$. Néanmoins, les propriétés ce type de turbulence ne sont pas représentatives d'une vraie turbulence atmosphérique. De plus, elle se dissipe rapidement. Nous nous sommes donc dirigés vers une approche utilisée dans l'éolien qui consiste à injecter des boîtes contenant des fluctuations de vitesses dont le spectre est représentatif d'une turbulence atmosphérique⁵. Ces boîtes, appelées boîtes de Mann, sont calculées pour une atmosphère neutre et une longueur rugueuse représentative d'un environnement urbain dense, Figure 9.

⁴ A. VENKATRAM, An examination of the Pasquill-Gifford-turner dispersion scheme. 1995

⁵ J. MANN, Journal of Fluid Mechanics. 1994

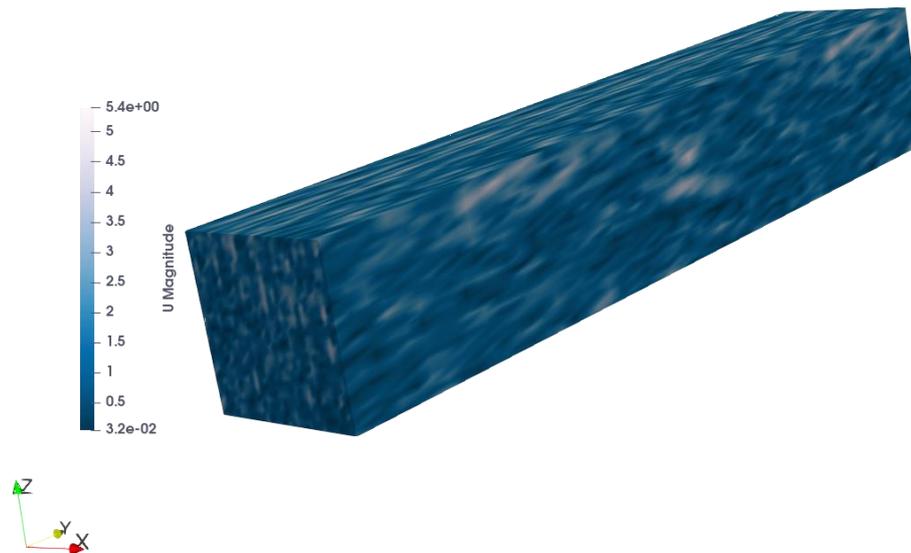


Figure 9 : Boîte de Mann.

5.1.2.4 Source des fumées

Dans notre étude, nous n'avons pas simulé l'incendie en tant que tel car le coût des calculs aurait été trop important. Nous avons donc seulement modélisé son « résultat » *ie* le dégagement de fumées produites dans l'écoulement ambiant. La fumée est vue comme une source de masse et de quantité de mouvement dans le domaine fluide.

Cette section décrit la manière dont nous avons estimé le débit de fumées et la hauteur à laquelle injecter celui-ci. Dans son rapport à l'ERS, l'INERIS⁶ nous fournit l'évolution temporelle de la surface du feu au sol lors de l'accident, Figure 10.

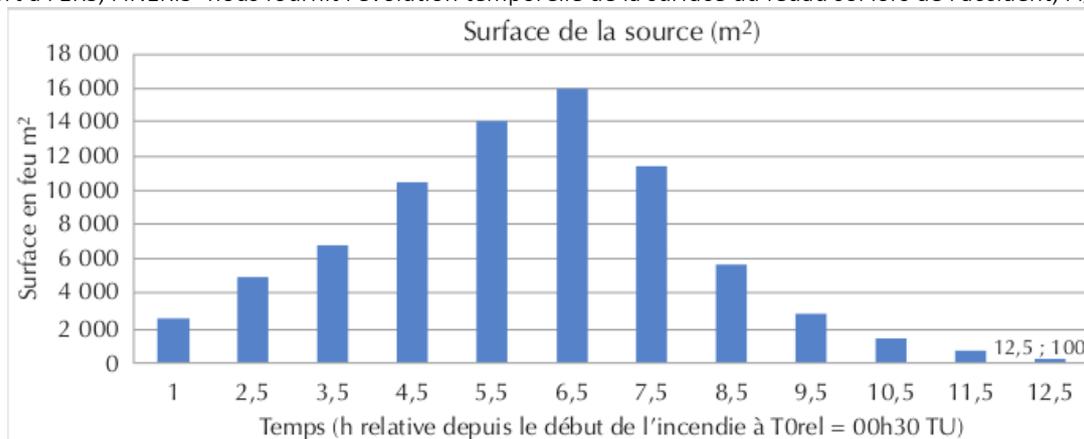


Figure 10 : Évolution temporelle de la superficie du feu

À l'aide de données comme l'énergie de combustion et la vitesse de combustion des produits chimiques impliqués, on peut remonter à la puissance convectée transmise aux fumées par les flammes. Dans la littérature, on retrouve souvent que le volume de suies produites est très faible devant volume total des gaz rejetés. On suppose donc négligeable la présence des suies dans la simulation. Les gaz en question sont en très grande majorité composés d'air chaud (estimé à 500K à l'éjection). Pour la suite, on prendra $\rho_{500K} = \rho_0 = 0.6 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$. Ensuite, à partir de corrélations empiriques⁷, nous pouvons déterminer le débit de fumées Q_{inj} leur vitesse maximale d'éjection U_{max} et la hauteur d'injection h_{inj} de celles-ci. On suppose l'équivalent compact d'un profil gaussien pour la vitesse (bump function) $U_{fumée} \propto U_{max} e^{-\beta x^2}$,

⁶ Rouil et al, Dispersion et impact des panaches de fumées d'incendies industriels : le cas de Lubrizol. Environnement, Risques & Santé. 2021

⁷ G.Heskestad, Engineering Relations for Fire Plumes, Fire Safety Journal. 1984 / INERIS, Formalisation du savoir et des outils dans le domaine des risques majeurs, Toxicité et dispersion des fumées d'incendie Phénoménologie et modélisation des effets, 16, DRA N° 46055-CL57149. 2005

Figure 11. On peut donc ensuite en déduire la surface sur laquelle on doit injecter les fumées telle que $Q_{inj} = \iint_{S_{inj}} U_{fumées}(r, \sigma) \cdot r \, dr \, d\theta = 2\pi \int_{r=0}^{R_{S_{inj}}} r \cdot U_{fumées}(r, \sigma) \, dr$.

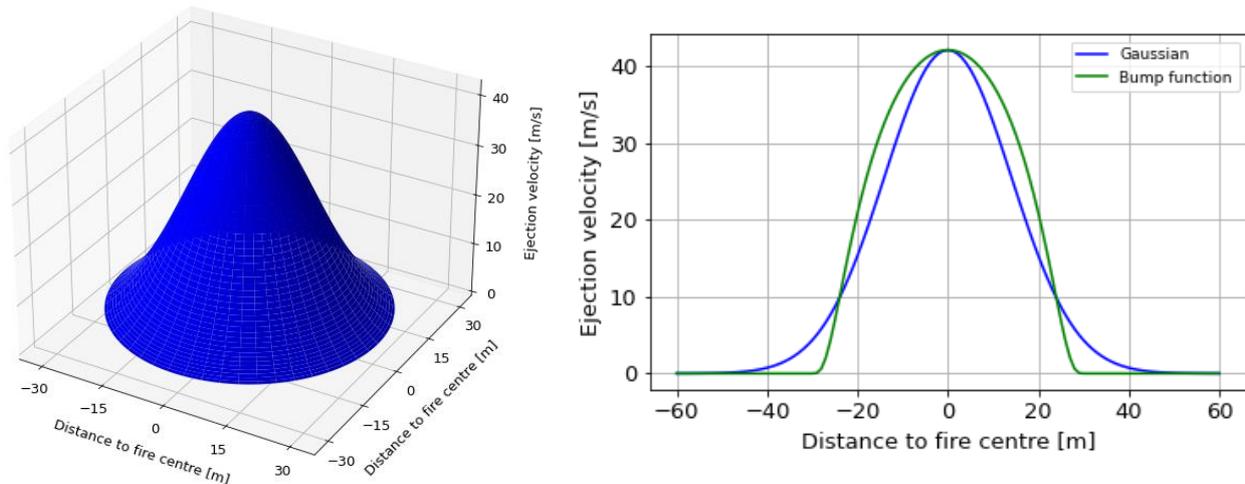


Figure 11 : Vue 3D du profil Gaussien 2D d'injection des fumées, gauche, et superposition de la Gaussienne et de la fonction à support compact (vue en coupe), droite.

Connaissant l'évolution temporelle (sur une dizaine de mesures) de la surface du feu, on peut en déduire l'évolution de la vitesse maximale et la surface d'éjection des fumées en fonction du temps. Dans un premier temps, nous avons choisi comme point de fonctionnement une puissance fixe correspondant à la période la plus dévastatrice de l'incendie *ie* là où la puissance du feu était maximale et où le dégagement de polluants était le plus intense. Les grandeurs qui nous intéressent pour ce cas sont réunies dans le Tableau 6.

Tableau 6 : Paramètres du terme source de fumées

Fonction (2D)	Définition	U_{max} (m/s)	Q_{inj} (kg/s)	β [m]	S_{inj} (m ²)
Support Compact	$U(r, \beta) = \begin{cases} U_{max} \exp\left(-\frac{1}{1-(\frac{r}{\beta})^2} + 1\right) & \text{si } r < \beta \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$	41.2	31100	31.16	3050

Une fois ces paramètres déterminés, nous avons adapté un outil développé pour l'éolien appelé *actuator disk*, initialement utilisé pour modéliser la force induite sur l'écoulement par les pales de l'éolienne. En pratique cela revient à ajouter des termes sources sur un disque virtuel de rayon égal à l'écart type β de la bump function déterminée précédemment et positionné à la hauteur h_{inj} dans notre domaine de calcul.

Les résultats obtenus dans la simulation rassemblant tous les paramètres numériques et physiques présentés jusqu'ici sont présentés dans la section suivante.

5.1.3 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 7.

Tableau 7 : 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

5.1.3.1 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.

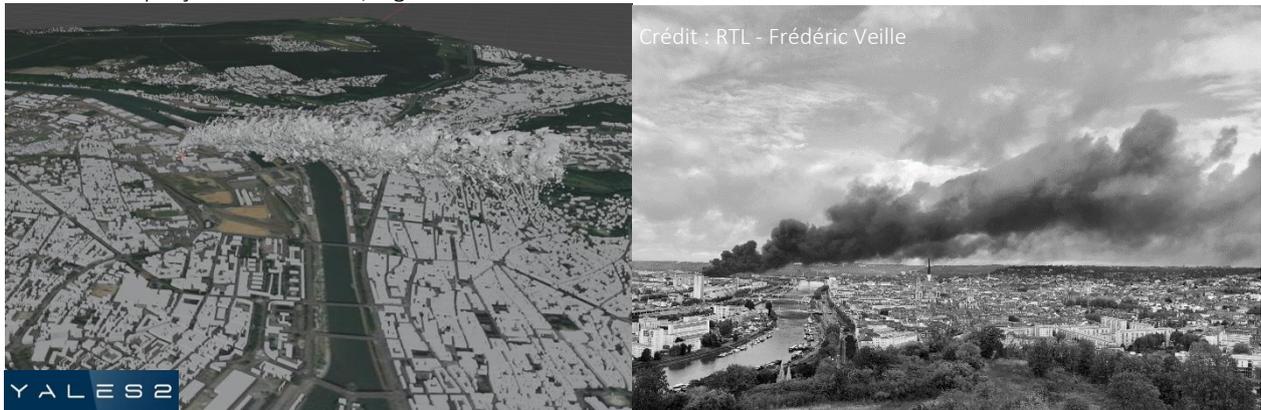


Figure 12 : Comparaison qualitative des panaches numérique et réel.

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.

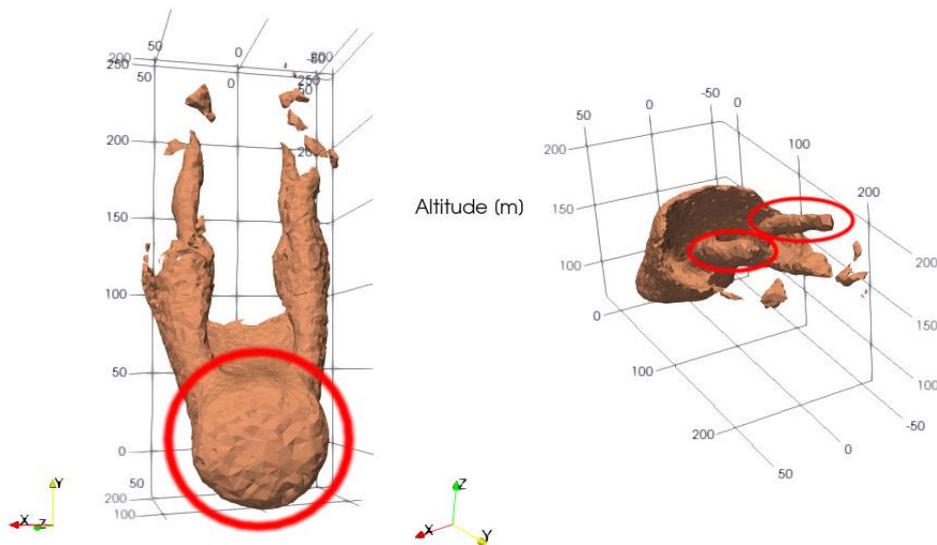


Figure 13 : Visualisation des deux structures au niveau de la source d'injection des fumées.

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

5.1.3.2 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 15. 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 15).

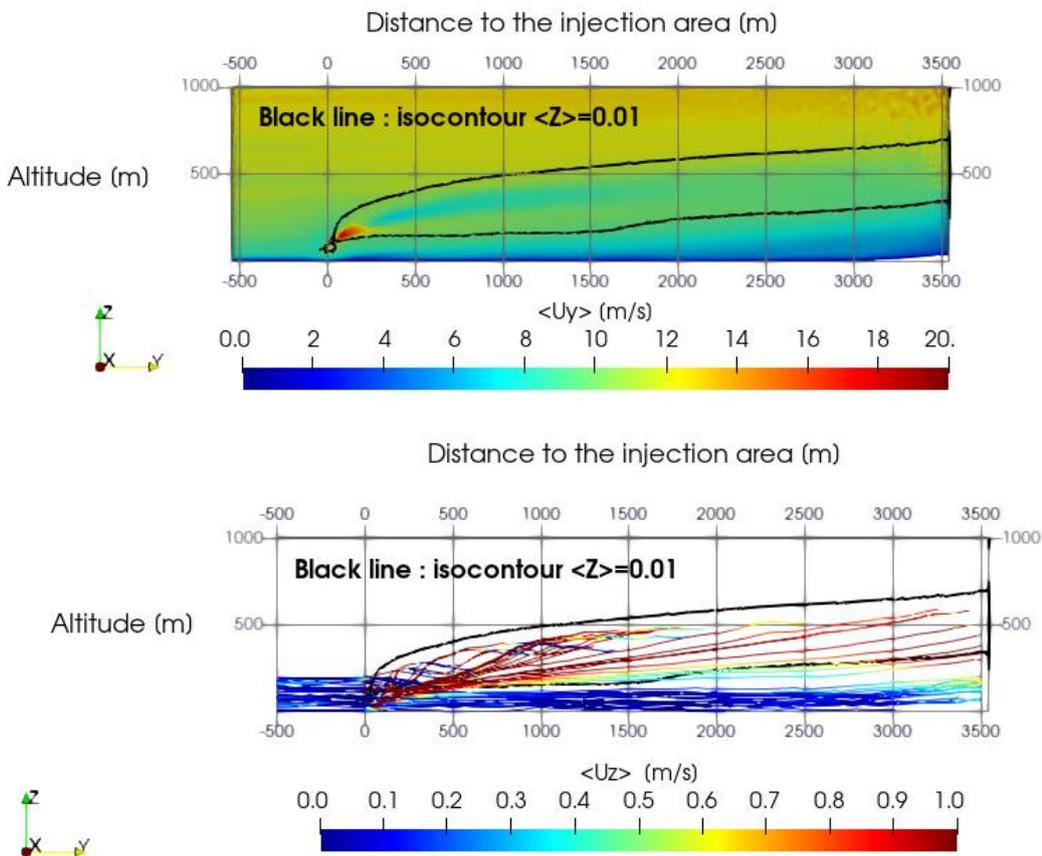


Figure 15 : Influence de la topographie sur les vitesses. Composante horizontale de la vitesse U_y (haut) et Composante verticale de la vitesse U_z (bas).

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 16. 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 extremums reflètent le mélange entre l'air ambiant et les fumées. La représentation des isocontours des valeur moyenne et instantanée de Z, nous permet de remarquer que le panache est légèrement excentré et semble dévier vers le Nord-Est.

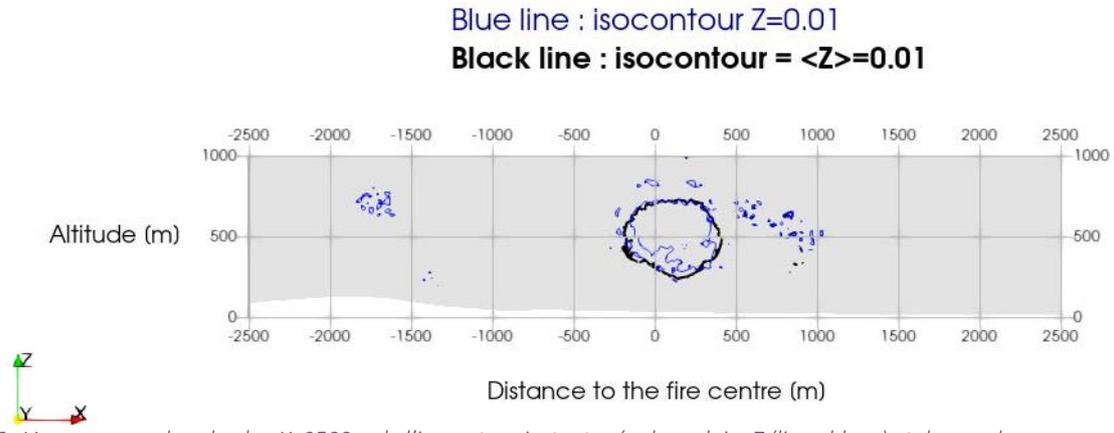


Figure 16 : Vue en coupe dans le plan $Y=3500$ m de l'isocontour instantanée du scalaire Z (ligne bleue) et de sa valeur moyenne (ligne noire).

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 $Y > 3500$ m, on s'attend à observer une élévation du panache à l'approche du relief et à une modification de sa trajectoire.

5.1.3.3 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 17. 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.

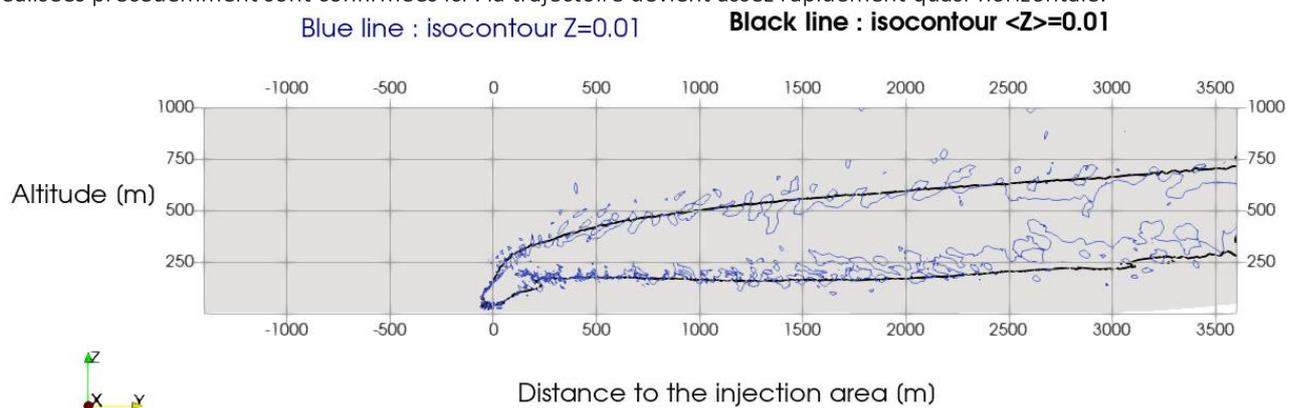


Figure 17 : Vue en coupe dans le plan $X=0$ m

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 pompiers⁸. 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

⁸ Colone J.Y. Lagalle rapporté par France Inter

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^9 et utilisé celle-ci pour valider nos résultats précédents et estimer la nouvelle altitude du panache à cette puissance moyenne, Figure 18. Cette fois -ci, l'altitude maximale obtenue (d'environ 475m) est tout à fait cohérente avec les observations des pompiers.

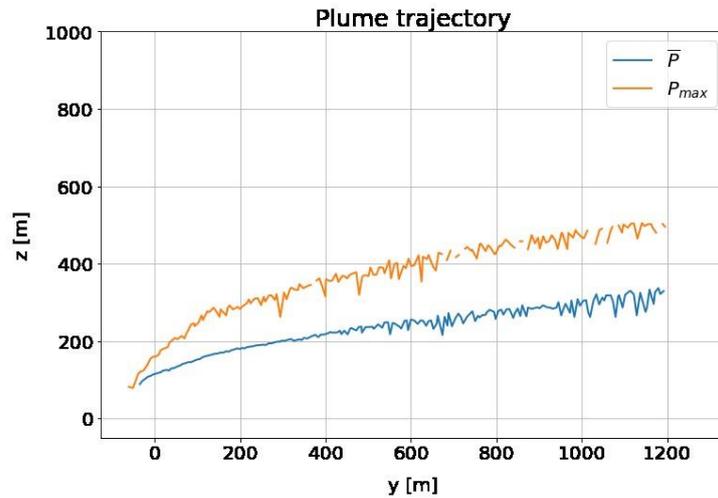


Figure 18 : Estimation de l'altitude du panache pour un terme source dimensionné sur la puissance maximale P_{max} et pour la puissance moyenne \bar{P} .

5.1.4 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 Logistiques. 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 premiers 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.

⁹ C. GARCIA GUILLAMON, ICLASS 2021

5.2 Analyses non ciblées des polluants présents sur les suies générées lors de l'accident

5.2.1 Échantillonnage

Plusieurs types d'échantillons de suies ont été récoltés durant les semaines qui suivirent l'accident : sur des lingettes Kimtech et sur des écouvillons stériles, des résidus carbonés récupérés directement sur le sol ainsi que des suies en suspension dans de l'eau.

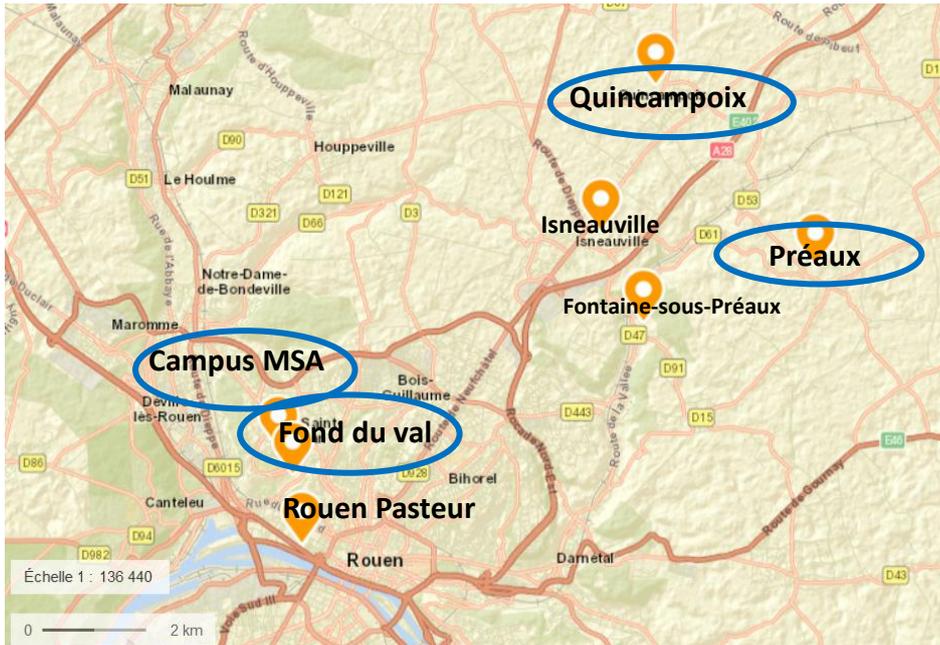


Figure 19 : Localisation des prélèvements

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. Les échantillons qui ont donné des résultats intéressants sont entourés en bleu sur la carte de la figure 19. Le tableau 5 suivant présente un récapitulatif des échantillons analysés.

Les résidus carbonés ont été placés dans des flacons en verre et conservés à température ambiante. Les suies de Préaux et Quincampoix ont été isolées puis conservées au congélateur à -20°C jusqu'à analyse. Les écouvillons stériles ont été replacés dans leur tube en polypropylène après prélèvement et conservés à température ambiante. Les lingettes Kimtech ont été placées dans des vials après récupération des suies sur la surface, mis sous argon et conservées au congélateur à -20°C jusqu'à analyse.

Par ailleurs, afin de comparer nos résultats avec des suies urbaines, des suies NIST ont été extraites et analysées, et sont considérées comme caractéristiques d'un bruit de fond urbain.

Lors de ce rapport, les protocoles d'extraction et les méthodes analytiques mises en place pour la caractérisation de ces échantillons seront présentées. L'analyse des composés inorganiques pour un échantillon de résidu carboné (sels solubles dans l'eau, L-FDV-6) sera présentée, suivie de l'analyse des composés organiques par FTICR-MS et GCXGC-Orbitrap. Les analyses FTICR MS porteront sur la caractérisation directe des suies Quincampoix, Préaux et FDV-6. Les analyses GCXGC-Orbitrap porteront quant à elles, sur l'analyse d'extraits des résidus carbonés (L-FdV-X) et écouvillons (L-MSA-SUIE-X).

Tableau 8 : Récapitulatif des échantillons de suies analysés durant la phase 1

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	Écouvillon	29/09/2019	Tables, sorbonnes, paillasses,	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					Blanc		
L-ROU-SUIE-2							
L-ROU-SUIE-3							
L-ROU-SUIE-1							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		Blanc		

5.2.2 Analyse des composés inorganiques

La première partie de ce rapport porte sur la caractérisation des composés inorganiques présents dans un échantillon de suie récupéré dans le cadre de l'incendie Lubrizol. L'intérêt de ce développement analytique est de qualifier et de quantifier les composés inorganiques. La présence de ces composés influence la formation des ions lors de l'ionisation des composés organiques. L'information du type de composé inorganique et de leur quantité est donc essentielle pour la caractérisation des composés organiques.

La chromatographie ionique (IC) est une technique de choix pour la caractérisation des sels inorganiques dans l'eau. Cette technique sera présentée dans la suite de ce rapport et appliquée à la caractérisation d'un échantillon de suie prélevé dans une zone proche de celle de l'accident. Les anions Cl^- , NO_3^- , SO_4^{2-} , PO_4^{3-} , et cations Na^+ , K^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+} seront qualifiés et quantifiés lors de cette étude.

5.2.2.1 Instrumentation et méthodes

L'échantillon étudié est un résidu carboné récupéré à fond du val (L-FDV-6). L'échantillon a été préalablement broyé dans un mortier en agate afin d'être homogénéisé puis stocké au congélateur dans un vial en verre. L'extraction de ce résidu carboné a été réalisée avec 4,0 mg d'échantillon : l'échantillon a été placé dans un flacon à centrifugeuse de 15 mL avec 5 mL d'eau milliQ puis placé aux ultrasons pendant 15 minutes. Un blanc d'extraction eau milliQ est réalisé ainsi qu'un blanc obtenu à partir du rinçage du contenant en verre servant pour le stockage initial de la suie. Les flacons sont ensuite centrifugés à 4000 rpm pendant 10 minutes et le surnageant est récupéré pour analyse en chromatographie ionique. Les échantillons obtenus sont dilués par un facteur 10 et 30.

La chromatographie ionique a été utilisée pour caractériser les composés inorganiques présents dans le résidu carboné. La chromatographie ionique est une technique analytique permettant la caractérisation de manière qualitative et quantitative d'espèces ioniques présentes dans un échantillon aqueux¹⁰. Cette méthode est décrite par plusieurs mécanismes de séparation dont la chromatographie d'échange d'ions (HPIC) utilisée lors de cette étude. Un échangeur d'ions en solution aqueuse est constitué d'anions, de cations et d'eau. Une partie de ces anions ou cations sont chimiquement liés à une matrice solide (ion fixé) et les ions de charges opposées sont nommés contre ions. Cet échangeur d'ion est mis en contact avec une phase mobile (éluant) constituée d'autres cations ou anions. Une réaction d'échange va avoir lieu entre les contre ions présents sur l'échangeur et ceux présents dans l'éluant. L'affinité préférentielle d'un ion pour l'échangeur est déterminée par la constante d'équilibre de la réaction d'échange d'ion (K).

Le système chromatographique utilisé lors de cette étude est composé de différentes unités qui sont : le système de distribution de l'éluant, le système d'injection, la colonne de séparation, un suppresseur et le système de détection. L'éluant sert au transport des ions injectés à travers le système chromatographique. L'injecteur va permettre d'introduire les espèces ioniques à analyser et la phase stationnaire présente dans la colonne va jouer le rôle d'échangeur d'ion. En effet, les cations de l'analyte transportés vers la colonne vont remplacer les cations de l'éluant liés à la résine par liaison ionique. Ensuite, les cations de l'éluant vont remplacer à leur tour les cations de l'analyte pour revenir à l'état initial. Les analytes vont ensuite vers l'analyseur en fonction de leurs temps de rétention dans la colonne.

Les analytes se dirigent vers le système de détection après avoir été séparés dans la colonne. La détection se fait, dans notre cas, par conductimétrie car tous les ions sont des conducteurs électriques. Les ions de l'analyte et de l'éluant passent cependant par un suppresseur avant d'être quantifiés. Le suppresseur a pour but de diminuer la conductance de base et d'augmenter la conductance de l'analyte, améliorant ainsi le rapport signal sur bruit.

5.2.2.2 Paramètres instrumentaux utilisés

L'instrument utilisé pour l'analyse chromatographique des sels inorganiques solubles Cl^- , NO_3^- , SO_4^{2-} , PO_4^{3-} , Na^+ , K^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+} est la Dionex ICS-5000 (Thermo-Fischer), piloté par Chromeleon 7. Les méthodes utilisées pour la caractérisation des anions et cations sont présentées dans le Tableau 9.

Tableau 9 : Méthodes d'acquisition utilisées pour la caractérisation des anions et cations présents dans l'échantillon Fond Du Val

Mode	Méthode anionique	Méthode cationique
Système utilisé	Système 1	Système 2
Temps d'analyse	22 minutes	20 minutes
Débit	1 ml/min	1 ml/min
Pression	1664 psi	1011 psi
Température de cellule	30 °c	30°c
Température colonne	30 °c	30°c
Eluant	Carbonate 0.8 mm Bicarbonate 4.5 mm	Acide méthane sulfonique 20 mm
Suppresseur	Aers_carbonate_4mm	Cers_4mm

¹⁰ Small, H., T.S. Stevens, and W.C. Bauman, *Novel ion exchange chromatographic method using conductimetric detection*. Anal. Chem., 1975. **47**(11): p. 1801-1809

Colonne	Current : 32 mA AS23	Current : 59 mA CS12A
---------	-------------------------	--------------------------

Une gamme d'étalonnage est préparée afin de quantifier les ions d'intérêt dans l'échantillon de suie Fond-Du-Val. La gamme d'étalonnage a été réalisée en cinq points : 1 mg/L, 2 mg/L, 5 mg/L, 7,5 mg/L et 10 mg/L. Cette gamme a été préparée dans l'eau milliQ pour être dans les mêmes conditions que l'échantillon. La séquence d'acquisition contient un blanc eau milliQ, les étalons de concentration plus faible à plus élevée, un blanc de rinçage verrerie et l'échantillon Fond-Du-Val dilué puis non dilué.

5.2.2.3 Résultats

Les chromatogrammes des blancs analytiques sont présentés dans la **Erreur ! Source du renvoi introuvable.** Une très faible quantité d'ions chlorure et nitrate est observée parmi les anions, tandis que les ions phosphate ne sont pas observés. En revanche, le pic caractéristique des sulfates est intense. Pour les cations, seuls les ions sodium et potassium sont présents. Le pic caractéristique des ions sodium est très intense, montrant ainsi la présence de ces ions en grande quantité dans le blanc. La présence importante d'ions sodium dans le blanc peut poser problème lors de l'analyse de la gamme d'étalonnage.

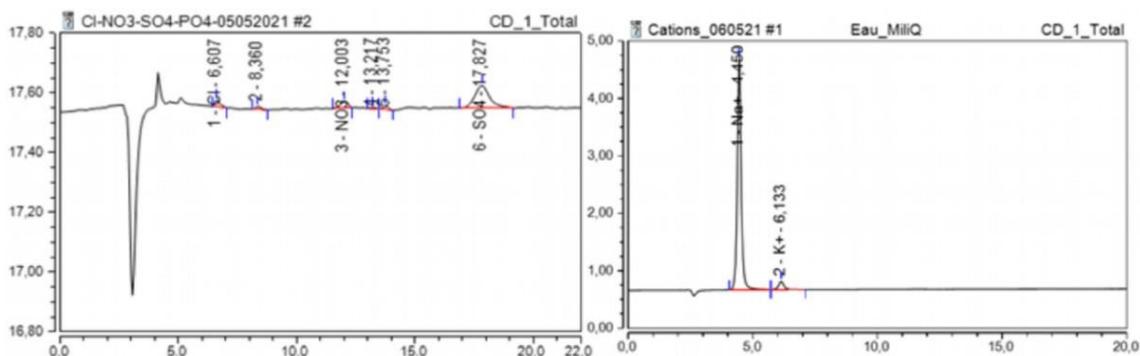


Figure 20 : Blancs analysés en chromatographie ionique avec à gauche, les anions et à droite, les cations

Les droites d'étalonnage ont été réalisées à la suite de la séquence d'acquisition. L'étalonnage de tous les anions est effectué en cinq points, avec un réplica par point, et les droites obtenues ont un coefficient de détermination supérieur à 0,99, validant ainsi le modèle de régression linéaire. Ces coefficients de détermination sont plus faibles pour les cations et surtout pour le sodium. En effet, la présence de sodium étant élevée dans le blanc, il a été difficile de quantifier cet élément à faible concentration.

La détermination de la limite de quantification est effectuée à partir de l'étalon à 1 ppm en mode anionique et cationique. En effet, la hauteur du bruit de fond en μS est déterminée puis multipliée par dix ($\text{LOQ} = \text{Signal}/\text{Bruit} > 10$). Cette valeur est ensuite multipliée par la concentration de l'ion étudié et le tout est divisé par la hauteur du pic de ce même ion. Ces limites de quantification sont présentées dans le Tableau 10.

Tableau 10 : Détermination de la limite de quantification en ppm des anions et cations caractérisés

	C ⁺				A ⁻			
	Na	K	Mg	Ca	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	PO ₄ ³⁻	SO ₄ ²⁻
Hauteur de pic (μS)	4,83	0,63	0,54	0,22	0,62	0,20	0,07	0,20
Concentration (ppm)	2,55	1,25	0,91	0,94	1,07	0,98	0,93	1,00
LOQ (ppm)	0,01	0,03	0,02	0,06	0,06	0,17	0,46	0,17

Les chromatogrammes de l'échantillon Fond Du Val sont présentés dans la Figure 21.

Les espèces anioniques présentes sont les chlorures, nitrates et sulfates. En effet, les ions phosphate ne sont pas observés. L'espèce la plus intense est l'ion SO_4^{2-} dont l'aire augmente significativement entre l'échantillon dilué 30 fois et celui non dilué. Les concentrations des anions étudiés sont montrées dans le Tableau 11. L'aire réelle correspond à la différence entre l'aire de l'échantillon et celle du blanc. L'échantillon dilué par 30 est trop peu concentré et seuls les ions

sulfate ont une concentration supérieure à la limite de quantification. Cette concentration est cependant inférieure à la LOQ. Les ions sulfate pour l'échantillon dilué par 10 ont une concentration dans la gamme de linéarité. Les ions nitrate et chlorure sont observés avec une concentration juste en dessous de la gamme de linéarité pour l'échantillon non dilué. Enfin, la concentration des ions sulfate est bien au-dessus de la gamme de linéarité pour l'échantillon non dilué, mettant en avant l'omniprésence de cet ion dans l'échantillon de Fond-Du-Val.

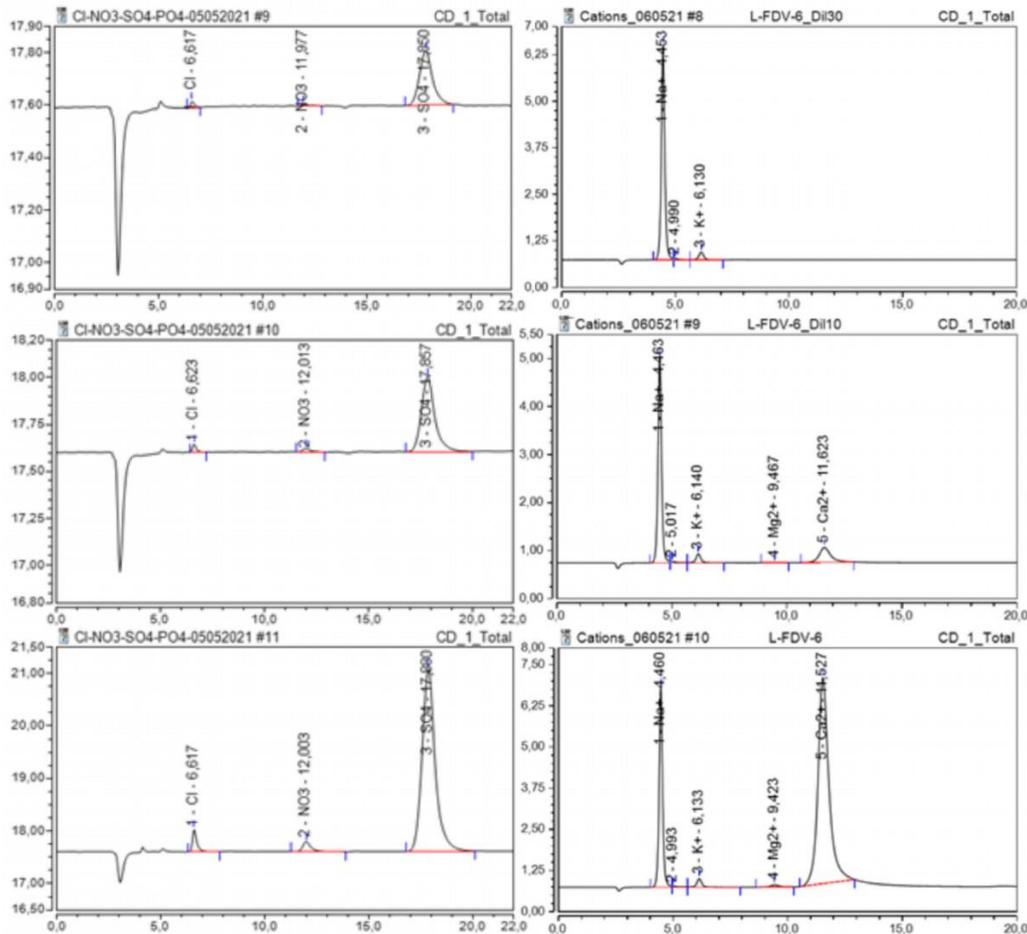


Figure 21 : Echantillons analysés en chromatographie ionique avec à gauche, les anions et à droite, les cations. La première ligne correspond à l'échantillon dilué 30 fois, la seconde à l'échantillon dilué 10 fois et la troisième l'échantillon non dilué

Tableau 11: Teneurs en anions de l'échantillon Fond Du Val avec et sans dilution. La concentration réelle des ions est obtenue en prenant en compte la différence d'aire entre le blanc et l'échantillon.

L-FDV-6_Dil30	Temps de rétention (min)	Aire ($\mu\text{S} \cdot \text{min}$)	Aire réelle ($\mu\text{S} \cdot \text{min}$)	C réelle (mg/L)
Cl ⁻	6,62	0,01	0,00	<LOQ
NO ₃ ⁻	11,98	0,01	0,00	<LOQ
PO ₄ ³⁻	Non observé	Non observé	0,00	<LOQ
SO ₄ ²⁻	17,85	0,15	0,09	0,497
L-FDV-6_Dil10	Temps de rétention (min)	Aire ($\mu\text{S} \cdot \text{min}$)	Aire réelle ($\mu\text{S} \cdot \text{min}$)	C réelle (mg/L)
Cl ⁻	6,62	0,01	0,01	0,07
NO ₃ ⁻	12,01	0,01	0,01	<LOQ
PO ₄ ³⁻	Non observé	Non observé	0,00	<LOQ
SO ₄ ²⁻	17,86	0,30	0,24	2,01
L-FDV-6	Temps de rétention (min)	Aire ($\mu\text{S} \cdot \text{min}$)	Aire réelle ($\mu\text{S} \cdot \text{min}$)	C réelle (mg/L)
Cl ⁻	6,62	0,10	0,10	0,73
NO ₃ ⁻	12,00	0,09	0,09	0,97
PO ₄ ³⁻	Non observé	Non observé	0,00	<LOQ
SO ₄ ²⁻	17,88	2,53	2,48	24,46

Les espèces cationiques présentes dans l'échantillon sont les ions sodium, potassium, calcium et magnésium. Les ions sodium sont omniprésents peu importe si l'échantillon est dilué ou non. En effet, ces ions viennent à la fois de l'échantillon, de l'eau milliQ utilisée pour la dilution et l'extraction ainsi que le contenant des suies Fond-Du-Val (flacon en verre). L'aire du pic correspondant aux sels de potassium augmente légèrement entre l'échantillon dilué et non dilué. Les sels de magnésium sont très peu observés. En revanche, l'aire du pic représentatif des sels de calcium augmente significativement entre l'échantillon dilué et celui non dilué. Les concentrations des cations analysés dans l'échantillon Fond-Du-Val sont présentés dans le Tableau 12. Les ions sodium ont une concentration réelle qui varie de manière inhabituelle entre les échantillons dilués et l'échantillon pur. En effet, la concentration en sodium de l'échantillon dilué par 10 est plus faible par rapport à l'échantillon dilué par 30. L'échantillon non dilué est aussi très peu concentré, ce qui rend difficile la quantification exacte de ces ions. La variation de la concentration des ions potassium au cours des dilutions est aussi très faible. Seule la concentration en ions calcium augmente significativement entre les échantillons dilués et celui non dilué.

Tableau 12 : Teneurs en cations de l'échantillon Fond Du Val avec et sans dilution. La concentration réelle des ions est obtenue en prenant en compte la différence d'aire entre le blanc et l'échantillon.

L-FDV-6_Dil30	Temps de rétention (min)	Aire (µS*min)	Aire réelle (µS*min)	C réelle (mg/L)
Na ⁺	4,45	1,03	0,30	0,20
K ⁺	6,13	0,06	0,02	0,26
Mg ²⁺	n.a.	n.a.	n.a.	<LOQ
Ca ²⁺	n.a.	n.a.	n.a.	<LOQ
L-FDV-6_Dil10	Temps de rétention (min)	Aire (µS*min)	Aire réelle (µS*min)	C réelle (mg/L)
Na ⁺	4,46	0,77	0,03	<LOQ
K ⁺	6,14	0,05	0,01	0,22
Mg ²⁺	9,47	0,01	0,01	0,20
Ca ²⁺	11,62	0,18	0,18	1,18
L-FDV-6	Temps de rétention (min)	Aire (µS*min)	Aire réelle (µS*min)	C réelle (mg/L)
Na ⁺	4,46	1,09	0,35	0,43
K ⁺	6,13	0,07	0,03	0,36
Mg ²⁺	9,42	0,03	0,03	0,27
Ca ²⁺	11,53	3,53	3,53	16,86

Les teneurs de ces ions par g de suie sont calculées à partir des concentrations réelles des ions présents dans l'échantillon Fond Du Val (Tableau 13). En effet, les ions Ca²⁺ et SO₄²⁻ sont en plus grande proportion par rapport aux autres éléments avec **14,70** et **25,08** mg/g de suies respectivement.

Tableau 13 : Concentration en mg/L et teneur en ions en mg/g de suies

Ion	Concentration mg/L	m (mg)	mg/g de suies
Na ⁺	0.43	0.002	0.54
K ⁺	0.34	0.002	0.45
Mg ²⁺	0.27	0.001	0.34
Ca ²⁺	11.76	0.059	14.70
Cl ⁻	0.73	0.004	0.92
NO ₃ ⁻	0.97	0.005	1.22
PO ₄ ³⁻	<LOQ	0	0.00
SO ₄ ²⁻	20.06	0.100	25.08

L'analyse par chromatographie ionique de l'échantillon de suie Fond-Du-Val a permis de mettre en avant la présence d'ions calcium et sulfates. Il est possible que ces ions soient sous la forme CaSO₄ dont la version héli-hydratée CaSO₄• ½ H₂O entre dans la composition du plâtre. Ces informations sont de plus utiles pour la caractérisation des composés organiques par FTICR-MS. En effet, les sels peuvent avoir un impact sur l'ionisation en spectrométrie de masse par la présence d'adduits et de cluster de sels.

- PROJET COP HERL PHASE 1 - Résultats du WP1 : caractérisation de l'incendie
 Analyses non ciblées des polluants présents sur les suies générées lors de l'accident

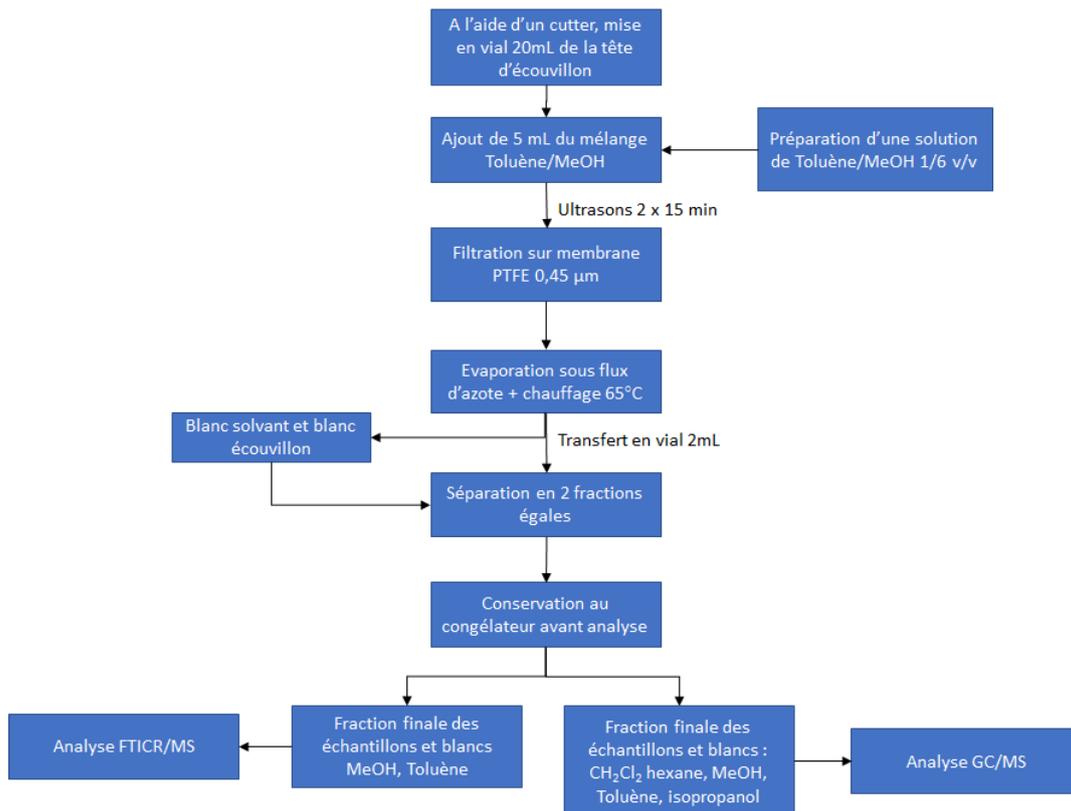


Figure 23 : Protocole d'extraction des écouvillons

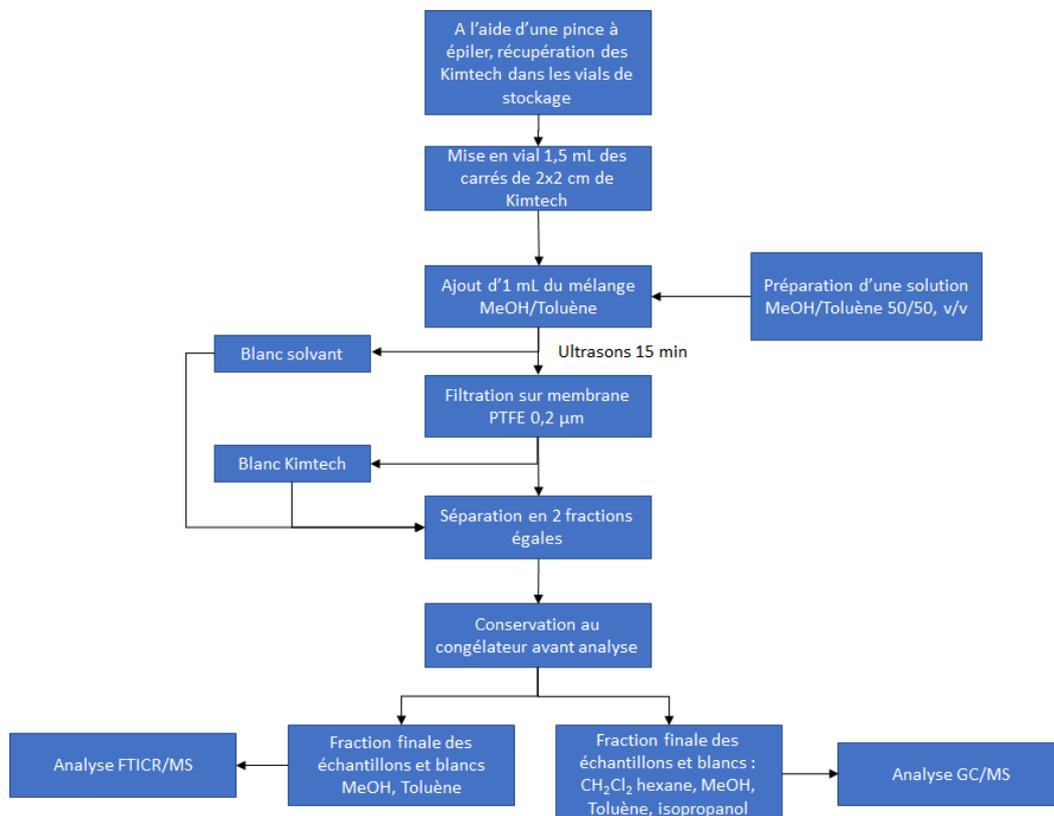


Figure 24 : Protocole d'extraction des lingettes Kimtech

5.2.3.2 Méthodologie par FTICR-MS

Instrumentations et méthodes

Le spectromètre de masse à résonance cyclotronique ionique à transformée de Fourier (FTICR MS), présent au laboratoire COBRA, est un instrument particulièrement adapté à l'analyse non ciblée de mélanges organiques complexes, tel que les aérosols, eaux et sols. En effet, la résolution de cet instrument ($R_s > 1\,000\,000$) permet de séparer les composés de même masse nominale, nommés isobares, comme présenté dans la **Erreur ! Source du renvoi introuvable.** De plus, la précision de mesure de cet instrument permet d'attribuer de manière fiable une formule brute unique pour chaque ion du spectre de masse. Cette formule brute peut être vérifiée par la structure isotopique fine de l'ion caractérisé. L'instrument présent au laboratoire COBRA est le FTICR Solarix XR 12T de Bruker (Figure 25). Le principe de cet instrument consiste en l'action d'un champ magnétique couplé à un champ électrique sur les analytes ionisés. Ces ions adoptent un mouvement orbital de fréquence inversement proportionnelle au rapport m/z ^{11,12,13}.

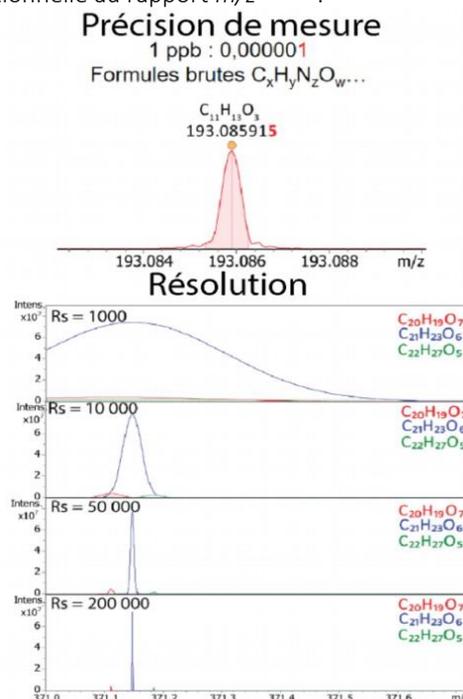


Figure 25 : Photo du spectromètre de masse FTICR Bruker Solarix du laboratoire COBRA et rappel sur la précision de mesure et résolution en spectrométrie de masse

Plusieurs sources d'ionisation peuvent être utilisées afin de caractériser les échantillons de suies possiblement liés à l'incendie Lubrizol et Normandie Logistique. La source présentée dans le cadre de ce rapport est la source de désorption-ionisation laser (LDI).

La désorption-ionisation laser (LDI) est une technique d'ionisation douce permettant la caractérisation de composés solides de faible de masse, organiques et/ou inorganiques, à l'aide d'un laser émettant généralement dans l'UV ou le VUV (vacuum UV). Lors de son fonctionnement, un faisceau laser est concentré sur une faible surface d'un échantillon solide. L'énergie apportée par le laser est absorbée par l'analyte puis convertie par des processus radiatifs. Les espèces à l'état excité s'éjectent dans la phase gazeuse et un microplasma constitué d'atomes neutres et d'ions est généré. L'avantage de cette source d'ionisation est sa capacité à analyser des solides sans préparation au préalable (extraction

¹¹Lawrence, E.O. and M.S. Livingston, The Production of High Speed Protons Without the Use of High Voltages. Physical Review, 1931. 38(4): p. 834-834.

¹²Hipple, J.A., H. Sommer, and H.A. Thomas, A Precise Method of Determining the Faraday by Magnetic Resonance. Physical Review, 1949. 76(12): p. 1877-1878.

¹³ Comisarow, M.B. and A.G. Marshall, Fourier transform ion cyclotron resonance spectroscopy. Chem. Phys. Lett., 1974. 25(2): p. 282-283.

et/ou purification)¹⁴. Cette source est utilisée dans le cadre du projet COP HERL pour la caractérisation de suies récupérées à Fond Du Val, à Quincampoix et à Préaux.

Représentation des données

Les matrices complexes analysées peuvent générer des milliers de signaux par FTICR-MS. Selon la résolution et la précision de mesure de masse, il est possible, après étalonnage, d'attribuer de manière fiable une formule brute unique à chaque signal. Cependant, la visualisation et l'interprétation de ces milliers de signaux peut être difficile. Par conséquent, plusieurs alternatives sont possibles pour simplifier l'interprétation des données.

L'utilisation de représentations graphiques facilite l'interprétation des données. En effet, ces méthodes permettent de séparer les attributions moléculaires en fonction de descripteurs comme les familles moléculaires et/ou le nombre d'hétéroatomes. Ces outils cartographiques sont très puissants pour la comparaison rapide d'échantillons.

Les représentations graphiques utilisées lors de ce rapport sont : le diagramme de Venn (Figure 26.a) le diagramme d'intensité relative en fonction des classes moléculaires (Figure 26.b), le diagramme DBE vs nombre de carbone (Figure 26.c) et le diagramme de van Krevelen (Figure 26.d).

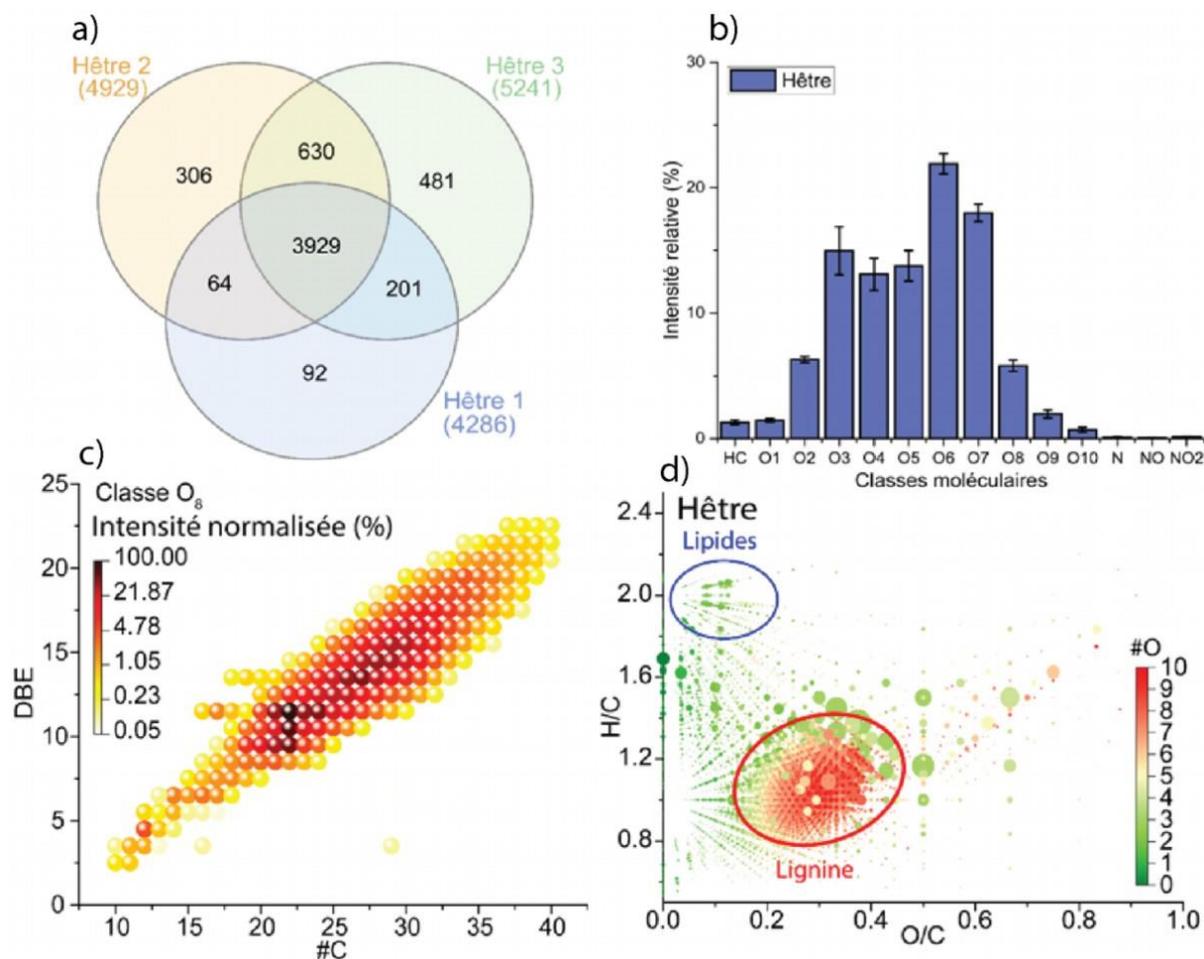


Figure 26 : Exemple de représentations graphiques utilisées pour les données FTICR MS avec a) diagramme de Venn, b) histogramme d'intensité relative en fonction des classes moléculaires, c) diagramme DBE vs C, d) diagramme de van Krevelen.

Le diagramme de Venn (Figure 26.a) permet de montrer les relations entre des variables dans différents ensembles. Il est utilisé en spectrométrie de masse pour comparer les formules brutes obtenues pour différents échantillons ou différents réplicats d'un même échantillon. En effet, le diagramme de Venn permet de montrer les attributions moléculaires communes entre des échantillons ou réplicats analytiques.

La représentation graphique la plus simple des données FTICR est l'histogramme d'intensité relative en fonction des classes moléculaires (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**). En effet, celui-ci permet de montrer l'intensité relative des

¹⁴ Barrère, C., Hubert-Roux, M., Lange, C.M., Rejaibi, M., Kebir, N., Désilles, N., Lecamp, L., Burel, F., Loutelier-Bourhis, C., 2012. Solvent-based and solvent-free characterization of low solubility and low molecular weight polyamides by mass spectrometry: a complementary approach. *Rapid Commun Mass Spectrom* 26, 1347–1354.

classes moléculaires contenant un nombre variable d'atomes d'hydrogène, de carbone, d'oxygène, d'azote ou d'autres atomes. Les classes moléculaires étudiées varient en fonction des paramètres appliqués lors de l'attribution des ions en spectrométrie de masse.

Le diagramme d'équivalent double liaison en fonction du nombre d'atomes de carbone (DBE vs #C, Figure 26.c) permet de montrer des informations sur le caractère insaturé ou saturé d'une molécule et est très puissant pour comparer des échantillons. La DBE pour une molécule de formule $C_cH_hO_oN_n$ est calculée de la manière suivante :

$$DBE = c + \frac{n}{2} - \frac{h}{2} + 1$$

Ce type de diagramme est généralement représenté par classe d'ions (composés hydrocarbonés, composés avec un ou plusieurs atomes d'oxygène...). Dans le cadre de cet exemple, la classe CHO_8 possède des ions très insaturés avec de nombreux cycles aromatiques et un nombre étendu d'atomes de carbone. De plus, les séries d'ions à DBE fixe indiquent la présence de séries d'alkylation ($-CH_2-$).

Le diagramme de van Krevelen (Figure 26.d) est une approche graphique permettant de séparer des attributions moléculaires par familles. Il est construit à partir du ratio du nombre d'atomes d'hydrogène sur nombre d'atomes de carbone (H/C) et du ratio du nombre d'atomes d'oxygène par rapport au nombre d'atome de carbone (O/C). Le ratio H/C montre le caractère insaturé ou saturé de l'ion observé tandis que le ratio O/C montre son caractère oxydé ou non.

Traitement des données

Les échantillons ont été analysés avec un spectromètre de masse FTICR Solarix XR (Bruker Daltonics) équipé d'un aimant supraconducteur de 12 Tesla. L'échantillon solide est déposé sur un support métallique introduit dans la source de désorption-ionisation laser (laser NdYAg de 355 nm). Le spectromètre de masse est étalonné de manière externe à l'aide de trifluoroacétate de sodium. Le spectre de masse a été acquis de m/z 110 à m/z 1300 avec un nombre de points de 8M et un Free Induction Decay (ou FID, correspondant au temps de décroissance du signal) de 2.5166s. Les spectres de préaux et Quincampoix résultent de l'accumulation de 550 scans tandis que le spectre de Fond-Du-Val résulte de l'accumulation de 300 scans. La puissance laser utilisée est de 20% avec une fréquence de 1000 Hz et un nombre de tirs laser de 100 par scans. La résolution obtenue est d'environ 700 000 à m/z 400. Un spectre blanc est acquis à partir d'un spot vierge du support métallique servant à l'ionisation. Les paramètres de transfert des ions et de l'analyseur sont présentés dans le Tableau 14.

Tableau 14 : Paramètres LDI FTICR MS des échantillons de suie Préaux, Fond-Du-Val et Quincampoix

Ion Transfer			Analyzer			
Source optics	Capillary Exit (V)	150	Para Cell	Transfer Exit Lens (V)	-20	
	Deflector Plate (V)	200		Analysis Entrance (V)	-10	
	Funnel 1 (V)	150		Side Kick (V)	0	
	Skimmer 1 (V)	25		Side Kick Offset (V)	-1	
	Funnel RF Amplitude (Vpp)	60		Front Trap Plate (V)	1.8	
Octopole	Frequency (MHz)	5		Back Trap Plate (V)	1.8	
	RF Amplitude (Vpp)	350		Back Trap Plate Quench (V)	-30	
Quadrupole	Q1 Mass(m/z)	120		Sweep Excitation Power (%)	43	
Collision Cell	Collision Voltage (V)	0.5		Shimming DC Bias	0°	1.535
	DC Extract Bias (V)	0.5			90°	1.54
	RF Frequency (MHz)	2	180°		1.465	
	Collision RF Amplitude (Vpp)	1200	270°		1.46	
Transfer Optics	Time of Flight (ms)	0.6	Gated Injection DC Bias	0°	1.4	
	Frequency (MHz)	3		90°	1.55	
	RF Amplitude (Vpp)	200		180°	1.6	
				270°	1.45	

Le traitement des spectres de masse acquis a été réalisée avec le logiciel DataAnalysis de Bruker. Premièrement, la liste des masses a été déterminée avec un rapport signal sur bruit minimal de 8. Le spectre de masse du blanc est soustrait de celui de l'échantillon à l'aide de l'algorithme xpose (ratio de 3). L'attribution des formules brutes a été réalisée de

manière séquentielle avec les limites de formules $N_{0-1}O_{0-5}$, $N_{0-1}O_{1-5}Na_1$, $N_{0-1}O_{1-5}K_1$ et $N_{0-1}O_{1-5}Ca_1$ et une tolérance de 0,2 ppm. Ces paramètres ont été choisis de manière à limiter le nombre d'attributions possibles par ion. Malgré cela, certains ions sont attribués à plusieurs formules brutes. Ces formules brutes sont vérifiées manuellement et celles avec le pattern isotopique le plus proche sont conservées. Dans le cas où cette vérification n'est pas possible, les formules brutes avec l'erreur la plus faible sont prises en compte. Les attributions moléculaires obtenues sont filtrées et représentées graphiquement afin d'avoir le maximum d'information sur les échantillons.

5.2.3.3 Méthodologie par GC X GC - Orbitrap

Instrumentations et méthodes

Au laboratoire SMS, toutes les analyses pour le projet COP HERL ont été réalisées avec un appareil de chromatographie en phase gazeuse (GC) Trace 1310 à 1 ou 2 dimensions couplé à un spectromètre de masse haute résolution Q Exactive (Orbitrap). Cet appareillage est équipé d'un passeur d'échantillons polyvalent (MPS) Gerstel permettant d'utiliser des techniques différentes d'introduction de l'échantillon (thermodésorption, injection liquide, fibre SPME, espace de tête). Le MPS est piloté par le logiciel Maestro. Une photographie du système complet est présentée Figure 27.



Figure 27 : : GC x GC – Orbitrap

Sur le principe, les différentes molécules présentes au sein d'un échantillon sont séparées dans une colonne chromatographique en fonction de leur affinité avec la phase stationnaire (déposée sur les parois de la colonne) et leur température d'ébullition. On peut ainsi, dans des conditions de température et de pressions données, identifier un composé par ce que l'on appelle son facteur de rétention, c'est-à-dire le temps nécessaire pour être élué et détecté. Ainsi moins un composé sera volatil, plus son facteur de rétention sera élevé.

L'échantillon est introduit dans l'appareil à l'aide d'une seringue, déposant l'échantillon dans un tube de verre appelé liner, qui mène directement sur la tête de colonne. L'injecteur utilisé dans la suite de ce rapport est un injecteur PTV, capable de réaliser une programmation de température de manière à ce que toutes les molécules puissent être vaporisées sans discrimination entre les molécules volatiles et les peu volatiles. Ces molécules sont ensuite éluées tout au long de la colonne grâce à un gaz vecteur inerte (ici, de l'hélium). Ils vont alors plus ou moins interagir avec la phase stationnaire. La colonne est placée dans un four permettant d'augmenter progressivement la température et éluer les composés adsorbés sur ses parois. À la sortie de celle-ci se trouve une source d'ionisation, capable d'ioniser et fragmenter les molécules, puis un analyseur, capable de séparer les ions en fonction de leur rapport masse sur charge m/z avant qu'ils soient détectés. Le signal délivré par le détecteur sera proportionnel à la quantité d'ions.

Lors d'un fonctionnement en deux dimensions¹⁵, deux colonnes de polarités différentes seront placées en série dans un ou deux fours de chromatographie. Généralement, la première colonne contient une phase stationnaire plutôt apolaire, tandis que celle de la deuxième colonne sera plutôt polaire. La 2^{ème} dimension s'acquiert alors par le biais d'un

¹⁵ Fernandez X., Filippi J.J., Jeanville M., Chromatographie en phase gazeuse à deux dimensions : GC-GC et GCxGC, Techniques de l'ingénieur, 2011

fractionnement de l'effluent provenant de la première colonne, appelé modulation. Le modulateur est placé entre les deux colonnes, et est capable de projeter un jet froid à intervalles de temps réguliers et ainsi envoyer les composés dans la deuxième colonne par fractions. L'objectif étant que le temps passé dans la 2^{ème} colonne soit faible, cette dernière a une longueur et un diamètre réduits par rapport à la 1^{ère} colonne.

L'Orbitrap¹⁶ est un spectromètre de masse haute résolution constitué d'une source d'ionisation qui pourra être électronique (EI = bombardement d'électrons) ou chimique (CI = introduction d'un gaz ionisant les molécules) ce qui permet d'ioniser et/ou fragmenter les analytes issus de la colonne chromatographique. L'Orbitrap est un analyseur capable de mesurer la masse moléculaire des ions à avec une grande précision et résolution. En effet, sa précision de masse est inférieure à 3 ppm avec calibration externe et inférieure à 1 ppm avec l'étalonnage interne. Quant à sa résolution, elle peut atteindre 120 000 FWHM (largeur à mi-hauteur) à m/z 200. Les ions issus de la source entrent dans un système de stockage intermédiaire que l'on appelle la C-trap, capable de piéger les ions au fur et à mesure de leur arrivée, et les injecter par groupe dans l'Orbitrap, après un temps et/ou un nombre d'ions piégés donné. Les ions oscillent harmoniquement le long de l'axe autour de l'électrode centrale et produisent un signal complexe dont les fréquences sont déterminées en utilisant une transformée de Fourier. Les ions arrivent enfin au détecteur qui transforme ce flux en signal électrique et l'amplifie avant l'envoi au logiciel de retraitement.

Traitement des données

Les conditions d'analyse en GCxGC-Orbitrap sont résumées dans le Tableau 15.

Tableau 15 : Conditions d'analyse pour les échantillons de suie

Analyses EI	Mode	1 dimension	2 dimensions		
Phases	Phase stationnaire 1	5% phényl méthylpolysiloxane 95% PDMS			
	Phase stationnaire 2	/	50% phényl méthylpolysiloxane		
	Phase mobile	Hélium ultra pur Alphagaz 2 (pureté < 99,999999%)			
Caractéristiques colonnes	Pré-colonne	Silice désactivée 0,3 m x 0,32 mm			
	Colonne 1	HP-5MS-UI			
		30 m x 0,25 mm x 0,25 µm			
	Colonne 2	/	TG-17SiIMS		
/		2 m x 0,15 mm x 0,15 µm			
Post-colonne	Silice désactivée 1,5 m x 0,25 mm				
Pression	72,6 kPa		351,2 kPa		
Débit	1,3 mL/min		8,8 mL/min		
Injection	Volume injecté	4 µL			
	Mode Pulse splitless	Pression	170 kPa		
		Débit	3,2 mL/min		
		Maintien	3 min		
	Débit de fuite	18,7 mL/min		11,2 mL/min	
	Programmation température du CIS	de	Rampe de température (°C/s)	Température (°C)	Maintien (min)
			20	1	
12			340	5	
Four	Programmation température	de	Rampe de température (°C/s)	Température (°C)	Maintien (min)
				40	4
			15	180	0
			10	230	0
			5	325	2,67
Détection	Type	Masse haute résolution			

¹⁶ Hecht E., Eliuk S., Scigelova M., Makarov A. (Thermo Fisher Scientific), Fundamentals and Advances of Orbitrap Mass Spectrometry, Encyclopedia of Analytical Chemistry, 2019

	Mode	Full-Scan	
	Acquisition	De m/z 50 à m/z 550	De m/z 50 à m/z 650
Durée de l'analyse	40 min		

Des analyses en ionisation chimique positive (PCI) ont également été réalisées en utilisant un gaz réactif pour ioniser les molécules, ici, du méthane. Le gaz réagira avec les molécules M, et un transfert de proton aura lieu, donnant lieu à la formation d'ions $[M+H]^+$. Les paramètres seront les mêmes qu'en EI à une dimension, excepté l'acquisition des données qui sera réalisée de m/z 50 à m/z 650. L'ionisation chimique est une technique d'ionisation plus douce que l'ionisation électronique (EI), c'est à dire qu'elle fragmente moins les molécules, et par conséquent aide parfois à déterminer la formule de l'ion moléculaire lorsque celui-ci n'est pas visible en EI.

Les retraitements des chromatogrammes ont été effectués à l'aide des logiciels QualBrowser, TraceFinder, Compound Discoverer et GC image. Tracefinder et Compound Discoverer permettent de déconvoluer les signaux des chromatogrammes. Par ailleurs, pour chaque pic, les logiciels peuvent comparer les spectres obtenus et les indices de rétention avec ceux enregistrés base de données NIST (Version 2.2, 2014).

5.2.3.4 Résultats

Analyses FTICR-MS, désorption LDI

Les spectres de masse LDI FTICR MS des échantillons de suie de Quincampoix, Préaux et Fond-Du-Val sont présentés dans la **Erreur ! Source du renvoi introuvable.** Ces trois échantillons montrent des profils d'ions très différents. En effet, les suies de préaux présentent deux grandes distributions d'ions : une autour de m/z 137 et une seconde autour de m/z 321. Les suies de Quincampoix montrent une distribution très intense d'ions entre m/z 393 et m/z 500 avec d'autres ions de faible masse et intensité.

La principale distribution observée pour l'échantillon de Fond-Du-Val se trouve dans la gamme m/z 120-200. Ces différences de profil entre les échantillons sont complétées par la grande différence de complexité entre les échantillons. Cette complexité est montrée par l'agrandissement à m/z des spectres de masse acquis. 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. Cette inhomogénéité des spectres de masse montre l'impact de la localisation de l'échantillon sur sa composition.

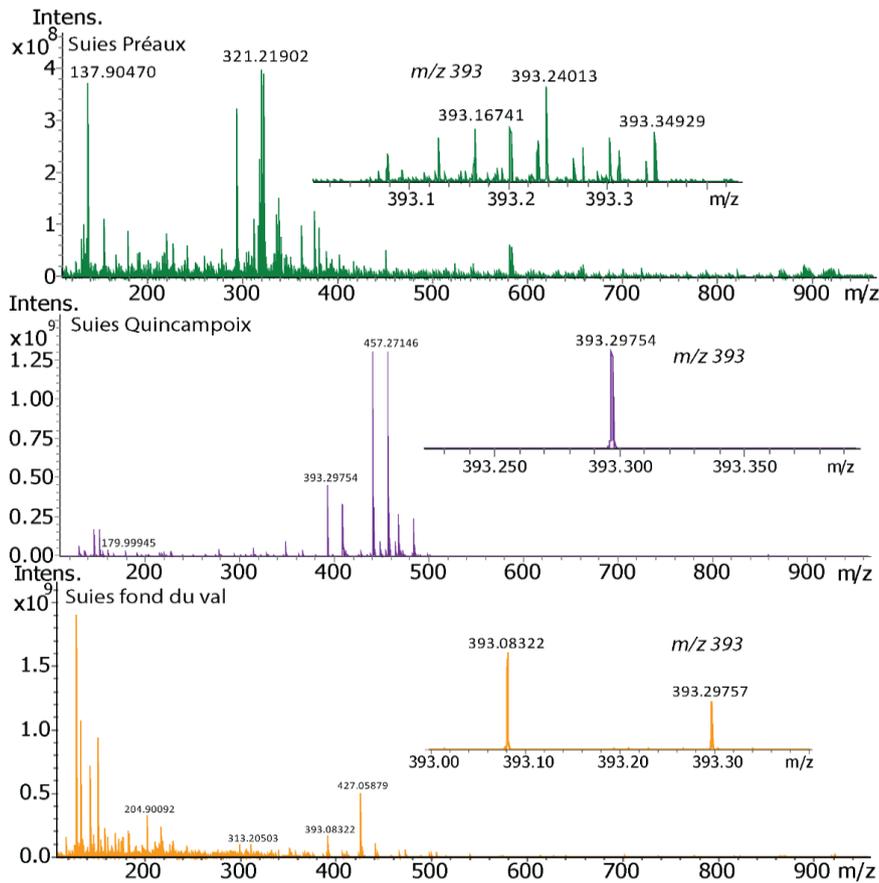


Figure 28 : Spectres de masse LDI FTICR MS des échantillons de suie de Quincampoix, Préaux et Fond-Du-Val Un agrandissement au rapport m/z 393 est présenté pour chaque échantillon.

Les spectres de masses obtenus sont par la suite traités de manière à attribuer les signaux du spectre de masse à une formule brute. Cependant, les défauts de masse observés (différence entre la masse nominale et la masse précise) sont inhabituels pour les trois échantillons. En effet, ces ions possèdent des défauts de masse très faibles, rendant difficile l'attribution de formules brutes. De nombreux hétéroatomes et métaux ont été essayés pour les attributions jusqu'à l'observation d'ions avec du calcium, du sodium et du potassium. La présence de ces sels dans l'échantillon Fond-Du-Val a été confirmée par les analyses de composés inorganiques par chromatographie ionique. De plus, la structure isotopique fine de certains ions avec ces sels a été confirmée. Les ions de ces spectres de masse ont été attribués à des formules brutes contenant entre 0 et 5 atomes d'oxygènes et entre 0 et 1 atomes d'azote, le tout avec des adduits sodium, potassium et calcium. Le nombre de formules brutes attribuées sont 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.

Des représentations graphiques sont réalisées à partir de ces formules attribuées, dont le diagramme d'intensité relative en fonction des classes moléculaires présenté dans la Figure 29.

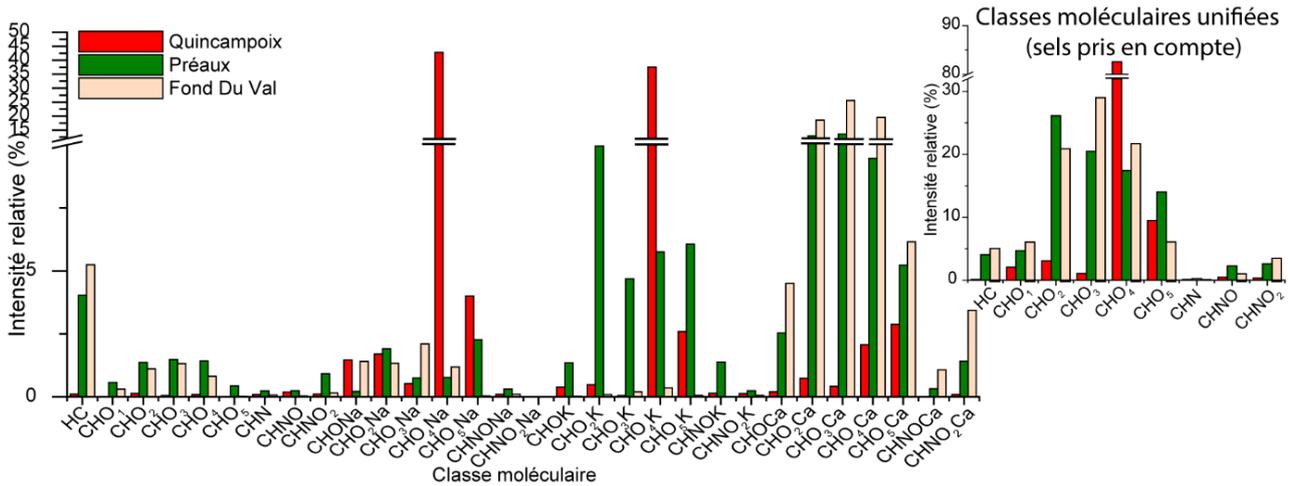


Figure 29: Diagramme d'intensité relative en fonction des classes moléculaires pour les échantillons de suie Préaux, Fond-Du-Val et Quincampoix. L'insert à droite correspond aux classes moléculaires HC, CHO1-5, CHN et CHNO1-2 prenant en compte la somme des adduits Na, Ca, K et radicaux/protonés.

Les classes moléculaires les plus intenses pour l'échantillon de Préaux sont les hydrocarbonés et les classes CHO₂ à CHO₅ avec des adduits calcium et potassium. Ces classes montrent la présence de composés avec un niveau d'oxydation variable. L'échantillon de Quincampoix est essentiellement constitué de composés CHO₄ avec adduits sodium et potassium. L'omniprésence de ces deux classes est expliquée par l'attribution des quelques ions les plus intenses du spectre de masse. Ces ions sont le m/z 457.27147 et m/z 441.29753 attribués respectivement à C₂₆H₄₂O₄K et C₂₆H₄₂O₄Na (même formule avec différents adduits), dont la structure possible est le dinonyl phtalate. L'origine de ces ions peut être liée à la surface de prélèvement de l'échantillon (nappe en plastique). Ces ions peuvent interférer avec le reste du spectre de masse en raison de leur intensité (compétition à l'ionisation), ce qui explique en partie le peu de signaux observés par rapport aux deux autres échantillons. Enfin, très peu d'ions sans adduits sodium, potassium ou calcium sont observés pour cet échantillon. L'échantillon de Fond-Du-Val est principalement composé d'hydrocarbonés et d'ions avec 2 à 5 atomes d'oxygène et un atome de calcium. Cette présence d'ions calcium a été expliquée par les analyses CI effectuée sur ces suies. En revanche, les ions avec un adduit potassium sont très peu observés en comparaison des deux autres échantillons.

Les informations peuvent être complétées par l'utilisation de diagrammes de van Krevelen afin d'avoir des informations sur les familles de molécules et le caractère oxydé, insaturé/saturé de celles-ci. La Figure 30 montre un diagramme de van Krevelen (VKN) pour trois échantillons étudiés. Ces trois diagrammes ont des distributions différentes d'ions, à commencer par l'échantillon de Quincampoix. Le VKN de cet échantillon montre une famille d'ions resserrés autour de 1,5 < H/C < 2,5 et 0 < O/C < 0,3. Cette famille d'ions contient le C₂₆H₄₂O₄K et C₂₆H₄₂O₄Na, ions les plus intenses. Ce rapport H/C indique des ions peu insaturés avec un taux d'oxydation variable, ces ions pouvant être des acides gras, esters gras ou autres composés avec de longues chaînes carbonées. Quelques composés plus oxydés sont aussi montrés dans ce diagramme.

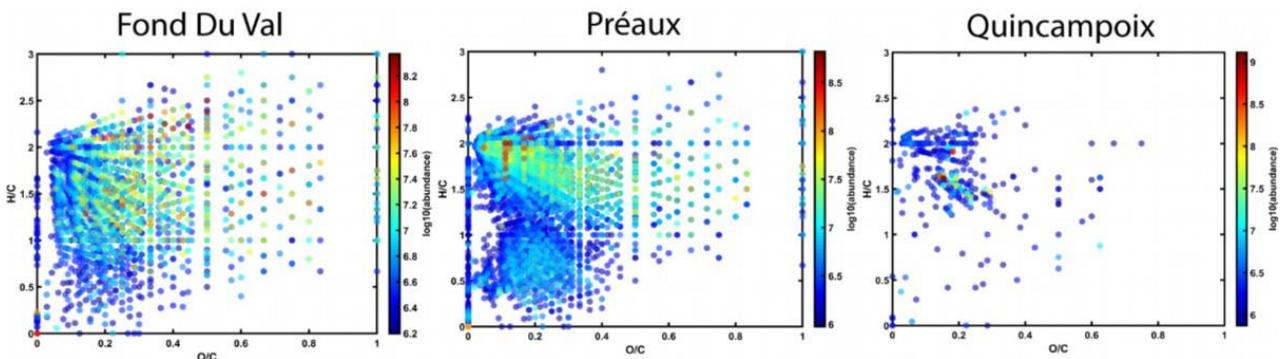


Figure 30 : Diagrammes de van Krevelen pour les échantillons de Fond du Val, Préaux et Quincampoix, le code couleur correspond à l'intensité des ions avec une échelle log₁₀.

Le VKN pour l'échantillon de suies de Fond-Du-Val est beaucoup plus complexe, montrant ainsi une plus grande diversité de familles d'ions. Les ions les plus intenses de cet échantillon se trouvent dans une gamme H/C entre 1 et 2,5 et une

gamme O/C entre 0,2 et 0,8. Les composés avec un haut H/C et bas O/C peuvent être associés à des acides gras, esters gras ou d'autres composés organiques saturés. Les ions avec un haut H/C et O/C peuvent être associés à des sucres et certains produits de leur dégradation, des oligomères de glycols.... D'autres composés moins intenses peuvent être observés avec $H/C < 1$ et $0 < O/C < 0,4$. Ces composés peuvent être associés à des ions peu oxydés avec un degré d'insaturation plus important, indiquant des composés plus aromatiques. Ces ions de faible intensité font partie des classes moléculaires ne contenant pas d'adduits sodium, potassium ou calcium. L'échantillon de Préaux présente aussi une disparité entre les ions possédant un adduit alcalin/alcalino-terreux et ceux qui n'en possède pas. La famille d'ions avec adduits alcalins possède un ratio H/C entre 1 et 2,5 et un ratio O/C entre 0 et 0,8. Les ions les plus intenses de cette famille se trouvent au niveau du rapport H/C de 2 et rapport O/C entre 0 et 0,4. Ces molécules sont saturées et plus ou moins oxydées. Les ions radicalaires et/ou avec protons se trouvent quant à eux à $H/C < 1$ et O/C entre 0 et 0,4. Ces composés sont insaturés voir aromatiques et peu oxydés. Les différences de rapport H/C et O/C entre les deux familles d'ions observées peuvent être expliquées par une variation du mécanisme d'ionisation. En effet, les molécules avec un nombre élevé d'insaturations et des délocalisations électroniques vont facilement s'ioniser avec le laser, ce qui n'est pas le cas des acides gras et autres molécules saturées. Cependant, la présence de sels alcalins/alcalino-terreux va permettre l'ionisation de ce type de molécules pour les rendre visibles sur le spectre de masse. En conclusion, les diagrammes VKN montrent des différences entre les échantillons de suies mais aussi quelques similarités qui seront développées par la présentation d'une autre cartographie moléculaire : Le diagramme DBE vs C.

Le diagramme DBE vs C est utilisé dans le cadre cette étude pour différencier certaines classes moléculaires présentes pour les échantillons de suie analysés. Les classes HC, CHO_{1-5} et $CHNO_{0-5}$ sont premièrement comparées dans la **Erreur ! Source du renvoi introuvable.** pour les échantillons Fond du Val et Préaux (trop peu de signaux observés pour l'échantillon de Quincampoix). Dans ce graphique, le nombre d'équivalent double liaison est présenté en fonction du nombre d'atomes de carbones pour chaque formule brute attribuée. Plusieurs lignes sont tracées sur ces diagrammes, celle des composés cata-condensés (en rouge), des péri-condensés (en bleu) et des composés avec uniquement du carbone et de l'oxygène. Les molécules cata-condensées sont définies par des structures dont les atomes de carbone ne partagent pas plus de deux cœurs aromatiques. Ils sont exprimés par la formule $C_{(4i+2)}H_{(2i+2)}$ avec i correspondant au nombre de cycles. A l'inverse, les péri-condensés ont leurs atomes de carbone partagés avec plus de deux noyaux aromatiques. Les profils d'ions sont similaires entre les échantillons avec une grande proportion des ions HC, CHO_{1-5} et $CHNO_{0-5}$ avec une DBE au-dessus de 5, montrant ainsi la présence de molécules avec au moins un noyau aromatique (DBE = 4). Une partie de ces ions présente une structure condensée, entre la ligne des structures cata et péri condensées. Cependant, la quantité des ions avec des structures aromatiques de la classe HC (HAP) est moindre par rapport aux ions CHO_{1-5} (O-HAP) et $CHNO_{0-5}$ (N-HAP, NO-HAP) possédant des structures hautement condensées. 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. Les HAP, O-HAP ou N-HAP peuvent être liés une dégradation thermique (combustion incomplète ou pyrolyse) de multiples origines. Il n'est donc pas possible pour le moment de relier ces composés à l'incendie.

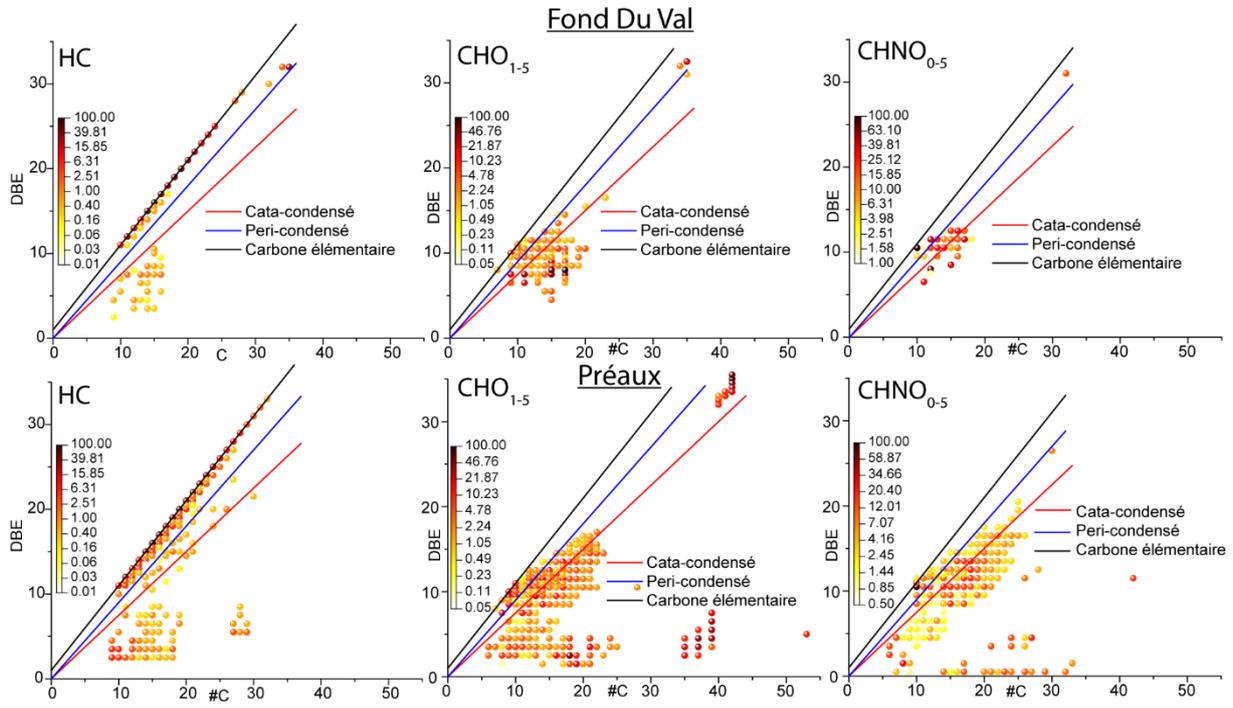


Figure 31 : Diagramme DBE vs C des classes HC, CHO₁₋₅ et CHNO₀₋₅ des échantillons Fond du Val et Préaux. Le code couleur correspond à l'intensité normalisée des ions

A titre de comparaison, la **Erreur ! Source du renvoi introuvable.** montre l'échantillon de suie de Préaux par rapport à des suies de propane générant plus de composés HC. En effet, les suies propane génèrent des ions plus intenses par rapport à l'échantillon de Préaux. Cependant, le signal de l'échantillon de préaux est beaucoup plus complexe, comme le montre l'agrandissement à m/z 265. L'échantillon de suie propane présente plus de 80% de composés hydrocarbonés, composés essentiellement de molécules de type HAP et O-HAP, avec des structures cata et péri condensées de masses élevées. Les signaux des ions HAP sont peu observés ou en très faible intensité pour l'échantillon de Préaux, montrant ainsi la faible présence de ces HAP de haute masse. En revanche, la présence de N-HAP est plus importante pour l'échantillon de Préaux en comparaison de l'échantillon de suies propane.

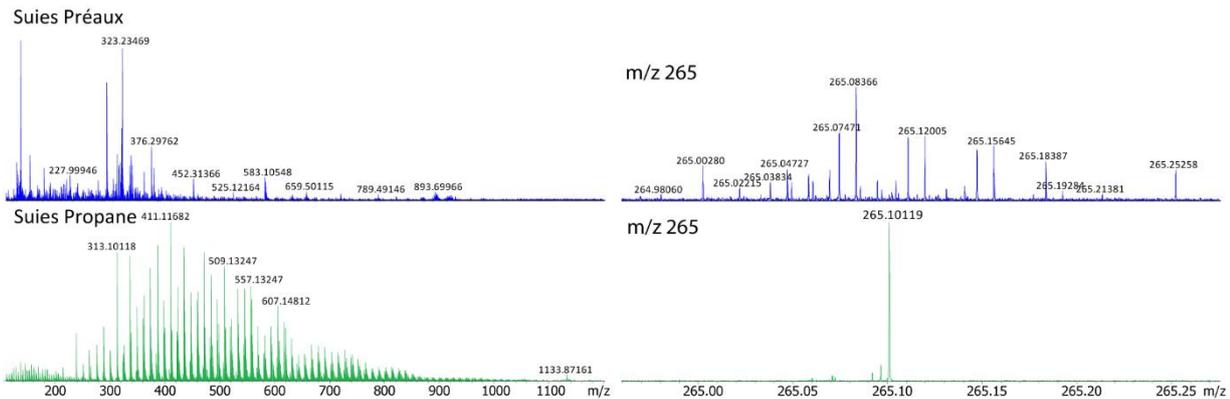


Figure 32 : Comparaison des spectres de masse des suies de Préaux avec des suies issues de la combustion de propane avec à gauche, le spectre de masse global des deux échantillons et à droite, un agrandissement à m/z 265.

Du carbone élémentaire peut aussi être observé pour la classe HC de l'échantillon de Préaux (Figure 31), l'un des produits ultimes de la dégradation thermique de composés organiques. Enfin, d'autres hydrocarbures moins insaturés sont présents pour les échantillons Fond-Du-Val et Préaux. Des formules brutes de ces classes peuvent être extraites afin d'en déterminer des exemples de structures possibles (aussi nommées structures putatives). Le Tableau 16 montre un exemple de ces structures.

Tableau 16 : Exemple de formules brutes de l'échantillon Fond Du Val et Préaux pour les classes HC, CHO₃ et CHO₄. Ces ions font partie des plus intenses de chaque classe.

Préaux	Fond Du Val
--------	-------------

m/z	Erreur (ppm)	Formule	Structure possible (neutre)	m/z	Erreur (ppm)	Formule	Structure possible (neutre)
121.101189	-0.012	C ₉ H ₁₃		141.06988	-0.026	C ₁₁ H ₁₀	
225.054646	-0.114	C ₁₄ H ₉ O ₃		173.05971	-0.2	C ₁₁ H ₉ O ₂	
282.076105	-0.072	C ₁₆ H ₁₂ NO ₄		169.088578	0.132	C ₁₂ H ₁₁ N	

Ces structures possibles contiennent au moins deux noyaux aromatiques (DBE 8).

L'étude des ions avec différents adduits permet d'avoir des informations supplémentaires sur les échantillons de suies. Sont présentés dans la Figure 33 les cartographies DBE vs C pour certaines classes avec adduit calcium.

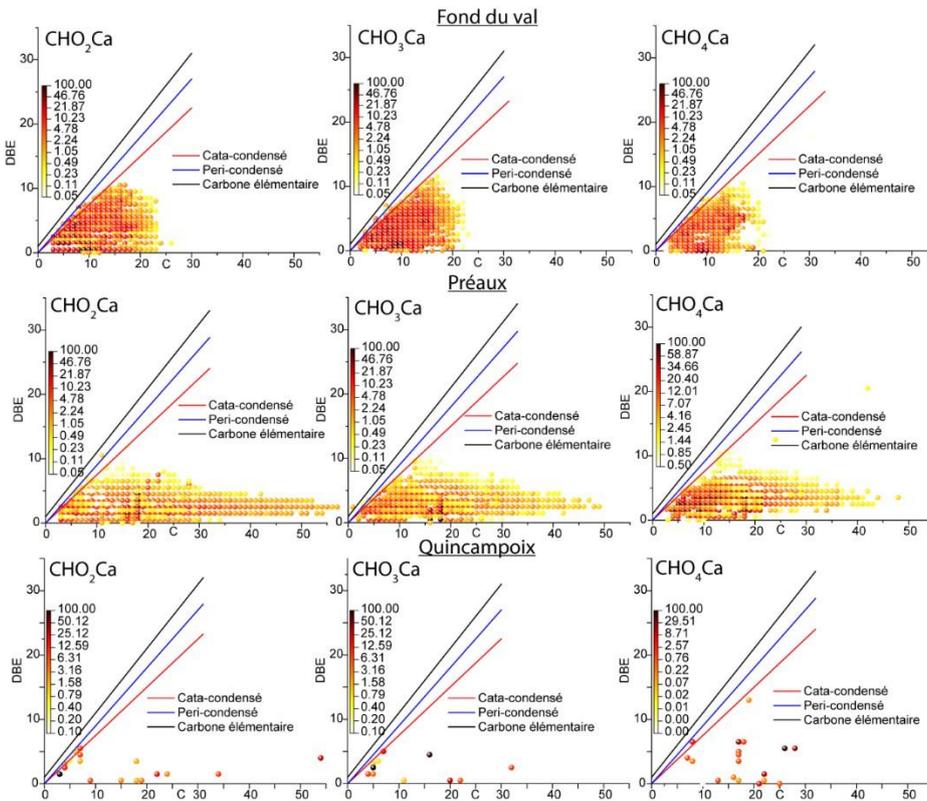
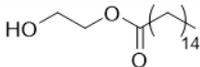
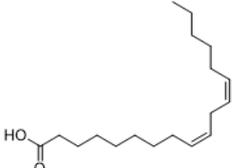
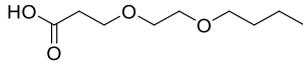
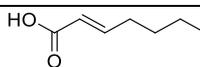
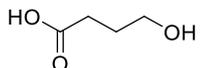
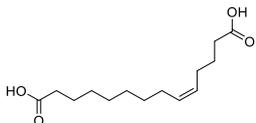
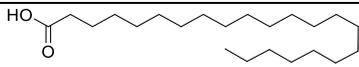
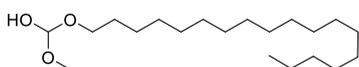
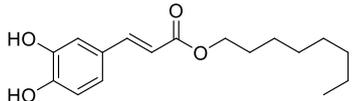


Figure 33 : Diagramme DBE vs C des classes CHO₂Ca, CHO₃Ca et CHO₄Ca des échantillons Fond du Val, Préaux et Quincampoix. Le code couleur correspond à l'intensité normalisée des ions

Des profils très différents sont remarqués pour les trois échantillons. En effet, la DBE des ions de l'échantillon Fond Du Val est entre 0 et 10 avec un nombre d'atomes de carbone entre 3 et 20. Les ions avec la structure la plus insaturée sont proches de la ligne des cata-condensés. Les ions les plus intenses ont cependant une DBE inférieure à 5. Ils correspondent à des ions peu insaturés avec au maximum un noyau aromatique. De nombreux motifs de répétitions de type CH₂ sont représentés par de nombreux points alignés et uniformes par valeur de DBE. Les ions de l'échantillon de Préaux présentent des chaînes carbonées d'autant plus longues. Les composés à faible DBE avec une longue série d'unités CH₂ peuvent être associés à des composés comme des acides gras ou lipides. Peu de séries alkylées sont observables pour l'échantillon Quincampoix en comparaison des deux autres. Cette observation est en lien avec le peu de formules brutes attribuées pour cet échantillon. Des formules brutes et structures putatives peuvent être extraites de la même manière que pour les classes sans adduits calcium, potassium ou sodium. Ces formules sont présentées dans le Tableau 17. Les structures putatives déterminées sont principalement des acides gras saturés/insaturés ainsi que des oligomères d'éthylène glycol.

Tableau 17: Exemple de formules brutes de l'échantillon Fond Du Val et Préaux pour les classes CHO₂Ca, CHO₃Ca et CHO₄Ca. Ces ions font partie des plus intenses de chaque classe.

<i>m/z</i>	Erreur (ppm)	Formule	Structure putative neutre
Préaux			
339.220633	0.108	C ₁₈ H ₃₅ O ₃ Ca	
319.194465	-0.048	C ₁₈ H ₃₁ O ₂ Ca	
229.074736	-0.040	C ₉ H ₁₇ O ₄ Ca	
Fond du Val			
167.037947	0.001	C ₇ H ₁₁ O ₂ Ca	
285.17372	-0.009	C ₄ H ₇ O ₃ Ca	
295.12167	0.021	C ₁₄ H ₂₃ O ₄ Ca	
Quincampoix			
379.288356	-0.021	C ₂₂ H ₄₃ O ₂ Ca	
369.267626	-0.037	C ₂₀ H ₄₁ O ₃ Ca	
331.121662	0.045	C ₁₇ H ₂₃ O ₄ Ca	

Les ions avec adduits potassium ont, pour l'échantillon de Préaux, une distribution similaire de la DBE en fonction du nombre de carbone avec les ions CHO₂₋₄Ca (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**). Ces ions peuvent correspondre à un changement d'adduit (Ca <=> K). Très peu d'ions avec adduits potassium ont été déterminés pour l'échantillon de Fond-Du-Val, ce qui permet de confirmer les résultats en chromatographie ionique où la concentration en ions K⁺ était faible. L'échantillon de Quincampoix dispose de quelques séries d'ions, à DBE autour de 1 pour les classes CHO₂₋₃K et à DBE autour de 2 et 7 pour la classe CHO₄K.

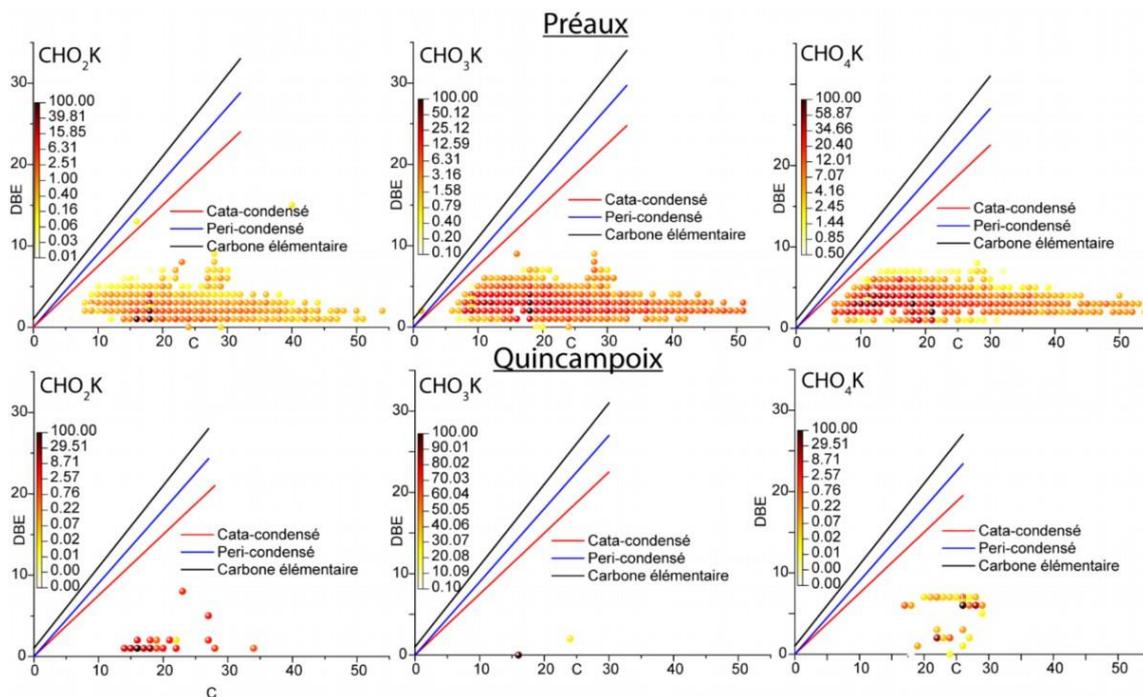


Figure 34 : Diagramme DBE vs C des classes CHO₂K, CHO₃K et CHO₄K des échantillons Préaux et Quincampoix. Le code couleur correspond à l'intensité normalisée des ions

Certains ions parmi les plus intenses sont introduits dans le Tableau 18. Les structures putatives de ces ions sont associées à des acides gras saturés/insaturés et phtalates.

Tableau 18 : Exemple de formules brutes des échantillons Préaux et Quincampoix pour les classes CHO₂K, CHO₃K et CHO₄K. Ces ions font partie des plus intenses de chaque classe.

Préaux				Quincampoix			
m/z	Erreur (ppm)	Formule	Structure neutre putative	m/z	Erreur (ppm)	Formule	Structure neutre putative
321.219006	0.099	C ₁₈ H ₃₄ O ₂ K		281.18775	-0.044	C ₁₅ H ₃₀ O ₂ K	
337.213933	0.060	C ₁₈ H ₃₄ O ₃ K		325.213916	-0.049	C ₁₆ H ₃₄ O ₃ K	
395.255811	0.018	C ₂₁ H ₄₀ O ₄ K		457.271458	0.020	C ₂₆ H ₄₂ O ₄ K	

Les derniers diagrammes de DBE en fonction du nombre d'atomes de carbone correspondant aux ions avec adduits sodium sont présentés dans la Figure 35.

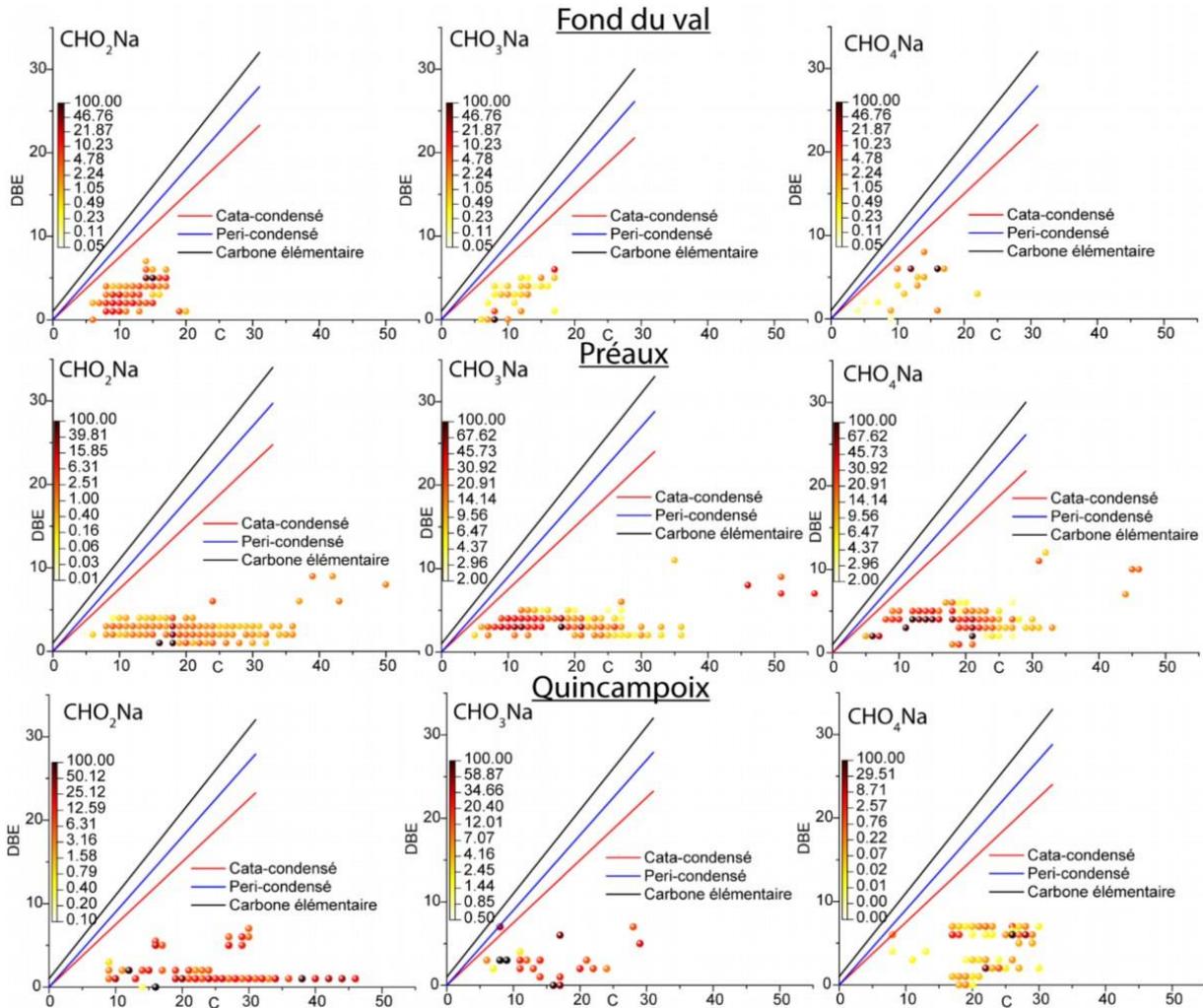


Figure 35 : Diagramme DBE vs C des classes CHO_2Na , CHO_3Na et CHO_4Na des échantillons Fond du Val, Préaux et Quincampoix. Le code couleur correspond à l'intensité normalisée des ions

La plupart des ions étudiés pour les trois échantillons sont en dessous de la ligne des péri-condensés avec une DBE moyenne de 3. L'échantillon de Fond Du val présente une DBE variable avec un nombre d'atomes de carbone autour de 20. Les échantillons Préaux et Quincampoix ont un nombre d'atomes de carbone plus élevé et présentent de longues séries d'alkylation. Enfin, le Tableau 19 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 ($K \leftrightarrow Na$). 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 19 : Exemple de formules brutes des échantillons Fond du Val, Préaux et Quincampoix pour les classes CHO_2Na , CHO_3Na et CHO_4Na

m/z	Erreur (ppm)	Formule	Structure putative neutre
<u>Préaux</u>			
305.245105	-0.012	$C_{18}H_{34}O_2Na$	
319.224336	0.093	$C_{18}H_{32}O_3Na$	

249.109748	-0.072	$C_{12}H_{18}O_4Na$	
<u>Fond du Val</u>			
257.151184	0.067	$C_{15}H_{22}O_2Na$	
185.114823	-0.041	$C_8H_{18}O_3Na$	
301.141032	-0.006	$C_{16}H_{22}O_4Na$	
<u>Quincampoix</u>			
221.151188	0.057	$C_{12}H_{22}O_2Na$	
297.240001	0.048	$C_{16}H_{34}O_3Na$	
441.297524	0.015	$C_{26}H_{42}O_4Na$	

Il est enfin possible de comparer les formules brutes déterminées pour les trois échantillons de suies par l'utilisation d'un diagramme de Venn, comme présenté dans la Figure 36.

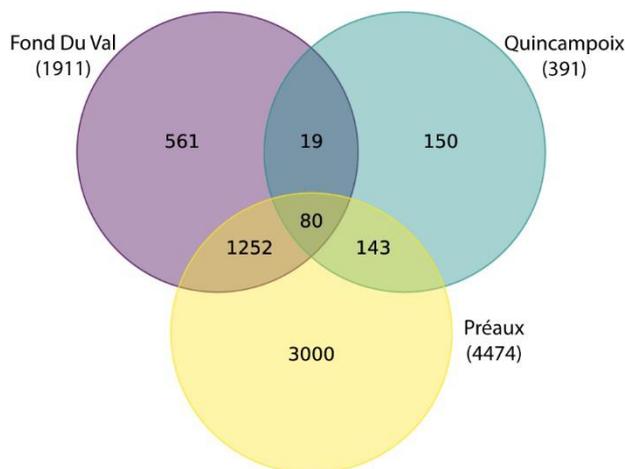


Figure 36 : Diagramme de Venn des formules brutes attribuées pour les échantillons Fond Du Val, Quincampoix et Préaux

Pour rappel, ce diagramme permet la détermination des formules brutes communes aux trois échantillons. Dans le cas de la **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**, **80** formules brutes sont communes aux trois échantillons. Les ions les plus intenses parmi ces 80 formules brutes contiennent des adduits calcium. Il est possible de citer par exemple les ions $C_{18}H_{31}O_2Ca$, $C_9H_{19}O_2Ca$ et $C_{17}H_{24}O_4Na$. Beaucoup d'ions communs sont retrouvés entre l'échantillon de préaux et celui de Fond Du Val (**1252**). La plupart de ceux-ci ont des adduits calcium et les ions $C_{18}H_{33}O_2Ca$, $C_{18}H_{35}O_3Ca$ et $C_{10}H_{21}O_2Ca$ sont parmi les plus intenses. Une partie de ces ions peuvent correspondre à des acides gras plus ou moins insaturés. Enfin, les **3000** ions spécifiques de l'échantillon de Préaux contiennent environ un tiers d'adduits potassium, un autre tiers d'adduits calcium et le reste d'ions avec adduits sodium et sans adduits alcalins/alcalino-terreux. Parmi les ions les plus intenses se trouvent le $C_{18}H_{36}O_2K$, le $C_{16}H_{32}O_2K$ et le $C_{16}H_{33}O_3Ca$. Les deux premiers ions correspondent respectivement aux acides stéariques et palmitiques, acides gras retrouvés partout dans l'environnement.

Conclusion et perspectives sur les analyses FTICR MS

Les analyses effectuées en LDI FTICR MS dans le cadre de l'incendie Lubrizol ont mis en évidence la présence variable de sels (sodium, potassium et calcium) en accord avec les analyses en chromatographie ionique effectuées précédemment. 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 reliables à l'incendie Lubrizol de par leur présence élevée dans l'environnement. En outre, peu de composés soufrés ont été trouvés, sachant que de nombreux produits Lubrizol comme les dialkyldithiophosphate de zinc (additif de Lubrifiants) contiennent du soufre et du phosphore. Un traitement des données plus approfondi en changeant les paramètres d'attribution moléculaire pourrait peut-être permettre de caractériser ces ions avec du soufre ou du phosphate. De plus, de nombreux ions n'ont pas pu être attribués à haute masse en raison du nombre d'éléments utilisés pour les attributions et les erreurs maximales associées (0,2 ppm dans notre cas). D'autres techniques d'ionisation en spectrométrie de masse comme la photo-ionisation à pression atmosphérique (APPI) ont été utilisées afin de caractériser au mieux ces échantillons, le traitement des données est en cours de réalisation.

Par la suite, d'autres échantillons de suie seront analysés afin de dégager des marqueurs communs entre les échantillons de suies. De plus, l'analyse de suies issues de la combustion contrôlée de produits Lubrizol pourrait permettre de déterminer des marqueurs fiables de l'incendie et approfondir l'interprétation des résultats d'analyse des suies prélevées lors de l'incendie.

Analyses en GCxGC Orbitrap

Deux stratégies ont été mises en œuvre pour rechercher les molécules potentiellement liées à l'accident :

1. Recherches **ciblées** en recherchant les molécules présentes dans les stocks Lubrizol
2. Recherches **non ciblées** en comparant les chromatogrammes entre eux et à l'aide des logiciels de déconvolution

Les résultats sur suies ont été obtenus principalement à l'aide des résidus carbonés L-FdV-X et des écouillons L-MSA-SUIE-1 et L-MSA-SUIE-2. En revanche, aucun composé n'a pu être détecté sur les lingettes Kimtech, certainement trop peu concentrées.

Il est important de préciser que cette étude a pour objectif d'identifier les molécules, aucune quantification ne sera réalisée. C'est pour cette raison que les masses des résidus carbonés pesées ne seront pas prises en compte. On peut cependant noter que L-FdV-4 est un échantillon possédant plus de matière que les trois autres L-FdV.

Par ailleurs, les noms et structures des molécules présentées dans la suite de ce rapport sont des suggestions, obtenues par recoupement entre la formule brute des fragments compatibles avec la précision de mesure de masse de l'instrument (< 3 ppm), les indice de rétention, et à la comparaison des spectres de masse avec ceux de la base de données NIST ou Orbitrap. Cependant, les bases de données n'étant pas exhaustives, il est possible que certaines structures proposées ne soient pas exactes (isomérisie) mais proches structurellement. L'injection des molécules sous forme d'étalon pourra dans l'avenir lever les ambiguïtés si nécessaires.

Enfin, un système de notation sera utilisé pour évaluer la probabilité de chacune des molécules présentées à être émise lors de l'incendie. Il s'agit de repères **entièrement subjectifs**, dans la mesure où il n'est pas possible de se baser sur des éléments chiffrés pour réaliser une telle détermination. Chaque note sera accompagnée d'une explication.

Note : Dans la suite de ce rapport seront nommés des blancs. Le « blanc » correspond à un extrait obtenu dans le solvant et la même verrerie mais en l'absence de l'échantillon. Le « blanc écouillon » correspond à un écouillon stérile extrait de la même manière que les mêmes écouillons recouverts des échantillons (Figure 23). Des ratios ont été effectués entre les aires des échantillons et des blancs afin de déterminer si les molécules sont significativement plus intensément retrouvées dans les échantillons, et aidera à déterminer la notation. Les résultats complets et tableaux détaillés sont disponibles sur demande dans le rapport présentant la partie analyse chimique uniquement. D'autre part, afin de comparer nos résultats avec des suies urbaines, des suies NIST ont été analysées, et sont considérées comme caractéristiques d'un bruit de fond urbain.

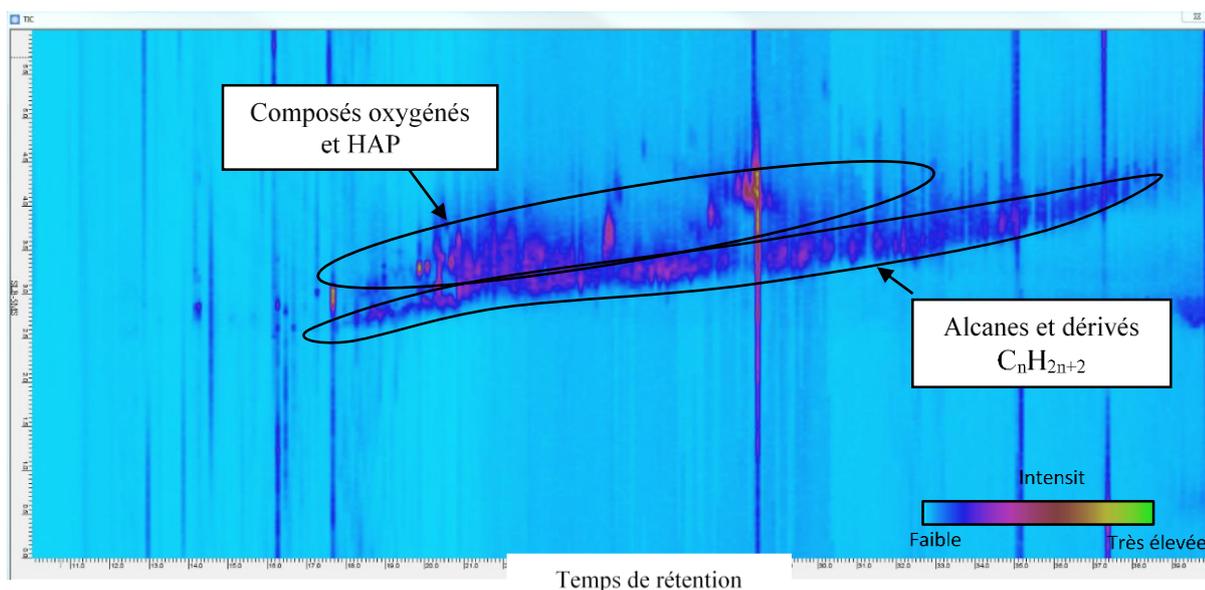


Figure 37 : Visualisation via « GC image » d'un chromatogramme en 2 dimensions de l'échantillon L-FdV-4

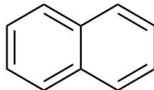
Les résultats de l'analyse des suies (L-FdV-X et L-MSA-SUIE-X, Tableau 15 **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**) montrent de façon évidente la forte présence **d'hydrocarbures linéaires et/ou ramifiés**, de formule brute C_nH_{2n+2} , dans les échantillons. À l'aide d'un mélange d'alcane connus, ils ont pu être identifiés et replacés sur le chromatogramme. Les alcanes étant des molécules qui se fragmentent très facilement, il n'est pas possible de conserver l'ion moléculaire avec une ionisation EI. Les principaux ions de rapport m/z qui les caractérisent sont les suivants : 57,0699 ($C_4H_9^+$) ; 71,0854 ($C_5H_{11}^+$) ; 85,1011 ($C_6H_{13}^+$) ; 97,1011 ($C_7H_{15}^+$) ; 111,1167 ($C_8H_{15}^+$). L'intensité des pics obtenus est extrêmement élevée, ce qui est en accord la nature des produits stockés sur le site Lubrizol et celui de Normandie logistique, où le produit le plus abondant ayant brûlé est de l'huile minérale. Par ailleurs, les suies NIST contiennent également beaucoup d'hydrocarbures linéaires et ramifiés, ces molécules font bien partie du bruit de fond quotidien.

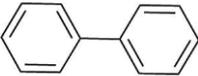
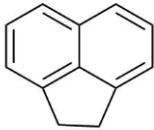
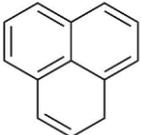
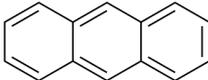
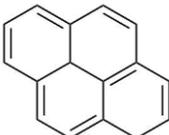
Le chromatogramme en deux dimensions (Figure 37) présente une approche plus résolutive des mélanges analysés. On observe sur la première dimension (horizontale) la séparation des composés en fonction de leur température d'ébullition et en seconde dimension (verticale) une séparation en fonction de la polarité des composés. Cette cartographie met en évidence la présence des alcanes et dérivés ainsi que des composés oxygénés et d'HAP qui seraient co-élus dans le cadre d'une chromatographie unidimensionnelle.

Quelques **hydrocarbures aromatiques** (HA) monocycliques (aussi appelés alkyl benzènes) sont retrouvés. Un rapport m/z caractéristique des HA est le 119,0852 (-1,6 ppm) correspondant au $C_9H_{11}^+$. Une vingtaine de pics apparaissent sur le chromatogramme, indiquant la présence de nombreux alkyls benzènes. Ces molécules ont des ratios échantillon/blanc solvant compris entre 1 et 4. Les suies NIST en contiennent généralement autant que les blancs solvant.

Le tableau 17 présente les Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques (HAPs) retrouvé dans les échantillons de suies L-FdV-X et L-MSA-SUIE-X.

Tableau 20 : HAPs retrouvés dans les échantillons de suie provenant des résidus carbonés

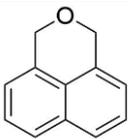
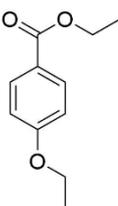
Ions moléculaire en gras (précision de masse)	ion en (m/z) de	Formule brute	Nom et structure possibles	t_R (min), RI, ΔRI (si connu)	Probabilité de l'émission de la molécule proposée par l'incendie (0 : Très peu probable ; 4 : Très probablement) Qualification subjective
128,0619 ppm	(-1,3)	$C_{10}H_8$	Naphthalene 	$t_R = 10,85$ RI = 1186 $\Delta RI = 4$	1 : Présents dans les blancs et bruit de fond quotidien (suies NIST)
127,0540 ppm	(-1,4)				

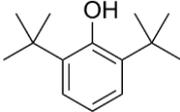
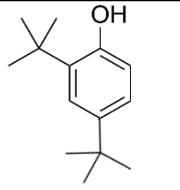
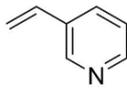
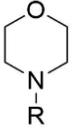
154,0775 ppm) 153,0696 ppm)	(-1,6 (-1,5	C ₁₂ H ₁₀	Biphenyl 	t _R = 12,69 RI = 1396 ΔRI = 11	1 : Présents dans les blancs et bruit de fond quotidien (suies NIST)
154,0775 ppm) 153,0696 ppm)	(-1,6 (-1,5	C ₁₂ H ₁₀	Acenaphthene 	t _R = 13,51 RI = 1491 ΔRI = 5	2 : Présent dans certains échantillons L-FdV-X et L-MSA-SUIE-X, mais pas les blancs ni les suies NIST.
166,0775 ppm) 165,0695 ppm)	(-1,5 (-1,7	C ₁₃ H ₁₀	1H-phenalene 	t _R = 14,51 RI = 1611	1 : Présente dans les blancs et les suies NIST. L'indice de rétention du 1H-phenalene n'est pas dans la base NIST pour confirmer sa structure
178,0774 ppm) 176,0618 ppm)	(-1,9 (-1,6	C ₁₄ H ₁₀	Anthracene 	t _R = 16,25 RI = 1811 ΔRI = 5	2 : Très forte présence dans les échantillons L-FdV-X et L-MSA-SUIE-X mais également présent dans les blancs et suies NIST
202,0774 ppm) 200,0618 ppm)	(-1,4 (-1,1	C ₁₆ H ₁₀	Pyrene 	t _R = 18,75 RI = 2096 ΔRI = 5	1 : Présence dans les résidus carbonés et dans les suies NIST à teneur égales

Les hydrocarbures aromatiques, et notamment les HAP sont donc bien présents dans les échantillons de suies liés l'accident. Mais les HAP sont présents dans la suie NIST (représentative de suies urbaines). Seul l'anthracène est détecté à des teneurs beaucoup plus élevées dans les échantillons mais il ne pourra être utilisé comme marqueur de l'incendie dans la mesure où il est présent de manière très fréquente dans l'environnement : il est émis par diverses sources (chauffage, voiture...).

Les Tableau 21 et Tableau 22 présentent les **molécules portant des atomes d'oxygène et/ou d'azote**, et retrouvées dans les suies L-FdV-X et/ou L-MSA-SUIE-X. Le Tableau 21 se base sur les molécules retrouvées dans l'air (voir **Erreur ! Source du renvoi introuvable.** et **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**), tandis que le Tableau 22 présente les molécules trouvées par recherches non ciblées.

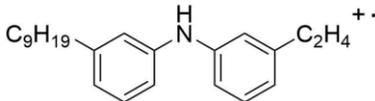
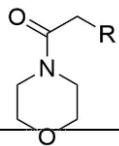
Tableau 21 : Recherche ciblée de composés oxygénés et azotés à partir des résultats obtenus dans l'air

ions moléculaire en gras (rapport m/z) (précision de masse)	(ion en gras) (rapport m/z) (précision de masse)	Formule brute	Nom et structure possibles	t _R (min), RI, ΔRI (si connu)	Probabilité de l'émission de la molécule proposée par l'incendie (0 : Très peu probable ; 4 : Très probablement) Qualification subjective
170,0723 ppm) 141,0699 ppm) 115,0542 ppm)	(-1,8 (-1,4 (-0,5	C ₁₂ H ₁₀ O	1H3H-naphtho [1,8,cd]pyran 	t _R = 12,87 RI = 1428 ΔRI = 11	2 : Ratios entre échantillons et blancs variables (de 0,7 à 59). Cela confirme sa présence dans l'environnement mais sa liaison à l'accident n'est pas déterminée.
194,0935 ppm) 166,0622 ppm) 149,0596 ppm) 138,0311 ppm)	(-1,3 (-1,4 (-0,8 (-0,5	C ₁₁ H ₁₄ O ₃	Benzoic acid, 4 ethoxy ethyl ester 	t _R = 13,86 RI = 1535 ΔRI = 6	4 : Retrouvé dans les échantillons L-MSA-SUIE-1 et L-MSA-SUIE-2. Absent des blancs et des suies NIST.

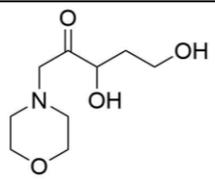
121,0283 <i>ppm</i>) (-0,5					
206.1661 <i>ppm</i>) 191.1427 <i>ppm</i>) (-2,0	C ₁₄ H ₂₂ O	2,6-di-tert-butylphenol 	t _R = 13,19 RI = 1454 ΔRI = 3	2 : Retrouvé dans tous les échantillons à forte teneur, mais également dans les blancs. Présent dans les stocks dans 15 produits. RI confirmé par achat de la molécule	
206.1661 <i>ppm</i>) 191.1427 <i>ppm</i>) (-2,0	C ₁₄ H ₂₂ O	2,4-di-tert-butylphenol 	t _R = 13,89 RI = 1517 ΔRI = 1	2 : Retrouvé dans tous les échantillons à forte teneur, mais également dans les blancs. RI confirmé par achat de la molécule.	
105,0572 <i>ppm</i>) 104,0494 <i>ppm</i>) (-1,1 79,0416 <i>ppm</i>) (-0,6	C ₇ H ₇ N	3-vinylpyridine 	t _R = 7,90 RI = 979 ΔRI = 2	2 : Présente dans les échantillons et le blanc. Ratios difficilement réalisables (bruit de fond intense). Non retrouvée dans les suies NIST. Cela confirme sa présence dans l'environnement au moment de l'accident. L'achat de cette molécule a permis de confirmer son RI.	
195,1251 <i>ppm</i>) 152,0703 <i>ppm</i>) (-1,7 110,0601 <i>ppm</i>) (-1,2	C ₁₁ H ₁₇ NO ₂	Des morpholines 	t _R = 12,24 RI = 1344	3 : Molécule possédant 2 isomères, semble intéressante à suivre, ratios entre les échantillons et les blancs assez élevés.	
195,1250 <i>ppm</i>) 152,0703 <i>ppm</i>) (-2,2			t _R = 12,35 RI = 1354		

Ces résultats confirment la présence de ces molécules dans l'environnement au moment de l'incendie.

Tableau 22 : Recherches non ciblées de composés oxygénés et azotés

Ions (ion moléculaire en gras) (rapport <i>m/z</i>) (précision de masse)	Formule brute ¹⁷	Structure possible	t _R (min), RI, ΔRI (si connu)	Probabilité de l'émission de la molécule proposée par l'incendie (0 : Très peu probable ; 4 : Très probablement) Qualification subjective
322,2529 (-1,4 <i>ppm</i>) 250,1588 (-1,1 <i>ppm</i>) 236,1432 (-1,4 <i>ppm</i>)	C ₂₃ H ₃₂ N		t _R = 28,39 RI = 2880	3 : Ratios très élevés, cohérent avec les produits brûlés
325,2972 (-1,0 <i>ppm</i>) 212,1644 (-0,5 <i>ppm</i>) 198,1488 (-0,1 <i>ppm</i>) 184,1329 (-1,8 <i>ppm</i>)	C ₂₀ H ₃₉ NO 2	Des morpholides 	t _R = 24,28 RI = 2617	3 : Ratios très élevés, ces molécules semblent intéressantes à suivre. Ratios et spectres de masse présentés en Erreur ! Source du renvoi

¹⁷ Dans le cas où l'ion moléculaire n'est pas retrouvé explicitement, la formule indiquée correspond à l'ion *m/z* le plus lourd relevé

142,0861 (-1,3 ppm) 129,0783 (-1,2 ppm) 114,0548 (-1,2 ppm)				introuvable.. L'ion moléculaire étant très faible, le spectre de masse global obtenu pour les deux molécules est le même.
353,3281 visible seulement dans L-FdV-1 (-2,1 ppm) 352,3202 (-2,3 ppm) 212,1643 (-1,2 ppm) 198,1485 (-1,6 ppm) 184,1329 (-1,7 ppm) 142,0861 (-0,8 ppm) 129,0783 (-1,2 ppm) 114,0549 (-0,7 ppm)	C ₂₂ H ₄₃ NO ₂	Où R = C _n H _{2n+2}	tR = 26,81 RI = 2814	
202.1071 (-1,5 ppm) 160.0966 (-1,3 ppm) 158.0810 (-1,2 ppm) 142.0862 (-0,7 ppm) 128.0705 (-0,6 ppm) 100,0756 (-0,7 ppm)	C ₉ H ₁₆ NO ₄		tR = 23,41 RI = 2544.	3 : semble intéressante à suivre, peu présente dans les blancs.

Parmi les produits Lubrizol connus ayant brûlé, se trouvent :

- 2,6-di-tert-butylphenol
- Produits issus de réactions de la Benzeneamine, N-phenyl- avec nonene (branched)
- diphenylamine
- N,N'-Méthylènebismorpholine
- Morpholine

Ces quatre produits pourraient correspondre avec certaines des molécules retrouvées ci-dessus dans les échantillons de suies.

Les analyses de l'air (voir partie suivante.) ont permis de mettre en lumière des **molécules soufrées**. Quelques-unes de ces molécules sont retrouvées en faible teneur dans les suies (Tableau 23).

Tableau 23 : Composés soufrés retrouvés dans les échantillons de suie à partir des résultats de la partie air

Ions (ion moléculaire en gras) (rapport m/z) (précision de masse)	Formule brute	Nom et structure possibles	tR (min), RI, ΔRI (si connu)	Précisions
140,0654 (0,1 ppm) 125,0419 (0,1 ppm)	C ₈ H ₁₂ S	Thiophene 3,4-diethyl	tR = 9,40 RI = 1047	Possibilité d'une présence dans L-FdV-4 (voir Tableau 1).
140,0652 (-1,6 ppm) 97,0106 (-0,5 ppm)	C ₈ H ₁₂ S	Thiophene, 2-butyl	tR = 9,48 RI = 1057 ΔRI = 12	Possibilité d'une présence dans L-FdV-4 (voir Tableau 1).
211,0447 (-1,3 ppm) 108,0028 (-0,5 ppm)	C ₁₃ H ₉ NS	Benzothiazole, 2-phenyl	tR = 17,97 RI = 2007 ΔRI = 15	Possibilité d'une présence dans L-MSA-SUIE-1 et L-MSA-SUIE-2 (voir Tableau 1). L'achat de cette molécule a permis de confirmer son RI.

Ces résultats confirment légèrement ceux obtenus dans l'air.

Le Tableau 24 présente les **molécules portant au moins un atome de phosphore** et retrouvées dans les suies L-FdV-X principalement (parfois L-MSA-SUIE-X).

Tableau 24 : Recherche ciblée de composés phosphorés

Des composés phosphatés ont pu être mis en lumière en recherchant la masse 98,9842, correspondant à la formule

Nom et structure	Formule brute	Ions (rapport <i>m/z</i>) (précision de masse)	tR, RI, ΔRI (si connu)	Probabilité de l'émission de la molécule proposée par l'incendie (0 : Très peu probable ; 4 : Très probablement) Qualification subjective
Triphenyl phosphate	C ₁₈ H ₁₅ O ₄ P	326,0610 (-0,9 ppm) 325,0624 (1,5 ppm) 233,0359 (-1,3 ppm) 215,0254 (-1,4 ppm)	tR = 21,99 RI = 2418 ΔRI = 14	3 : Retrouvée dans tous les échantillons de suies et cohérente avec les produits brûlés. Absente des blancs. Confirmation de la formule brute par PCI et par achat de la molécule (confirmation du RI).
O,O,O-Triphenylphosphorothioate	C ₁₈ H ₁₅ O ₃ PS	342,0475 (0,2 ppm) 265,0079 (-1,5 ppm) 249,0121 (-1,5 ppm) 154,9715 (-1,3 ppm)	tR = 22,85 RI = 2494 ΔRI = 20	4 : Cette molécule est présente dans les stocks Lubrizols et n'apparaît pas dans les blancs ni dans les échantillons de suies NIST.
Triethyl phosphate	C ₆ H ₁₅ O ₄ P	182,07080 155,0463 (-3,0 ppm) 127,0155 (-1,4 ppm) 109,0041 (0,3 ppm) 98,9842 (-0,5 ppm)	Non retrouvée	0 : Non retrouvée mais quelques fragments caractéristiques ont été retenus (voir Tableau 25 : Recherche non ciblée de composés phosphorés)

H₄O₄P⁺. Il est très compliqué de déterminer les formules brutes dans la mesure où ce sont des composés inconnus (Tableau 25).

Tableau 25 : Recherche non ciblée de composés phosphorés

Ions (ion moléculaire en gras) (rapport <i>m/z</i>) (précision de masse)	Formule brute compatible ¹⁸ :	tR (min), RI	Probabilité de l'émission de la molécule proposée par l'incendie (0 : Très peu probable ; 4 : Très probablement). Qualification subjective
201,0074 (-0,8 ppm) 174,9919 (-0,6 ppm) 156,9813 (-0,8 ppm) 139,0153 (-1,1 ppm) 124,9997 (-1,2 ppm) 98,9841 (-1,0 ppm)	C ₄ H ₁₁ O ₅ P ₂ ⁺	tR = 16,30 RI = 1817	2 : Présent dans les blancs solvant également → à priori non spécifique mais à suivre.
154,9656 (-0,9 ppm) 98,9841 (-0,7 ppm) 74,9995 (1,3 ppm)	C ₂ H ₅ O ₄ P ₂ ⁺	tR = 21,28 RI = 2351	3 : Absent des blancs solvant, présent dans les suies NIST en quantité moindre → À suivre sur les prochains échantillons
155,0463 (-3,0 ppm) 127,0155 (-1,4 ppm) 124,9997 (-1,2 ppm) 109,0050 (0,3 ppm) 98,9842 (-0,5 ppm)	C ₄ H ₁₂ O ₄ P ⁺	tR = 14,88 RI = 1628	2 : Les ratios entre les échantillons et les blancs tendent à supposer la liaison de ces deux molécules à l'accident, cependant, certains rapports <i>m/z</i> (155, 127, 109) ne sont pas visibles dans tous les échantillons. (Voir <i>Erreur ! Source du renvoi introuvable.</i>)
155,0466 (-0,8 ppm) 139,0152 (-2,1 ppm) 98,9841 (-0,7 ppm) 81,9814 (-0,7 ppm)	C ₄ H ₁₂ O ₄ P ⁺	tR = 13,77 RI = 1533	

¹⁸ Dans la mesure où l'ion moléculaire n'est pas retrouvé, la formule indiquée correspond à l'ion *m/z* le plus lourd relevé

Parmi les produits Lubrizol connus ayant brûlé, se trouvent des produits phosphatés :

- Rxn mass of 3-methylphenyl di-4-methylphenyl Phosphate & 4-methylphenyl di-3-methylphenyl Phosphate & tris(3-methylphenyl) phosphate
- O,O,O-triphenyl phosphorothioate
- triphenyl phosphite
- dibutyl phosphonate
- Amines, C12-14-tert-alkyl, C8-20-alkyl phosphates

Conclusion sur les analyses GC × GC Orbitrap

Une dizaine de molécules intéressantes se dégagent des analyses de suies. Se distinguent des morpholines et des composés phosphorés, dont les ions moléculaires sont rarement connus. Une liaison peut être établie entre certains composés identifiés dans les suies et les molécules présentes dans les fiches de sécurité des produits brûlés fournies par Lubrizol. Les ions de rapport m/z relevés dans cette étude seront retenus en vue des analyses à suivre, qui apporteront des éléments supplémentaires pour la détermination de structures et la confirmation de présence des molécules mentionnées dans ce rapport.

5.3 Analyses multi-résidus de la fraction gazeuse émise et collectée durant l'incendie

5.3.1 Échantillonnage

Deux types de collecte ont été mises en œuvre : par tubes de thermodésorption ainsi que par barreau aimanté Twister. Les prélèvements d'air ont été réalisés par échantillonnage passif uniquement.

Les tubes de thermodésorption peuvent contenir des adsorbants différents en fonction des composés que l'on souhaite analyser. On en distingue trois catégories majeures : le noir de carbone graphité (GCB), le polymère poreux, et le tamis moléculaire. Dans le cadre d'un prélèvement à la suite d'un accident ayant libéré de nombreux produits chimiques, nous avons besoin de tubes permettant de capturer le plus large spectre de molécules volatiles et semis volatiles, afin de déterminer le maximum de polluants émis. Le Tenax TA, constitué d'un polymère (l'oxyde de 2,6-diphénylène), est reconnu pour ses capacités à adsorber une grande plage de composés plutôt polaires, allant de C6 à C26¹⁹. Les tubes Carbopack B&X sont constitués de GCB et adaptés pour la rétention de composés légers (C5 à C12). Enfin le revêtement PDMS des Twisters permettra d'adsorber des composés apolaires peu volatils.

Nous utilisons donc des tubes Gerstel remplis avec 200 mg de Tenax TA 60/80 mesh de diamètre 6,35 mm et 89 mm de long. Afin de capter des composés un peu plus légers (à partir de C5), des tubes Gerstel de mêmes dimensions remplis avec 2,3 cm de Carbopack B et 2,3 cm de Carbopack X (GCB poreux de capacité d'adsorption un peu plus élevée que les autres GCBs) 60/80 mesh sont également utilisés. Quant aux barreaux aimantés, nous avons utilisé des Twister Gerstel de 10 mm de longueur ayant à leur surface un film d'adsorbant PDMS (Polydiméthylsiloxane) de 0,5 mm d'épaisseur. Ils ont été disposés à l'air libre, posés sur un papier aluminium.

Les dispositifs de prélèvement ont été conditionnés avant analyse, à environ 330°C pour les Carbopack et les Twister, et 280°C pour les Tenax, durant 2h sous flux d'azote d'environ 50 ml/min.

Trois points de prélèvement situés dans l'université de Rouen Pasteur (3 avenue Pasteur 76 000 ROUEN, Figure 38) ont été choisis, l'un dans l'amphithéâtre 250B au rez-de-chaussée, l'autre sur la passerelle au 1^{er} étage, et le dernier dans le couloir du 4^{ème} étage. À chaque point de prélèvement a été disposé du matériel du prélèvement (voir Tableau 26).

Localisation des prélèvements

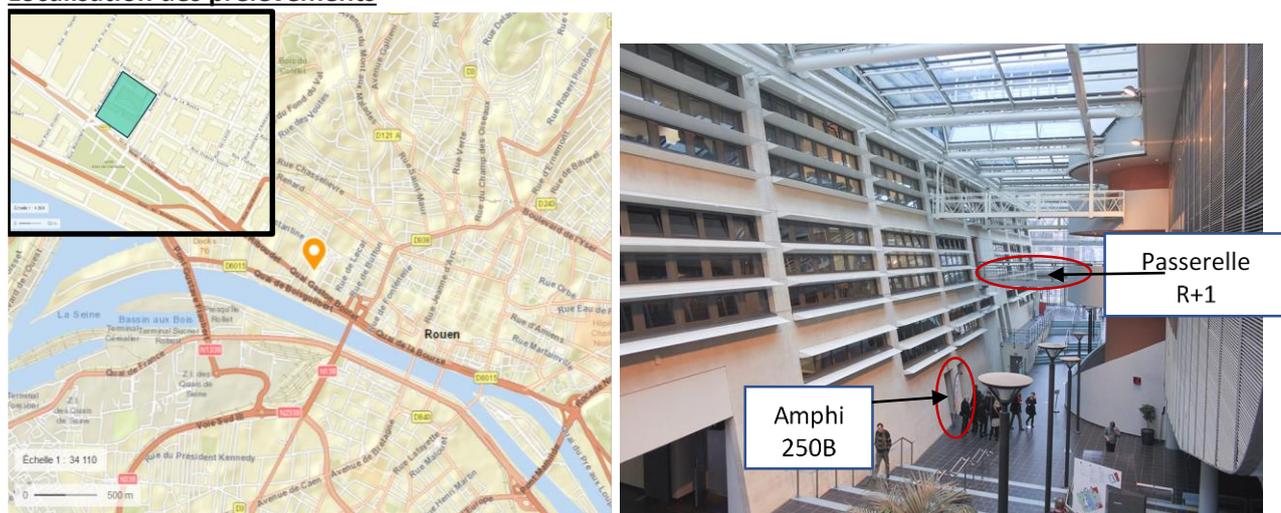


Figure 38 : Lieu de prélèvement : Université Rouen Pasteur et hall de l'université

Tableau 26 : 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
----------------------	-----------------	-------------------------	-----------------------	--

¹⁹ DESAUZIERS V., Analyse des COV en traces dans l'air, Techniques de l'ingénieur, 2009

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 Carbo-pack B&X		30/09/2019, 16h20	Amphi 250B
L-ROU-AIR-4				Passerelle R+1
L-ROU-AIR-5	Twister (PDMS)		30/09/2019, 16h20	Amphi 250B
L-ROU-AIR-6				Passerelle R+1
L-ROU-AIR-7				Couloir 4 ^{ème} étage

Des prélèvements aux mêmes endroits avec du matériel issu des mêmes lots sont réalisés environ 18 mois plus tard. Après prélèvement, tous les échantillons ont été scellés et stockés à température ambiante jusqu'à analyse les 03/06/2021 et 04/06/2021 (Tableau 24).

Tableau 27 : 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 Carbo-pack B&X		02/04/2021, 16h30	Amphi 250B
L-ROU-AIR-4'				Passerelle R+1
L-ROU-AIR-5'	Twister (PDMS)		02/04/2021, 16h30	Amphi 250B
L-ROU-AIR-6'				Passerelle R+1
L-ROU-AIR-7'				Couloir 4 ^{ème} étage

5.3.2 Instrumentation et méthodes

Les analyses ont été réalisées au laboratoire SMS, avec l'appareil décrit précédemment : GC x GC - Orbitrap. Pour les analyses d'air, le GC sera équipé d'une unité de thermodésorption (TDU) (Figure 39).

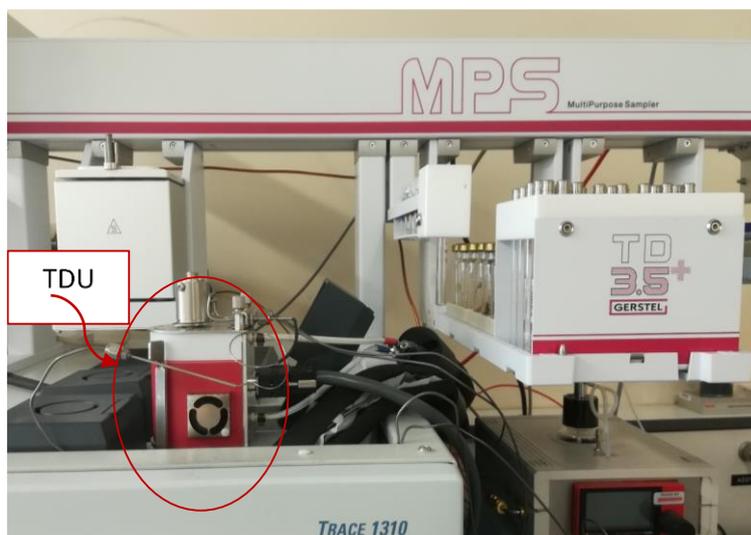


Figure 39 : Vision d'une partie de l'appareillage avec l'unité de thermodésorption (TDU) placée en amont de l'injecteur

L'analyse par thermodésorption présente l'avantage de ne pas nécessiter de préparation d'échantillon, en ce sens, elle est écologique, économique et induit un gain de temps. Les composés sont désorbés du support par la chaleur appliquée dans le dispositif d'injection.

Les Twisters sont placés dans des tubes porte-échantillons vides puis insérés sur le support. Les tubes Tenax TA et Carbo-pack B&X sont placés directement sur le support. Chaque tube est introduit dans l'injecteur à 50°C, grâce au MPS. Le Tableau 28 présente les conditions d'analyse.

Tableau 28 : Conditions d'analyse pour les échantillons d'air

Phases	Phase stationnaire 1	5% phényl méthylpolysiloxane 95% DMPS
--------	----------------------	---------------------------------------

	Phase mobile	Hélium ultra pur Alphagaz 2 (pureté < 99,999999%)		
	Colonne	ELITE-5MS 60 m x 0,25 mm x 0,25 µm		
Pression		162,9 kPa		
Débit		1,5 mL/min		
TDU	Mode	Splitless		
	Programmation de température	Rampe de température (°C/min)	Température (°C)	Maintien (min)
			50	0
120	250 (PDMS) ou 280 (Tenax) ou 300 (Carbopack)	15		
Injecteur CIS	Mode	Split (rapport de division 1/10)		
	Programmation de température	Rampe de température (°C/min)	Température (°C)	Maintien (min)
			5	1
12	280	10		
Four	Programmation de température	Rampe de température (°C/s)	Température (°C)	Maintien (min)
			40	4
		15	300	5,5
Détection	Type	Masse haute résolution		
	Mode	Full-Scan		
	Acquisition	De m/z 50 à m/z 450		
Durée de l'analyse		42 min		

Les retraitements ont été effectués à l'aide des logiciels QualBrowser, TraceFinder et Compound Discoverer. Ces deux derniers logiciels permettent de déconvoluer les chromatogrammes. Par ailleurs, pour chaque pic, les logiciels peuvent comparer les spectres obtenus et les indices de rétention avec ceux enregistrés base de données NIST (Version 2.2, 2014). Chaque analyse est accompagnée d'une analyse de blanc, c'est-à-dire un tube ou Twister conditionné durant 2h (à environ 330°C pour les Carbopack et les Twister, et 280°C pour les Tenax). Par ailleurs, le passage d'un mélange d'alcane dans les mêmes conditions permettra d'obtenir l'indice de rétention (RI) des molécules et apporter un élément supplémentaire aidant à l'identification.

Deux stratégies ont été mises en œuvre pour rechercher les molécules potentiellement liées à l'accident :

1. Recherches **ciblées** en recherchant les molécules présentes dans les stocks de Lubrizol
2. Recherches **non ciblés** en comparant les chromatogrammes entre eux et à l'aide du logiciel Compound Discoverer.

Les résultats obtenus ont été comparés avec le rapport d'AtmoNormandie numéro 2520-001, publié en mai 2021 : « Incendie Lubrizol et NL Logistique : bilan des mesures de polluants et d'odeurs dans l'air ambiant et les retombées atmosphériques »

Il est important de préciser que cette étude a pour objectif d'identifier les molécules, aucune quantification ne sera réalisée.

Par ailleurs, les noms et structures des molécules présentées dans la suite de ce rapport sont des suggestions, obtenues par recoupement entre la formule brute des fragments compatibles avec la précision de mesure de masse de l'instrument (< 3 ppm), les indices de rétention, et à la comparaison des spectres de masse avec ceux de la base de données NIST ou Orbitrap. Cependant, les bases de données n'étant pas exhaustives, il est possible que certaines structures proposées ne soient pas exactes (isomérisie) mais proches structurellement. L'injection des molécules sous forme d'étalon pourra dans l'avenir lever les ambiguïtés si nécessaire.

5.3.3 Résultats

Les résultats ont été obtenus à l'aide d'une comparaison entre les différents échantillons, les blancs et la base de données des spectres de masse NIST. L'outil QualBrowser permet d'extraire des ions et ainsi obtenir le chromatogramme lié à l'abondance de cet ion. À partir de cela, l'aire de pic chromatographique du composé peut être connue. Il a été intéressant, lorsque les résultats le permettent, de réaliser des ratios entre les aires obtenues en 2019 et celles obtenues

en 2021. Ces ratios permettront d'aider à l'évaluation de la quotation. Les résultats complets et tableaux détaillés sont disponibles sur demande dans le rapport présentant la partie analyse chimique uniquement. Dans le cas où l'ion moléculaire n'est pas détecté, trop faible ou inconnu, l'ion le plus intense sera choisi.

A l'instar des suies, et comme le montre la Figure 40, les **hydrocarbures** sont les molécules les plus abondantes dans les échantillons d'air L-ROU-AIR-X. En observant les stocks Lubrizol dont le produit majoritaire est de l'huile minérale, il semble cohérent d'affirmer le fait qu'une grande quantité d'hydrocarbures a été brûlée lors de l'incendie, et s'est trouvée en partie vaporisée dans l'air ambiant. Sont détectés les alcanes de C6 à C30 grâce à la diversité des supports d'adsorption.

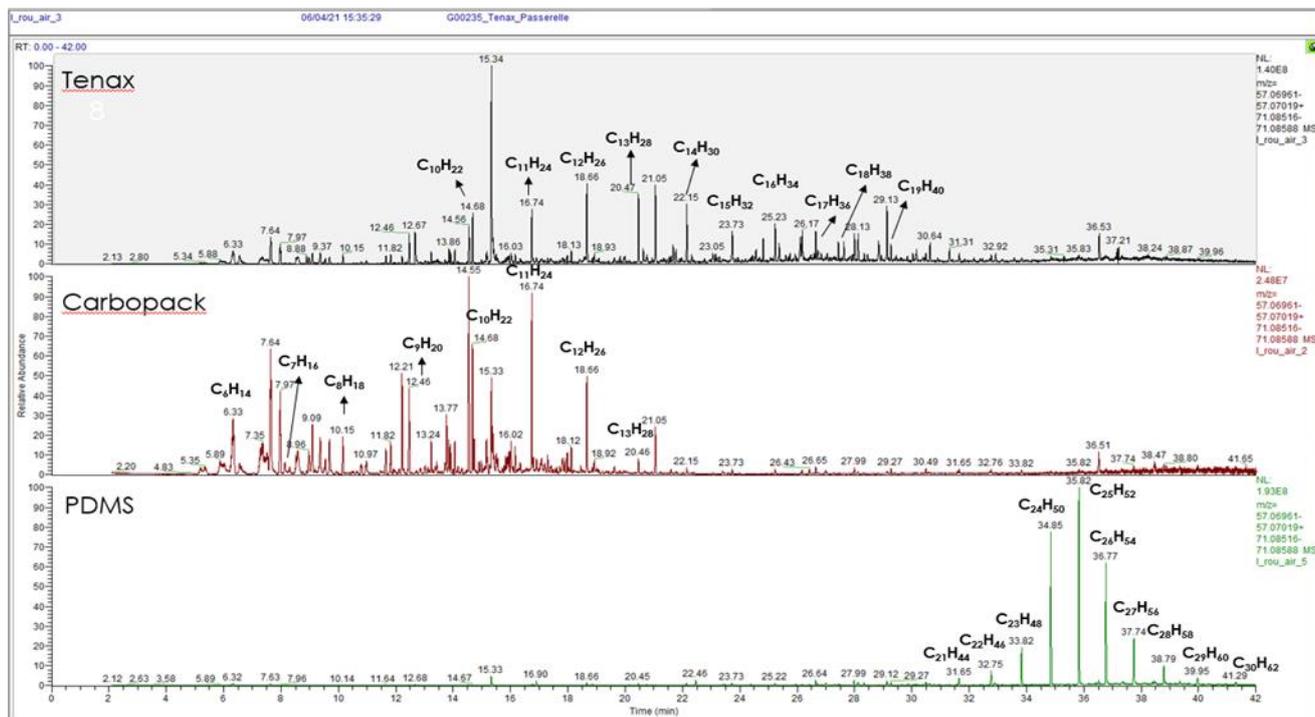


Figure 40 : Chromatogrammes obtenus lors de la recherche des ions de rapport m/z caractéristiques des alcanes : 57,0699 (C4H9+) et 71,0854 (C5H11+)

Il a été dénombré plus de **30 hydrocarbures aromatiques (HA)** monocycliques, ou alkyls benzènes, dans chaque échantillon (L-ROU-AIR-X). Ces molécules ont pour formule brute C_xH_y , possèdent une ou plusieurs ramifications et sont d'intensité plus ou moins forte. Les spectres de masse ne sont pas toujours présents dans la base de données, ainsi il n'est, pour certains, pas possible de déterminer leur formule développée, cependant nous pouvons avoir la formule brute. Des noms putatifs pour les formules brutes des alkyls benzènes (1 cycle) retrouvés ont été proposés dans les échantillons d'air. Il est très difficile de retrouver leur structure exacte car ils sont très nombreux et beaucoup possèdent des spectres très similaires.

Pour chacun des alkyls benzènes, un ratio a été réalisé entre l'aire obtenue sur les échantillons de 2019 et celle sur ceux de 2021. Chaque ratio est compris entre 1 et 4. Le taux de benzènes ramifiés a donc globalement légèrement augmenté lors de l'incendie. Par ailleurs, nous retrouvons les benzènes suivants dans les stocks Lubrizol : 1,2,4-triméthylbenzène, 1,3,5-triméthylbenzène et 1,2,3-triméthylbenzène.

Quant au benzène lui-même, sa teneur est supérieure en 2021, sa présence n'est donc pas différente du bruit de fond habituel.

Un alkylbenzène particulier à 2 cycles retrouvé dans les échantillons est le diphenylméthane ($t_R = 22,54$, $RI = 1425$, $\Delta RI = 9$), cependant il est aussi présent dans certains blancs ainsi qu'en 2021 en teneur similaire à 2019. Les ions qui le caractérisent sont les suivants **168,0932** (-0,9 ppm) **167,0854** (-0,6 ppm) **152,0620** (-0,5 ppm).

Le Tableau 29 présente quelques Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques (HAP) qui ont également été retrouvés :

Tableau 29 : HAP retrouvés dans les échantillons d'air

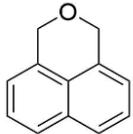
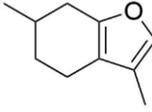
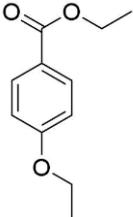
ions (ion moléculaire en gras) (m/z) (précision de	Formule brute	Nom et structure possibles	t_R (min), RI, ΔRI (si connu)	Probabilité de l'émission de la molécule proposée par l'incendie (0 : Très peu probable
--	---------------	----------------------------	---	---

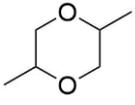
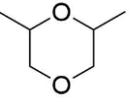
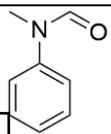
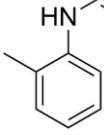
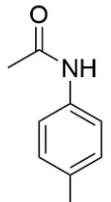
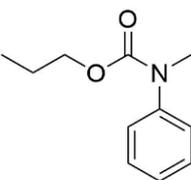
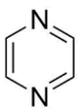
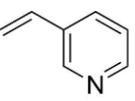
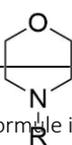
<i>masse)</i>				; 4 : Très probablement). Qualification subjective
128,0620 (-0,4 ppm) 127,0542 (-0,1 ppm)	C ₁₀ H ₈	Naphthalene	t _R = 18,80 RI = 1208 ΔRI = 28	1 : Présent dans certains blancs à intensité non négligeable et en 2021
154,0775 (-1,4 ppm) 153,0697 (-1,1 ppm)	C ₁₂ H ₁₀	Biphenyl	t _R = 22,24 RI = 1406 ΔRI = 25	
203,0854 (-0,4 ppm) 202,0775 (-0,8 ppm) 200,0618 (-1,3 ppm)	C ₁₆ H ₁₀	Fluoranthene	t _R = 31,05 RI = 2046 ΔRI = 8	

L'accident a probablement augmenté la concentration globale de ces HAP dans l'air, notamment du naphthalene qui était présent dans les stocks, cependant ces molécules sont également présentes dans les blancs et en 2021, donc dans le bruit de fond quotidien.

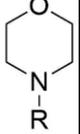
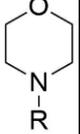
De nombreuses **molécules oxygénées et azotées** ont été détectées dans les échantillons d'air (L-ROU-AIR-X). Certaines d'entre elles se révèlent particulières et potentiellement liées à l'accident (Tableau 30).

Tableau 30 : Composés oxygénés et azotés retrouvés dans les échantillons d'air

lons (ion moléculaire en gras) (rapport m/z) (précision de masse)	Formule brute	Nom et structure possibles	t _R (min), RI, ΔRI (si connu)	Probabilité de l'émission de la molécule proposée par l'incendie (0 : Très peu probable ; 4 : Très probablement). Qualification subjective
90,0317 (quasi absent du spectre, non détectable dans les échantillons) 89,0234 (0,5 ppm) 61,0284 (0,9 ppm)	C ₃ H ₆ O ₃	Trioxane 	t _R = 7,85 RI = 682	2 : présente en quantités significatives. Les ratios montrent une présence plus intense en 2019. Sa présence dans les blancs indique qu'elle n'est pas spécifique.
170,0724 (-1,3 ppm) 141,0698 (-0,8 ppm) 115,0542 (-0,4 ppm)	C ₁₂ H ₁₀ O	1H3H-naphtho[1,8,cd]pyran 	t _R = 22,58 RI = 1428	2 : présente en quantités significatives mais ratios assez faibles
150,1038 (-0,6 ppm) 108,0569 (-0,2 ppm)	C ₁₀ H ₁₄ O	Benzofuran,4,5,6,7-tetrahydro-3,6-dimethyl 	t _R = 18,26 RI = 1180 ΔRI = 15	2 : Ratios plutôt élevés sur support Carboxpack.
194,0934 (-1,6 ppm) 166,0622 (-1,3 ppm) 149,0596 (0,4 ppm) 138,0311 (-0,3 ppm) 121,0284 (-0,1 ppm)	C ₁₁ H ₁₄ O ₃	Benzoic acid, 4 ethoxy ethyl ester 	t _R = 24,36 RI = 1541 ΔRI = 12	4 : Présente en grande quantité en 2019 sur support PDMS (Aire du pic de valeur 2.10 ⁸) et support Tenax (3.10 ⁵), absente en 2021, absente des blancs.

116,0832 (0,3 ppm) 101,0598 (0,7 ppm) 72,0570 (0,2 ppm)	C ₆ H ₁₂ O ₂	1,4 dioxane, 2,5 dimethyl 	t _R = 10,28 RI = 804	4 : Présentes en grandes quantités en 2019, ratios très élevés
			t _R = 10,33 RI = 808	
		1,4 dioxane, 2,6 dimethyl 	t _R = 10,88 RI = 832	
			t _R = 10,97 RI = 836	
lons (ion moléculaire en gras) (rapport m/z) (précision de masse)	Formule brute ²⁰	Nom et structure possibles	t _R (min), RI, ΔRI (si connu)	Probabilité de l'émission de la molécule proposée par l'incendie (0 : Très peu probable ; 4 : Très probablement). Qualification subjective
135,0677 (-0,9 ppm) 106,0651 (0,1 ppm) 94,0413(-0,1 ppm) 79,0417 (0,1 ppm)	C ₈ H ₉ ON	1/ Formamide N-methyl N-phenyl 	t _R = 20,49 RI = 1302 2/ ΔRI = 19	1 : Ratios parfois très peu élevés, présent dans les blancs (aire de valeur 10 ⁴)
		2/ Formamide N-(2methylphenyl) 		
149,0835 (-0,4 ppm) 107,0729 (-0,7 ppm) 106,0652 (0,5 ppm)	C ₉ H ₁₁ ON	Acétamide, N-(4-methylphenyl)- 	t _R = 20,83 RI = 1323	3 : Retrouvée sur PDMS seulement, ratios assez élevés, blancs exempts.
193,1095 (-1,0 ppm) 151,0627 (-0,7 ppm) 134,0964 (-0,5 ppm) 106,0652 (0,2 ppm)	C ₁₁ H ₁₅ O ₂ N	Carbonic acid, monoamide, N-methyl-N-phenyl-,propyl ester 	t _R = 23,27 RI = 1471	3 : Retrouvée sur PDMS seulement, ratios assez élevés, blancs exempts.
80,0369 (0,0 ppm) 53,0261 (1,5 ppm)	C ₄ H ₄ N ₂	Pyrazine 	t _R = 8,81 RI = 731 ΔRI = 5	1 : Il est possible que l'accident ait augmenté légèrement les teneurs en pyrazine mais sa présence est non négligeable dans les blancs. Confirmation du RI par l'achat de la molécule.
105,0573 (-0,2 ppm) 104,0495 (0,0 ppm) 78,0339 (0,4 ppm)	C ₇ H ₇ N	3-vinylpyridine 	t _R = 14,2 RI = 979 ΔRI = 3	3 : Ratios variables (de 0,6 à 80). Présente dans les suies également (Tableau 21). L'achat de cette molécule a permis de confirmer son RI.
195,1252 (-1,0 ppm) 152,0705 (-0,9 ppm)	C ₁₁ H ₁₇ NO ₂	Deux morpholines 	t _R = 21,25 RI = 1345	2 : Isomères. Présence en teneur égales en 2019 et 2021. Faible

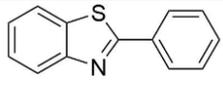
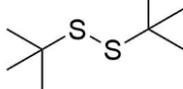
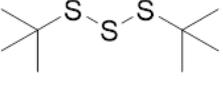
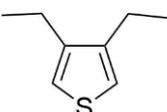
²⁰ Dans le cas où l'ion moléculaire n'est pas retrouvé explicitement, la formule indiquée correspond à l'ion m/z le plus lourd relevé

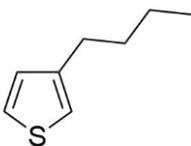
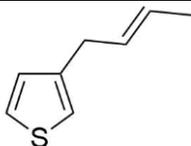
110,0600 (-0,0 ppm)		(1)			présence dans les blancs. Toutefois il peut être intéressant de les suivre par la suite. De plus, ces molécules sont également retrouvées dans les suies (Tableau 21).
195,1252 (-0,7 ppm) 152,0705 (-0,9 ppm) 110,0600 (-0,0 ppm)				t _R = 21,46 RI = 1354	
Ion moléculaire inconnu 100,0757 (0,1 ppm) 70,0651 (-0,1 ppm)	?	Une morpholine (2)		t _R = 29,26 RI = 1906	2 : Un bruit de fond intense en 2021 et ratios variables
Ion moléculaire inconnu 100,0757 (0,1 ppm) 70,0651 (-0,1 ppm)	?	Une morpholine (3)		t _R = 31,75 RI = 2109	2/3 : Difficultés pour établir des ratios, mais semble très intéressant.

AtmoNormandie a également retrouvé la pyrazine (rapport numéro 2520-001).

De nombreuses **molécules soufrées** ont été détectées dans les échantillons L-ROU-AIR-X, dont de nombreux thiophènes (Tableau 31).

Tableau 31 : Composés soufrés retrouvés dans les échantillons d'air

Ions (ion moléculaire en gras) (rapport m/z) (précision de masse)	Formule brute	Nom et structure possibles	t _R (min), RI, ΔRI (si connu)	Probabilité de l'émission de la molécule proposée par l'incendie (0 : Très peu probable ; 4 : Très probablement). Qualification subjective
211,0448 (-1,0 ppm) 108,0028 (-0,3 ppm)	C ₁₃ H ₉ NS	Benzothiazole, 2-phenyl 	t _R = 30,95 RI = 2039	3 : Aires et ratios assez élevés
178,0843 (-0,7 ppm) 122,0218 (-0,7 ppm)	C ₈ H ₁₈ S ₂	Di-tert-butyl disulphide 	t _R = 17,40 RI = 1137 ΔRI = 15	4 : Présent seulement en 2019 (aire de valeur allant de 0,5 à 3.10 ⁵) et était présent dans 29 produits différents dans les stocks Lubrizol
210,0565 (-0,8 ppm) 153,9939 (-1,3 ppm)	C ₈ H ₁₈ S ₃	Di-tert-butyl trisulphide 	t _R = 20,77 RI = 1318	4 : Présent seulement en 2019 sur support Tenax
112,0341 (0,1 ppm) 97,0106 (-0,5 ppm)	C ₆ H ₈ S	Ethylthiophènes (4 molécules distinguées : isomérie) 	t _R = 11,83 RI = 873 t _R = 12,1 RI = 885 t _R = 12,38 RI = 897 t _R = 12,75 RI = 913	2 : Ratios variables assez élevés sur support Carbo-pack mais faibles sur support Tenax.
140,0654 (-0,5 ppm) 125,0419 (-0,1 ppm)	C ₈ H ₁₂ S	Thiophène 3,4-diethyl 	t _R = 16,21 RI = 1077	4 : Forte intensité sur support Carbo-pack de 2019, ratios très élevés

140,0653 (-0,7 ppm) 97,0107 (0,3 ppm)	C ₈ H ₁₂ S	Thiophene, 2-butyl 	t _R = 16,38 RI = 1085 ΔRI = 9	4 : seuls les Carbo-pack de 2019 contiennent la molécule. L'achat de cette molécule a permis de confirmer le RI.
138,0497 (-0,4 ppm) 123,0263 (-0,2 ppm) 111,0263 (0,0 ppm)	C ₈ H ₁₀ S	Thiophene 3-(2-butenyl) 	t _R = 17,51 RI = 1142	4 : Forte intensité sur les Carbo-pack de 2019, ratios très élevés
84,0029 (0,4 ppm) 57,9872 (1,0 ppm)	C ₄ H ₄ S	Thiophène 	t _R = 7,51 min RI = 664 ΔRI = 11	0 : Ratios très faibles et présent dans les blancs
88,0342 (0,4 ppm) 60,0029 (1,1 ppm)	C ₄ H ₈ S	Tetrahydrothiophene 	t _R = 10,48 min RI = 815 ΔRI = 1	1 : Ratios très faibles

Notons que l'atome de soufre est présent dans plus de 600 produits présents dans les stocks de Lubrizol et Normandie Logistique.

La comparaison avec les résultats d'AtmoNormandie montre une certaine cohérence avec ces résultats : une expertise du Langage des Nez[®] leur a permis d'identifier des odeurs de thiophène et de benzothiazole. Par ailleurs, des analyses ciblées ont montré la présence de di-tert-butyl disulfide, di-tert-butyl trisulfide ainsi que de tetrahydrothiophene.

Deux **molécules phosphorées et une molécule fluorée** ont pu être mises en lumière les échantillons L-ROU-AIR-X (Tableau 32).

Tableau 32 : Composés phosphorés et fluorés retrouvés dans les échantillons d'air

Ions (ion moléculaire en gras) (rapport m/z) (précision de masse)	Formule brute	Structure compatible ²¹	t _R (min), RI, ΔRI (si connu)	Probabilité de l'émission de la molécule proposée par l'incendie (0 : Très peu probable ; 4 : Très probablement). Qualification subjective
98,9843 (0,8 ppm)	?	Noyau H ₄ O ₄ P ⁺	t _R = 35,63 RI = 2480	2 : Retrouvé seulement dans les PDMS. Ratios compatibles avec une liaison à l'accident.
155,0467 (-0,4 ppm) 127,0155 (0,1 ppm) 98,9842 (0,3 ppm)	?	C ₄ H ₁₂ O ₄ P ⁺ (Noyau H ₄ O ₄ P ⁺)	t _R = 17,39 RI = 1136	2 : Ratios assez faibles mais de nombreuses molécules phosphatées dans les stocks Lubrizol.
96,0370 (0,5 ppm) 70,0214 (0,9 ppm)	C ₆ H ₅ F	Fluorobenzène	t _R = 7,58 RI = 668 ΔRI = 2	2 : Ratios compatibles avec une liaison à l'accident sans être spécifique de celui-ci. Cependant pas de molécules fluorées connues dans les stocks Lubrizol.

²¹ Dans le cas où l'ion moléculaire n'est pas retrouvé explicitement, la formule indiquée correspond à l'ion m/z le plus lourd relevé

5.3.4 Conclusion sur les analyses de l'air

Pour conclure, la méthode d'analyse utilisée a permis d'identifier une large gamme de molécules volatiles et semi-volatiles. Beaucoup sont des polluants présents quotidiennement dans notre environnement. En plus d'une quantité non négligeable d'hydrocarbures linéaires et aromatiques, 29 molécules à hétéroatomes ont été mises en lumière. Ces molécules sont susceptibles d'être liées à l'accident et pourraient potentiellement, pour certaines, être des marqueurs de l'accident.

6.3 Mise en place des stations de mesure et de prélèvements

6.3.1 Stratégie

La stratégie d'échantillonnage retenues pour évaluer l'impact de l'incendie Lubrizol-Normandie Logistique se décompose en 2 objectifs. Les apports de composés chimiques ont pu être de plusieurs ordres en fonction de la proximité ou non de l'incendie.

i) Les abords immédiats du sinistre : La Darse au Bois et la darse des Dock.

Le choix de ces deux sites se justifie de la façon suivante : La Darse au Bois a été particulièrement impactée par le ruissellement de mélanges de produits chimiques présents dans l'entrepôt (+ de 400) qui ont pu réagir entre eux sous forme liquide, gazeuse, soumis à la chaleur etc. Ajouté à cela, il faut prendre en compte l'eau des pompiers contenant des retardateurs de flamme PFAS dont la toxicité a d'ores et déjà été reconnu dans d'autres sites (Garonne, Rhone, etc). Travailler sur les sédiments de la Darse au bois permettra d'identifier les polluants persistants fixés dans le sédiment. Ce site représente le point le plus proximal et touché par l'incendie donc potentiellement le meilleur endroit pour identifier les molécules qui doivent être cherchées dans l'environnement. Pour définir un niveau de contamination/pollution, il est nécessaire de savoir si la valeur que nous mesurerons a la surface du sédiment correspond au signal de l'incendie de LNL ou si ce signal ne se distingue pas du bruit de fond anthropique. Pour cela, l'étude propose d'identifier et de quantifier les contaminants dans les sédiments avant l'incendie. Il est donc indispensable de prélever des carottes sédimentaires. Malheureusement la Darse au Bois a été curée avant l'incendie, il serait délicat de se repérer dans l'âge des sédiments. Pour cette raison, le site de la Darse des docks est une excellente alternative pour remonter dans le temps. La darse de Dock a déjà montré sa capacité à remonter jusqu'aux années 70 (Thèse Vrel, 2012). Située plus en aval, les concentrations des potentiels composés issus de l'incendie devrait être sûrement plus faible que dans la Darse au bois. Néanmoins l'identification de ces composés dans les sédiments de surface du site le plus proximal pourra permettre d'aiguiller les recherches de contamination dans le site le plus distale et ainsi permettre de remonter jusqu'aux années 70 pour identifier le bruit de fond anthropique.

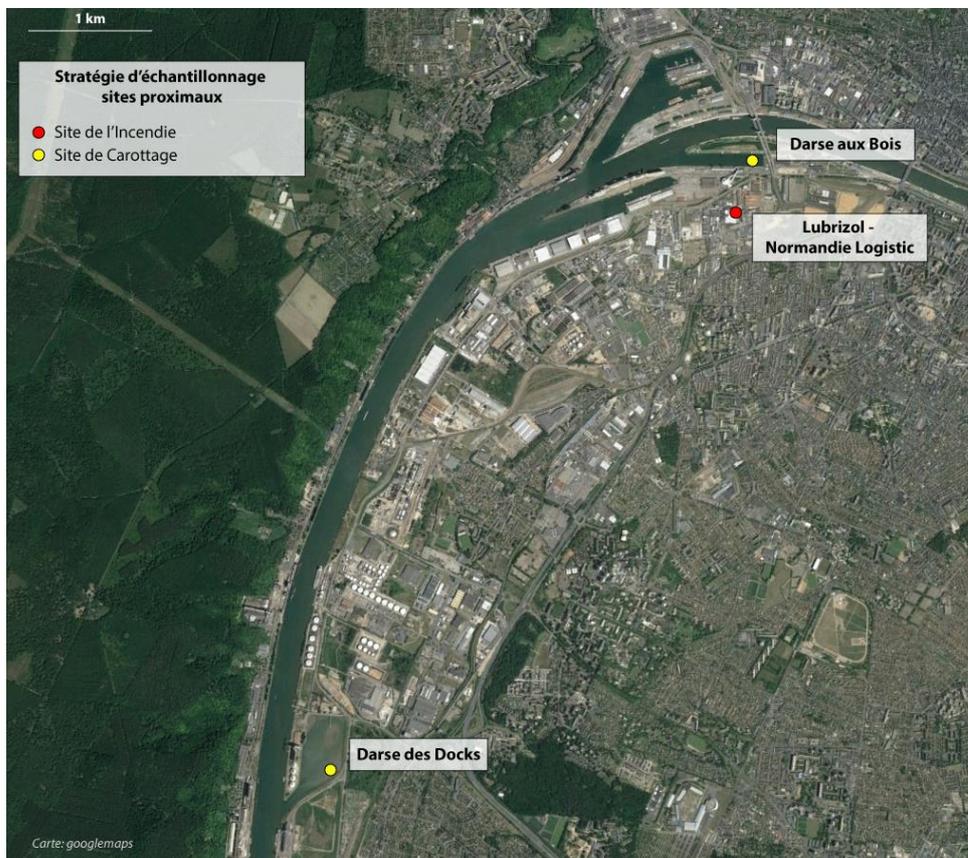


Figure 42 : Localisation des sites de carottage proximaux

ii) Le bassin versant de la Seine sous le panache.

La stratégie dans le bassin versant est différente puisqu'il est question cette fois de regarder la pollution potentielle liée au nuage composé des résidus de combustion des produits. Cette fois-ci, pas d'apports liquides liés au cocktail de produit de l'incendie mais uniquement des produits de combustion. Parmi les environnements susceptibles d'avoir accumulés ces contaminations, les archives sédimentaires des environnements aquatiques sont de bons candidats.

Trois catégories de sols ont été identifiés pour permettre des comparaisons avant-après l'incendie puis un suivi temporel de la contamination.

La stratégie d'échantillonnage doit se réfléchir à l'aune des connaissances sur les transferts particulaires et dissous au sein de l'environnement géologique de la Craie karstifiée engendrant de fortes interactions entre les eaux superficielles et souterraines. Aussi, des stations de mesures et de prélèvements des eaux et des particules ont été mises en place aux exutoires de deux sources offrant des débits parmi les plus importants de la zone impactée puis à l'aval de 3 rivières drainant le territoire sous le panache. Les prélèvements suivront 2 objectifs : le suivi du bruit de fond environnemental en condition sèche par échantillonnage bimestriel puis le suivi des flux de matière en condition humide par échantillonnage horaire lors des crues.

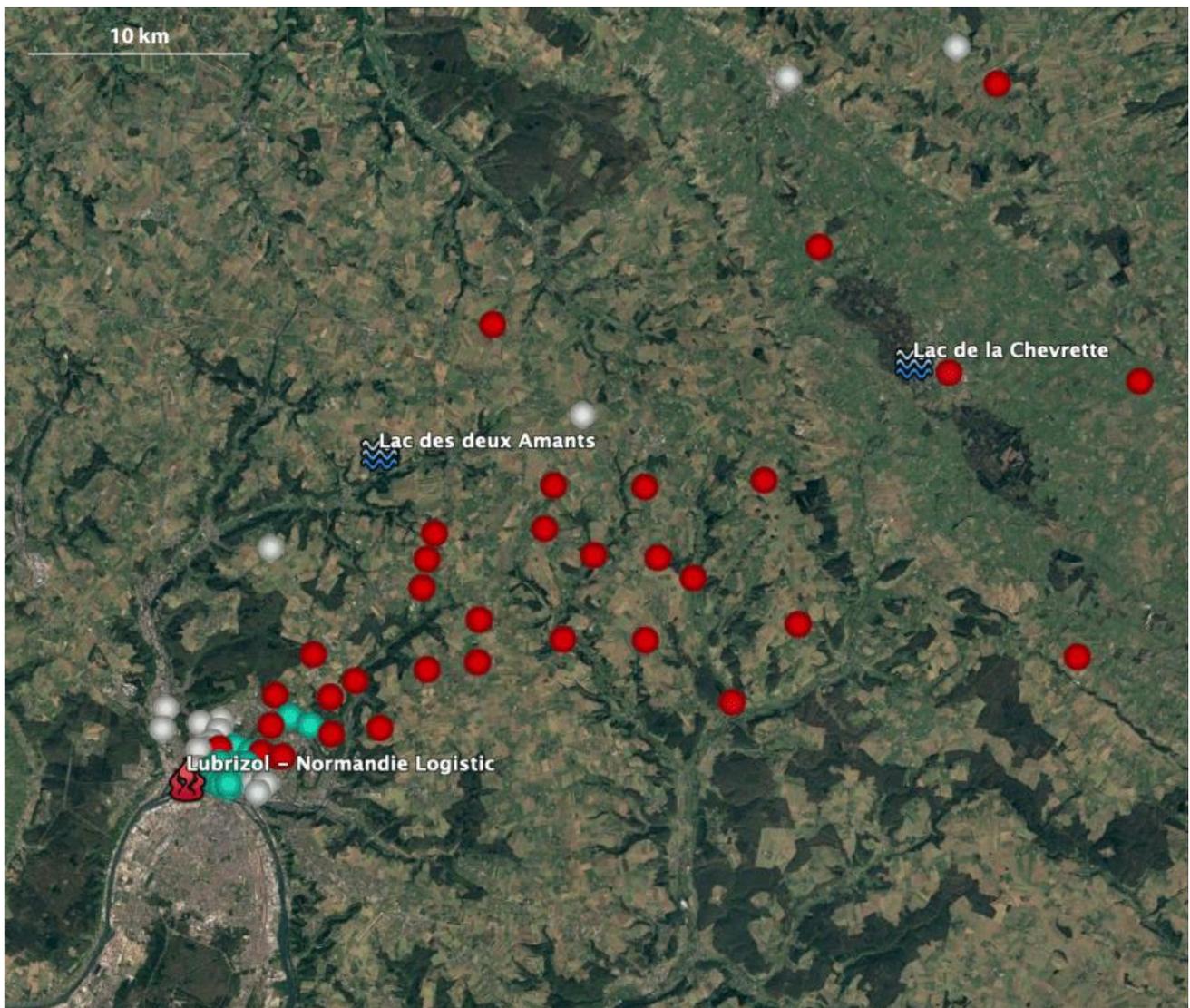


Figure 43 : Emplacements des Lac des deux Amants et Lac de la Chevrette. Les points rouges correspondent à des témoignages de dépôts de suies avérés, les points verts à des sites situés sous le nuage sans dépôts de suies et les points blancs n'ont pas reçu de suies

6.3.2 Campagne de terrain

Pour l'instant, les campagnes de terrains qui ont été menées n'ont servi qu'à vérifier la faisabilité des prélèvements et de sélectionner les meilleurs sites. Néanmoins la phase de prélèvement pour analyse en chimie interviendra plus tard dans le processus puisqu'il est d'abord nécessaire d'avoir un retour des analyses sur échantillons déjà en cours. En effet, avant de commencer les recherches de produits dans l'environnement, il faut savoir quoi chercher. Pour cela des échantillons de suies et autres résidus, collectés dans le bassin versant, sont en cours d'analyse. Les résultats permettront de cibler les analyses. La question de prélever les échantillons s'est posée, néanmoins il a été décidé de garder les échantillons sédimentaires seront bien mieux conservés dans leur environnement naturel plutôt que dans un congélateur.

Pour ce qui est des sites proximaux à l'incendie, leur faisabilité n'est pas remise en question. Les sites de carottages sont bien connus (Vrel, 2012) et leur potentiel historique avérés.

A contrario, le bassin versant n'a jamais été exploré et a demandé une grosse recherche diachronique et bibliographique pour identifier de potentiels candidats. Sur une multitude de réservoirs, retenues, étangs, etc. répertoriés, peu avaient le potentiel de retenir du sédiment. Sur plus de 50 sites, seuls 20 ont passé la première expertise basée sur les recherches diachroniques et bibliographiques. Après une visite sur site et prélèvements, il n'en reste finalement que 2 qui contiennent du sédiment bien conservé : Lac des 2 Amants à Gouville (vallée du Cailly ; 49°34'24.01"N, 1°11'2.10"E) ainsi que les lacs de Forges-les-Eaux (Vallée de L'Andelle, Lac de la Chevrette 49°36'34.94"N, 1°31'23.49"E)). Ces deux lacs pourront donc permettre d'analyser les sédiments, archives du bassin versant et ainsi révéler la présence ou non de résidus de combustion issus de l'incendie Lubrizol-Normandie Logistique.

7 Résultats du WP3 : santé et toxicité des produits de l'incendie, analyse des HAP et métaux dans les cheveux

7.1 Contexte

Un incendie de grande ampleur s'est déclenché sur un site industriel classé « Seveso haut risque » en tant qu'installation classée pour la protection de l'environnement durant la nuit du 25 au 26 septembre (à 2h40). Ce site basé à Rouen (Seine-Maritime) en zone périurbaine produit des substances chimiques industrielles pour adjonction dans des huiles diverses. L'incendie est éteint depuis le 28 septembre 2019. Par ailleurs, le site voisin de Lubrizol, Normandie Logistique, a également été impliqué dans l'incendie.

Le panache de fumée s'est élevé à forte hauteur au droit du site et a ensuite poursuivi une trajectoire Nord-Est. Ce passage du panache s'est manifesté par des retombées macroscopiques visibles de type suies ou hydrocarbures, jusqu'à près de 100 km, mais plus fortement concentré sur les communes au nord de Rouen.

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, pourtant émis lors de l'incendie.²²

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.

7.2 Hydrocarbures aromatiques polycycliques et métaux

Les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) sont issus entre autres de la combustion incomplète de matières organiques diverses telles que les carburants, le bois, le tabac... On les trouve généralement liés aux particules issues de la combustion et sous forme gazeuse dans l'air, pour les plus légers d'entre eux. Les HAP se présentent sous la forme de divers mélanges de plus d'une centaine de composés différents qui varient selon la source d'émission. La grande diversité des HAP et le coût des dosages limitent les analyses qui permettraient leur identification courante dans l'environnement. On procède généralement à l'analyse de 16 HAP que l'Agence de protection de l'environnement américaine a classés dans sa liste des polluants prioritaires dans les années 80. On considère que ceux-ci sont représentatifs de l'ensemble des HAP.

Le CIRC a évalué les effets cancérigènes des HAP, et en a classé 15 parmi les substances cancérigènes avérés, probables ou peut-être cancérigènes. Le benzo[a]pyrène est classé cancérigène avéré (groupe 1). Trois HAP sont classés cancérigènes probables (groupe 2A) : le cyclopenta[c,d]pyrène, le dibenzo[a,h]anthracène et le dibenzo[a,l]pyrène. Onze autres composés sont classés par le CIRC cancérigènes possibles (groupe 2B). D'autres composés évalués ont été considérés comme inclassables (groupe 3).

L'exposition aux HAP est classée cancérigène avéré pour le cancer du poumon et le cancer de la peau (groupe 1). Certains procédés industriels sont également classés dans le groupe 1 en raison des niveaux d'exposition aux HAP dans ces industries (cokeries, production d'aluminium, production et utilisation du goudron de houille...). Riches en HAP, les gaz et fumées d'échappement des moteurs diesel sont classés cancérigènes certains (groupe 1) par le CIRC, le poumon et la vessie étant les organes cibles identifiés.

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

²² Rapport bureau Veritas D-031019-10365 du 3 octobre 2019.

cheveux d'enfants vivant à Paris ou sur l'île d'Yeu (Palazzi, 2019²³) ou dans les cheveux de femmes chinoises (Palazzi, 2018²⁴), ainsi que l'identification de polluants organiques persistants dans cette matrice (Iglesias-González, 2020²⁵).

La présence de métaux dans les cheveux est un bon marqueur de l'exposition, et des différences sont retrouvées en fonction du niveau de pollution du lieu de résidence (Li, 2019²⁶) et du niveau de pollution des sols (Tokumar, 2017²⁷). Nous disposons de données de référence chez des volontaires sains, et une expertise régionale sur le sujet (Goullé, 2005²⁸).

Cette matrice permet également de dater la contamination, en fonction de la distance par rapport à la racine, mais la contribution de la contamination externe à la dose totale retrouvée dans les cheveux augmente avec cette distance. Un délai trop important entre l'exposition et le prélèvement doit donc être évité, même pour des cheveux longs.

7.3 Objectifs

Analyse des métaux et hydrocarbures aromatiques polycycliques dans les cheveux de 50 personnes exposées aux diverses substances émises lors de l'incendie et des suites de celui-ci. Ces personnes seront recrutées dans la région rouennaise, dans une zone d'habitation et/ou de travail située dans le panache des fumées.

7.4 Méthodes

7.4.1 Population ciblée

Personnes exposées aux diverses substances émises lors de l'incendie et des suites de celui-ci. Ces personnes ont été recrutées dans la région rouennaise, dans une zone d'habitation et/ou de travail habituel situé 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.

7.4.2 Prélèvement de cheveux

Après consentement de la personne, deux mèches de cheveux du diamètre d'un crayon à papier ont été prélevées au niveau du vertex postérieur (zone où la pousse est la plus régulière et qui évite une marque disgracieuse). La mèche de cheveux a été nouée le plus près possible du crâne avec une cordelette, puis sectionnée à l'aide de ciseaux au ras du cuir chevelu. La mèche a été stockée à température ambiante dans une enveloppe en papier portant l'identité de la personne et le jour du prélèvement.

7.4.2.1 Critères d'inclusion

Les volontaires ont été recherchés parmi les personnes ayant été exposées au panache, en sélectionnant les sujets vivants dans les communes exposées et/ou travaillant dans un lieu de travail sous le panache.

²³ 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.

²⁴ 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.

²⁵ 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.

²⁶ Li Y, Yu Y, Zheng N, Hou S, Song X, Dong W. Metallic elements in human hair from residents in smelting districts in northeast China: Environmental factors and differences in ingestion media. *Environ Res*. 2019 Dec 2;182:108914

²⁷ Tokumar T, Ozaki H, Onwona-Agyeman S, Ofosu-Anim J, Watanabe I. Determination of the Extent of Trace Metals Pollution in Soils, Sediments and Human Hair at e-Waste Recycling Site in Ghana. *Arch Environ Contam Toxicol*. 2017 Oct;73(3):377-390

²⁸ Goullé JP, Mahieu L, Bonneau L, Laine G, Bouige D, Lacroix C. Validation d'une technique de dosage multiélémentaire des métaux et métalloïdes dans les cheveux par ICP-MS. Valeurs de référence chez 45 témoins. *Ann Toxicol Anal*. 2005; 17(2): 97-102

L'incendie ayant eu lieu le 26 septembre, à la date du 26 février 2020, les cheveux auront poussé en moyenne de 5 cm. Seuls des volontaires ayant une longueur de cheveux d'au moins 7 cm ont été inclus, ce qui permet de réaliser des analyses sur des zones de cheveux correspondant respectivement à la période d'exposition et à la période précédant l'exposition chez les mêmes sujets, évitant ainsi le prélèvement d'une cohorte témoin correspondant.

7.4.2.2 Critères d'exclusion

Taille des cheveux inférieure à 7 cm.

Refus de participation.

Les traitements capillaires, en particulier les colorations de cheveux ou les permanentes, sont évitées dans la mesure du possible mais ne constituent pas un critère d'exclusion formel.

7.4.2.3 Paramètres mesurés

Les paramètres analysés sont les Hydrocarbures aromatiques polycycliques :

- acénaphthylène, acénaphthène, fluorène, phénanthrène, anthracène, fluoranthène, pyrène, benz[a]anthracène, chrysène, benzo[b]fluoranthène, benzo[k]fluoranthène, benzo[a]pyrène, indeno[1,2,3-c,d]pyrène, dibenz[a,h]anthracène, benzo[g,h,i]perylène

et leurs métabolites correspondants :

- 1-OH-Naphthalene, 2-OH-Naphthalene, 9-OH-Fluorene, 3-OH-Fluorene, 2-OH-Fluorene, 4-OH-Phenanthrene, 9-OH-Phenanthrene, 1-OH-Anthracene, 3-OH-Phenanthrene, 1-OH-Phenanthrene, 2-OH-Phenanthrene, 3-OH-Fluoranthene, 1-OH-Pyrene, 2-OH-BcPhe, 1-OH-BaA, 4-OH-Chrysene ;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 ;2-OH-Chrysene ;8-OH-BbF ;11-OH-BaP ;2-OH-BbF ;1+7-OH-BbF ;12-OH-BbF+8-OH-BkF ;10-OH-BaP ;12+6-OH-BaP ;5-OH-BaP ;11-OH-BbF ;10-OH-BbF ;4-OH-BaP+3-OH-BkF ;9-OH-BkF+7-OH-BaP ;9-OH-BaP ;2-OH-BaP+1-OH-BaP ;3-OH-BaP ;8-OH-BaP ;6-OH-Ind123cdP ;1-OH-Ind123cdP ;2-OH-Ind123cdP ;8-OH-Ind123cdP ;3-OH-DiBahA

puis les métaux :

- cadmium, chrome, mercure, plomb, vanadium, zinc.

7.4.3 Analyse des cheveux

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. Le coût d'une analyse (2 segments) est de 360 Euros TTC.

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). Le coût d'une analyse (2 segments) est de 1000 Euros TTC.

7.5 Résultats

Au total, 13 personnes ont été incluses, la survenue de la pandémie 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 33 et les résultats des analyses dans le Tableau 34 et le Tableau 35.

Tableau 33 : 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

7.5.1 Résultats des dosages des HAP

Tableau 34 : Dosage des HAP et des métabolites (pg/mg)

Sample ID	Acenaphthylene	Acenaphthene	Fluorene	Phenanthrene	Anthracene	Fluoranthene	Pyrene	Benz a anthracene
1_A	0.75 (<LOQ)	nd	3.18 (<LOQ)	34.24 (<LOQ)	2.46 (<LOQ)	29.21	11.48	0.61 (<LOQ)
1_B	1.06 (<LOQ)	nd	nd	38.74 (<LOQ)	7.10	56.72	7.21 (<LOQ)	0.11 (<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)
2_B	0.48 (<LOQ)	nd	nd	7.06 (<LOQ)	0.76 (<LOQ)	24.68	4.91 (<LOQ)	0.32 (<LOQ)
3_A	nd	nd	nd	nd	2.74 (<LOQ)	9.86 (<LOQ)	nd	0.43 (<LOQ)
3_B	1.90 (<LOQ)	nd	nd	nd	6.69	20.23	nd	1.38
4_A	1.17 (<LOQ)	nd	nd	nd	0.87 (<LOQ)	14.47	2.75 (<LOQ)	0.15 (<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)
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)
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)
6_A	1.39 (<LOQ)	5.80 (<LOQ)	8.44 (<LOQ)	56.09 (<LOQ)	2.31 (<LOQ)	20.30	20.08	1.08
6_B	1.26 (<LOQ)	8.76 (<LOQ)	5.52 (<LOQ)	31.12 (<LOQ)	2.81 (<LOQ)	14.52	14.59	0.78 (<LOQ)
7_A	1.68 (<LOQ)	10.38 (<LOQ)	26.17 (<LOQ)	59.46 (<LOQ)	2.91 (<LOQ)	18.05	16.38	0.45 (<LOQ)
7_B	0.78 (<LOQ)	7.32 (<LOQ)	4.74 (<LOQ)	41.30 (<LOQ)	1.99 (<LOQ)	17.45	14.69	0.80 (<LOQ)
8_A	0.74 (<LOQ)	nd	nd	nd	0.86 (<LOQ)	0.23 (<LOQ)	0.88 (<LOQ)	0.58 (<LOQ)
8_B	1.73 (<LOQ)	10.02 (<LOQ)	32.07 (<LOQ)	83.15 (<LOQ)	6.18	14.48	18.00	0.71 (<LOQ)
9_A	0.84 (<LOQ)	nd	nd	12.70 (<LOQ)	3.64 (<LOQ)	8.66 (<LOQ)	4.90 (<LOQ)	0.37 (<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)
10_A	1.94 (<LOQ)	20.83 (<LOQ)	7.99 (<LOQ)	nd	5.79	0.26 (<LOQ)	nd	nd
10_B	0.47 (<LOQ)	0.58 (<LOQ)	nd	nd	1.55 (<LOQ)	6.89 (<LOQ)	8.49 (<LOQ)	0.29 (<LOQ)
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)
11_B	1.12 (<LOQ)	11.55 (<LOQ)	nd	nd	0.88 (<LOQ)	24.49	nd	0.25 (<LOQ)
12_A	1.30 (<LOQ)	nd	nd	nd	0.74 (<LOQ)	1.89 (<LOQ)	1.46 (<LOQ)	0.31 (<LOQ)
12_B	2.34 (<LOQ)	13.30 (<LOQ)	30.15 (<LOQ)	56.96 (<LOQ)	2.67 (<LOQ)	11.30	16.13	0.76 (<LOQ)
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)
13_B	0.97 (<LOQ)	4.68 (<LOQ)	12.58 (<LOQ)	87.38 (<LOQ)	2.10 (<LOQ)	15.50	10.16	0.36 (<LOQ)
LOQ (pg/mg)	20	100	100	100	5	10	10	1

- PROJET COP HERL PHASE 1 - Résultats du WP3 : santé et toxicité des produits de l'incendie, analyse des HAP et métaux dans les cheveux

Sample ID	Chrysene	B b fluoranthene	B k fluoranthene	B a P	l 1,2,3-cd pyrene	Dibenz a,h anthracene	Benzo g,h,i perylene
1_A	1.29	1.61	1.18	1.08	3.71	nd	4.19
1_B	0.35 (<LOQ)	nd	0.12 (<LOQ)	0.08 (<LOQ)	0.75 (<LOQ)	nd	0.13 (<LOQ)
2_A	0.88 (<LOQ)	0.32 (<LOQ)	0.26 (<LOQ)	0.21 (<LOQ)	0.68 (<LOQ)	nd	1.31
2_B	0.92 (<LOQ)	0.35 (<LOQ)	0.52 (<LOQ)	0.47 (<LOQ)	0.85 (<LOQ)	nd	nd
3_A	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd
3_B	1.06	0.65 (<LOQ)	0.21 (<LOQ)	0.56 (<LOQ)	1.37	nd	nd
4_A	1.92	0.26 (<LOQ)	0.15 (<LOQ)	0.08 (<LOQ)	0.09 (<LOQ)	nd	0.37 (<LOQ)
4_B	2.53	0.42 (<LOQ)	0.17 (<LOQ)	0.20 (<LOQ)	0.19 (<LOQ)	0.30 (<LOQ)	0.06 (<LOQ)
5_A	0.78 (<LOQ)	0.18 (<LOQ)	0.08 (<LOQ)	0.25 (<LOQ)	0.26 (<LOQ)	0.32 (<LOQ)	1.38
5_B	1.22	0.32 (<LOQ)	0.20 (<LOQ)	0.27 (<LOQ)	0.24 (<LOQ)	0.28 (<LOQ)	2.30
6_A	5.54	1.30	0.85 (<LOQ)	0.68 (<LOQ)	0.56 (<LOQ)	0.33 (<LOQ)	2.57
6_B	3.96	1.07	0.78 (<LOQ)	0.43 (<LOQ)	0.86 (<LOQ)	0.60 (<LOQ)	1.74
7_A	4.19	0.87 (<LOQ)	0.36 (<LOQ)	0.38 (<LOQ)	0.36 (<LOQ)	nd	1.32
7_B	4.59	1.00 (<LOQ)	0.57 (<LOQ)	0.30 (<LOQ)	0.57 (<LOQ)	nd	2.57
8_A	1.39	0.15 (<LOQ)	nd	0.06 (<LOQ)	0.06 (<LOQ)	0.59 (<LOQ)	1.03
8_B	4.26	0.46 (<LOQ)	0.14 (<LOQ)	0.48 (<LOQ)	0.34 (<LOQ)	0.72 (<LOQ)	2.42
9_A	0.66 (<LOQ)	0.26 (<LOQ)	0.21 (<LOQ)	0.15 (<LOQ)	0.09 (<LOQ)	nd	0.89 (<LOQ)
9_B	4.07	1.19	0.70 (<LOQ)	0.63 (<LOQ)	0.60 (<LOQ)	nd	3.35
10_A	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd
10_B	2.32	0.48 (<LOQ)	0.30 (<LOQ)	0.24 (<LOQ)	nd	nd	nd
11_A	1.48	0.48 (<LOQ)	0.04 (<LOQ)	0.15 (<LOQ)	0.15 (<LOQ)	nd	1.52
11_B	0.44 (<LOQ)	nd	0.30 (<LOQ)	nd	nd	nd	nd
12_A	0.17 (<LOQ)	nd	0.03 (<LOQ)	0.00 (<LOQ)	0.23 (<LOQ)	nd	1.08
12_B	2.26	0.44 (<LOQ)	0.35 (<LOQ)	0.34 (<LOQ)	nd	0.55 (<LOQ)	2.63
13_A	1.75	0.69 (<LOQ)	0.39 (<LOQ)	0.26 (<LOQ)	0.40 (<LOQ)	0.24 (<LOQ)	0.90 (<LOQ)
13_B	2.21	0.69 (<LOQ)	0.25 (<LOQ)	0.09 (<LOQ)	0.31 (<LOQ)	nd	0.98 (<LOQ)
LOQ (pg/mg)	1	1	1	1	1	1	1

- PROJET COP HERL PHASE 1 - Résultats du WP3 : santé et toxicité des produits de l'incendie, analyse des HAP et métaux dans les cheveux

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

- PROJET COP HERL PHASE 1 - Résultats du WP3 : santé et toxicité des produits de l'incendie, analyse des HAP et métaux dans les cheveux

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
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	

- PROJET COP HERL PHASE 1 - Résultats du WP3 : santé et toxicité des produits de l'incendie, analyse des HAP et métaux dans les cheveux

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.

7.5.2 Résultats des 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 35 : 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

7.6 Discussion

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 fin 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 2018²⁹ ; Palazzi 2019³⁰). 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.

²⁹ 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.

³⁰ 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

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 95eme 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.

7.7 Conclusion

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 Résultats WP4 : Perceptions sociales de l'incendie

Ce WP4 a pour objectif l'étude des impacts de l'incendie du 26 septembre 2019 sur le système social de la métropole de Rouen et de sa région. Il porte sur l'analyse des réactions, des comportements, des perceptions des individus et sur les transformations sociales, économiques et politiques de l'agglomération rouennaise qui en découlent.

Dans cette première phase de la recherche COP HERL, trois équipes se sont mobilisées, réunies au sein de l'IRIHS (Institut de Recherches Interdisciplinaires Homme et Société), structure Fédérative de Recherche de Sciences Humaines et Sociales (SHS) qui a pour mission de promouvoir et de développer des activités scientifiques interdisciplinaires en sciences humaines et sociales et de structurer le domaine des SHS de l'Université de Rouen Normandie autour d'une culture commune d'interdisciplinarité et d'un projet scientifique partagé.

Les trois études qui ont été menées portent sur les perceptions, les représentations, l'information, la communication, les réactions et émotions des populations, adultes, adolescents (collégiens et lycéens) jeunes adultes (étudiants) de celle des médecins généralistes, qu'elles aient été directement ou indirectement touchées par l'incendie et par ses conséquences. Pour conduire ces trois recherches, une série d'enquêtes a été mise en place, mobilisant plusieurs méthodes complémentaires : des questionnaires en ligne, des entretiens individuels et collectifs.

La survenue de la crise sanitaire du Covid-19, cinq mois après l'incendie des sites Lubrizol et Normandie Logistique, a eu une incidence non négligeable sur les recherches engagées, non seulement dans la mise en place des enquêtes, mais aussi comme une autre crise, venant se superposer à celle de l'incendie.

8.1 Comportements des populations lors de l'incendie du 26 septembre 2019

8.1.1 Introduction

L'alerte est en général appréhendée dans les plans de gestion de crise comme un système à quatre étapes qui s'inscrit dans une logique d'ordre et de récursivité : (i) l'évaluation du danger, (ii) la décision de l'alerte, (iii) sa diffusion et (iv) les réactions des populations, des acteurs et des services de gestion de crise. Outre la brièveté possible entre ces différentes phases pour le risque industriel, des événements peuvent venir court-circuiter l'une ou l'autre de ces étapes en cas d'accident soudain. C'est notamment le cas lors de la survenue de dangers perceptibles, communiqués ou non aux populations, qui réagissent alors selon leurs propres interprétations de ces signaux qui construisent leurs propres représentations de la situation. Ce peut être également le cas avec la diffusion de messages successifs de sources différentes et invitant à suivre des consignes contradictoires de sécurité aux populations. Ce qui faisait système dans le plan de prévention se disloque lorsque survient l'accident, conduisant à une autonomisation plus ou moins forte et durable des acteurs de la crise.

L'incendie de l'usine Lubrizol illustre bien cette série de court-circuitages : des signaux de dangers (fumée, explosion) interprétés par les populations avant la diffusion de messages d'alerte et de consignes officielles ; des alertes (sirènes, radio, SMS, réseaux sociaux etc.) différemment reçues par les populations et les acteurs de la gestion de crise recommandant des réactions variées et contradictoires (aller au travail, fermer les écoles) ; des réactions des populations différentes selon l'appropriation des consignes et la compréhension de l'événement (fuite dès le matin, mise à l'abri tardive, etc.).

La proposition au cours de cette première phase du projet était de se concentrer sur les phases 3 et 4 de l'alerte, c'est-à-dire les temps et les processus de diffusion de l'alerte (sirène, messages radio, réseaux sociaux, etc.) et le temps des comportements des publics (connaissance des consignes, perception du risque industriel avant/après la crise, etc.). L'objectif était de réaliser un diagnostic précis des processus sociaux qui se sont joués au moment de la crise. Les données ont été obtenues grâce à la passation d'un questionnaire.

8.1.2 Questionnaire : description

L'enquête diffusée porte sur la chronologie de la crise vécue par la population en insistant sur différents items : connaissance initiale des risques, réception de l'alerte, pratiques de recherche d'information durant la crise, prise(s) de décision et évolution au cours de l'alerte, état émotionnel au cours de la journée, interactions sociales, moyens de communication employés etc.

Si dans l'enquête la localisation des répondants et la temporalité des comportements sont des entrées importantes, les indicateurs socio-économiques classiques le sont tout autant afin de construire une typologie de ces comportements

couplés à la dimension spatio-temporelle (Tableau 36). Ainsi la composition du ménage, le profil socio-économiques, la localisation du domicile et du lieu où la personne était lorsqu'elle a pris connaissance de l'incendie, sont demandés dans un premier temps. La deuxième section interroge sur l'heure et la façon dont les enquêtés ont su qu'un incendie était en cours ainsi que sur les modalités de recherche d'information. Cette section porte également sur les comportements suivis au cours des heures de la journée. Dans un troisième temps l'objectif est de qualifier ce qui avait été prévu lors de cette journée en condition ordinaire afin d'évaluer les changements de programme d'activités que l'accident a induit. Enfin la dernière section a pour objectif d'évaluer le niveau de culture du risque de la population et les effets de l'incendie sur celle-ci.

Tableau 36 : Grandes parties et thématiques des questions de l'enquête comportements

parties	thématiques	questions	cartes	nombre questions
0	RGPD	1		1
0	Questions barrières	2, 26		2
1	Profil du ménage	[3;11] [23;25]	[12;22]	45
1	Localisation quand appris incendie	[27;30]	[31;41]	15
2	Profil du travail	[42;83]		42
2	Incendie appris en déplacement	[84;90]		7
2	Visibilité des marques de l'incendie	[91;93]		3
2	Comment on apprend incendie	[94;103]		10
2	Recherches d'informations et premières décisions	[104;113] [127;132]		16
2	Diffusion d'informations autour de soi	[114;126]		13
2	Applications des consignes	[139;149]		11
2	Sirène	[133;138]		6
3	Programme du 26 septembre 2019	[150;182]		33
3	Programme s'il n'y avait pas eu l'incendie	[183;216]		34
3	Partir vivre temporairement ailleurs	[217;236]		20
4	Perception de la gestion de crise	[237;247]		11
4	Estimation du risque industriel de la métropole	[248;266]		19
3	Programme des enfants	[267;300]		34
3	Scénario d'un incendie à 10h30	301		1
3	Perception sensorielle de l'incendie	Fumée [302;305]		4
3		Dépôts [306;311]		6
3		Odeurs [312;317]		6
4	préoccupations citoyennes	[318;334]		17
1	Profil du répondant	[335;340]		6
0	Fin de l'enquête	[341;344]		4

8.1.3 Diffusion et passation du questionnaire

Impactée par la situation sanitaire et le confinement, l'enquête comportement a principalement été diffusée sur internet. L'enquête a été principalement diffusée entre mars et mai 2020. Ceci a rendu éphémère la présence de l'enquête dans le paysage numérique (souvent limitée à quelques jours après une intervention médiatique) et nous a obligés à une présence régulière dans les médias. L'enquête a ainsi été relayée dans les réseaux sociaux, les médias régionaux, nationaux, et la presse locale. Les réseaux sociaux ont été le principal vecteur de diffusion de l'enquête (27% des répondants), suivi de près par la presse (23%), le réseau familial (22%) et le canal professionnel (19%). Si on observe des pics de réponses sur un ou deux jours après chaque intervention dans les médias, on observe également une baisse régulière du nombre de répondants sur la période de collecte des données (Figure 44).

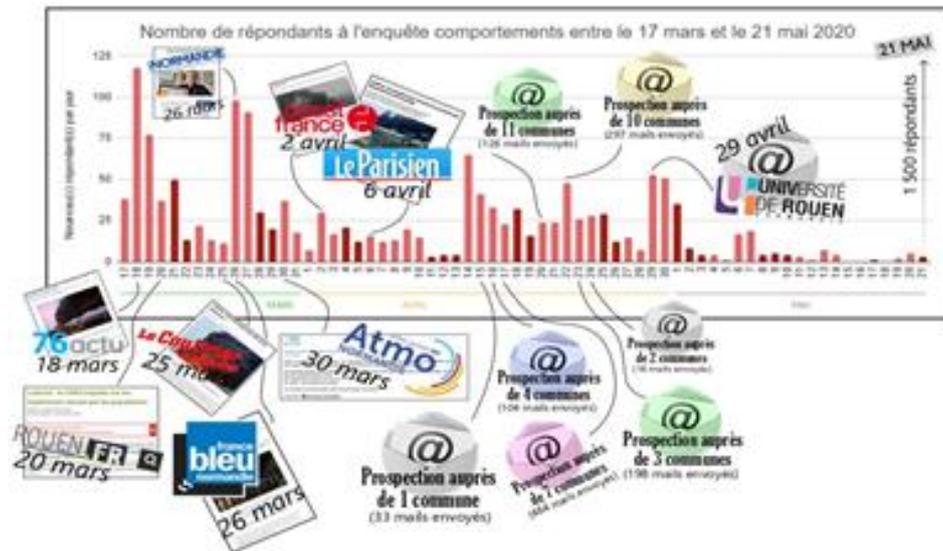


Figure 44 : Poids des interventions médiatiques dans la diffusion de l'enquête

Ce sont malgré tout plus de 1870 personnes qui ont répondu à cette enquête, dont 1639 résidant dans la Métropole Rouen Normandie. Lorsque le contexte sanitaire s'est amélioré, des enquêteurs sont allés sur le terrain afin de corriger les biais de sélection de l'enquête en ligne, mais cette méthode nous a permis de ne collecter qu'une quarantaine de réponses, nombre très nettement insuffisant pour corriger la sous-représentation de certaines catégories de personnes. La distribution spatiale des répondants met en évidence une opposition géographique nette entre la rive droite qui recueille beaucoup de réponses et la rive gauche d'une part, et un gradient centre-périphérie centré sur Rouen d'autre part. L'exposition des populations au panache de fumée semble avoir influencé positivement le taux de réponse à l'enquête (Figure 45).

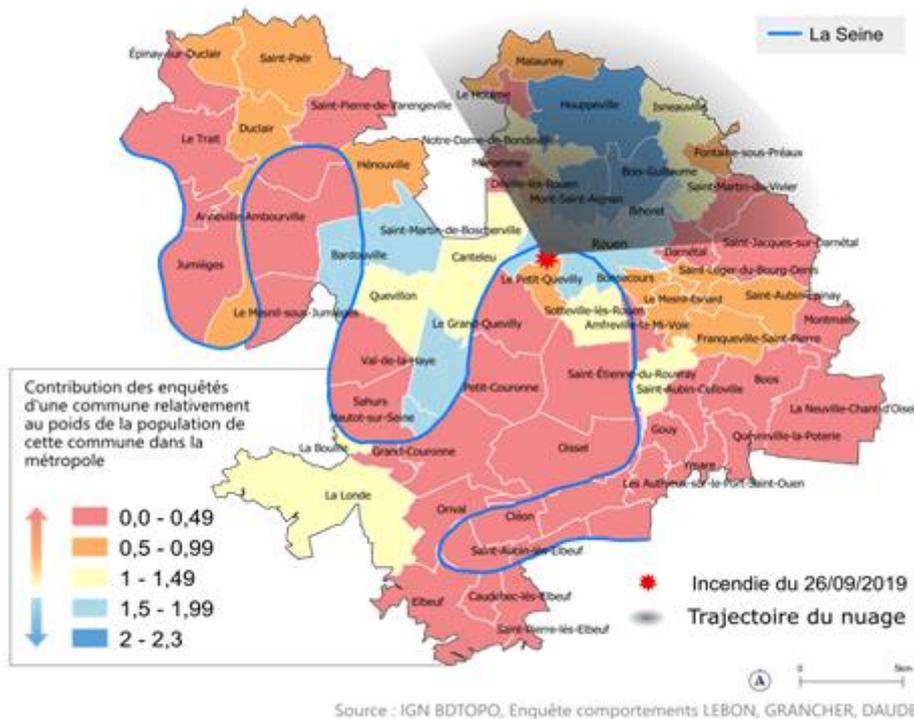


Figure 45 : Contribution des répondants à l'enquête

En jaune, un taux de réponse en adéquation avec la part de la population communale dans la métropole, en bleu une sur-représentation des répondants relativement au poids de la population de ces communes dans le total de la métropole, en rouge une sous-représentation des répondants relativement à ce poids.

Ainsi les communes directement à proximité du site de l'incendie, telles que Rouen, Canteleu et Sotteville-lès-Rouen et, en s'éloignant progressivement du site, telles que Mont-Saint-Aignan, Bois-Guillaume, Bihorel et Houpeville ont relativement plus répondu que ne laissait supposer le poids de leur population dans le total de la métropole. Au contraire, les communes qui n'ont pas été survolées par le panache ont pour l'essentiel moins répondu au questionnaire qu'attendu relativement au poids de leurs populations.

8.1.4 Premiers résultats

L'incendie a débuté à 2h40, les premières informations de la Préfecture arrivent à 4h50 avec un premier tweet, puis à 6h25 le préfet intervient lors de conférences de presse. Les sirènes sont finalement déclenchées à 07h50, pour indiquer aux populations de s'informer via la radio. Le choix de ce déclenchement tardif a été fait pour éviter tout mouvement de panique et ainsi gêner les secours dans leur travail. Jugée éparse et insuffisante, la communication officielle sur l'accident ne regroupe que 11 tweets sur la journée du 26 septembre, comprenant une interruption de diffusion entre 9 h 19 et 16 h 25.

Pourtant, à 7h, 57% des personnes enquêtées déclarent être déjà informées qu'un incendie est en cours dans l'usine Lubrizol, bien que les sirènes n'aient pas encore sonné. Pour pallier le manque d'information, les populations s'organisent entre elles : 41% sont avertis par leur réseau privé. Les autres, 29%, prennent connaissance de l'incendie directement par ses conséquences sensorielles : les flammes, le panache de fumée, les explosions. Enfin près de 20% d'entre eux apprennent la nouvelle par les médias, que ce soit la radio ou la télévision. In fine, à 7:50, la sirène n'aura informé qu'un peu plus de 1% des personnes enquêtées.

Concernant les personnes qui ont été prévenues par un tiers, 73% le sont par un proche et 18% par l'employeur. Un véritable réseau privé de circulation de l'information s'est mis en place, chaque personne recevant une information jouant le rôle de relais pour une ou plusieurs autres personnes. On distingue deux profils de réseau privé, le réseau des proches et celui du travail. Ainsi si près de 100% des personnes informées ont prévenu un ou plusieurs proches, elles sont moins de 80% à avoir informé un collègue. Au sein du réseau privé, les populations ont en majorité prévenu entre 1 et 5 collègues ou proches (Figure 46).

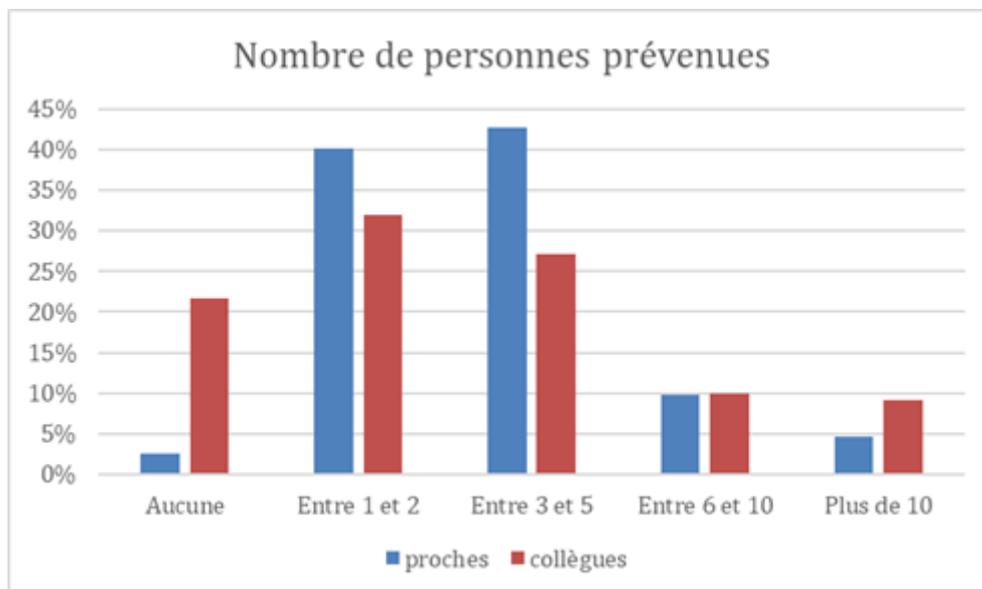


Figure 46 : Le rôle des réseaux d'acointance dans la diffusion de l'information

Les moyens de communication traditionnels ont été massivement privilégiés pour communiquer avec son réseau privé, que ce soit la famille, les amis ou les collègues de travail (Figure 47). Le téléphone a ainsi été utilisé par 73% des répondants et le SMS par 45,5% pour communiquer avec le réseau privé familial ou amical, ces chiffres baissant légèrement pour le réseau professionnel, respectivement à 47% et 43%. Rappelons que l'une des consignes en cas d'accident industriel sur le PPI de zone de Rouen est de ne pas utiliser le téléphone afin de ne pas encombrer les lignes téléphoniques et permettre aux secours de communiquer sans difficultés. Au contraire, les messageries instantanées qui

ne saturent pas le réseau téléphonique et qui auraient pu être mobilisées n'ont drainé au maximum que 15% des appels, avec en tête Messenger pour prévenir les collègues).

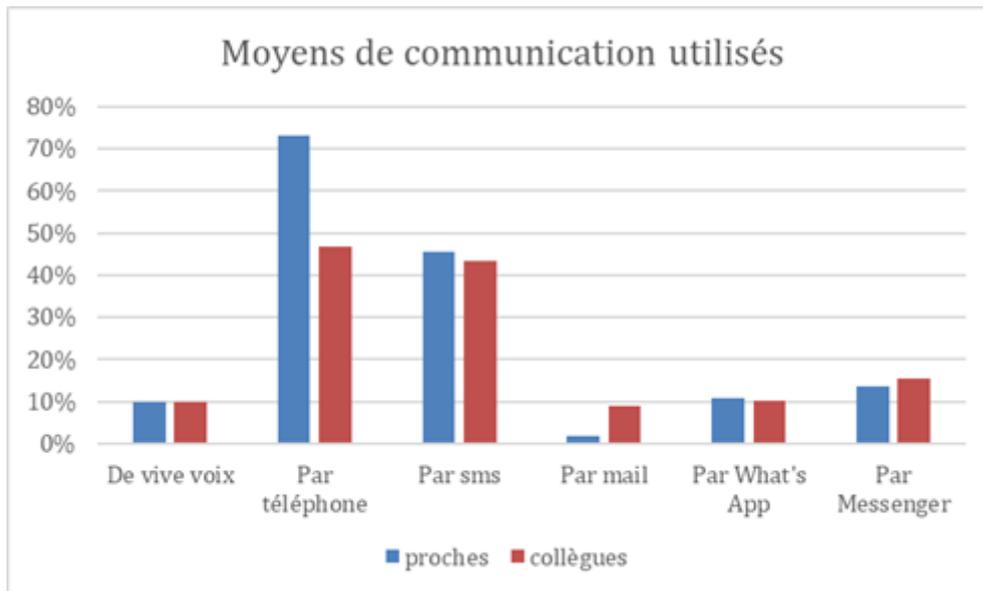


Figure 47 : Les principaux vecteurs de communication durant la crise

Les études montrent qu'à la première alerte, quelle que soit sa forme, s'en suit une recherche active d'informations pour confirmer l'information reçue et pour, le cas échéant, obtenir des informations complémentaires. Ce mécanisme a été largement observé lors de l'incendie du site Lubrizol (Figure 48), plus de 80% des répondants déclarant avoir recherché de nouvelles informations soit via la radio (26%), les réseaux sociaux (22%) et la télévision (20%).

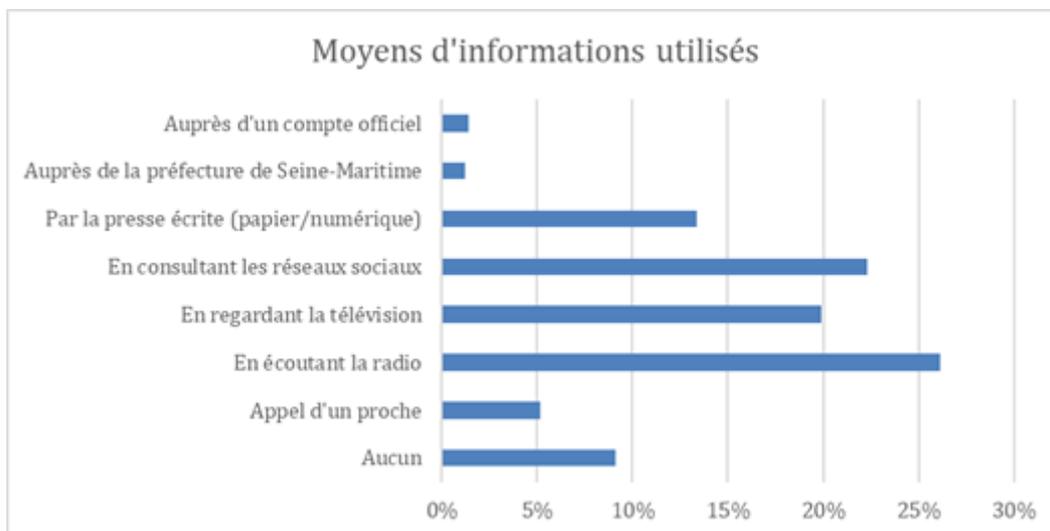


Figure 48 : Les principaux moyens pour s'informer après la première phase d'alerte

Par ailleurs l'usage des moyens d'informations a évolué au cours de la journée avec l'utilisation de différents canaux complémentaires. La télévision a été utilisée par 53% des répondants, les réseaux sociaux par 48% et la radio par 47%. Au cours de la journée, d'autres moyens d'informations ont émergé. Les populations se sont informées auprès des élus locaux (5%), des services de santé (1,5%), des pompiers (1%), des associations comme Atmo (3%), des industriels concernés par l'incendie (1%), ou encore en se rendant à proximité du lieu de l'incendie (1,5%).

Il était attendu des populations qu'elles respectent un certain nombre de consignes et / ou de recommandations suite à cette première phase d'alerte. Dans l'ensemble, et compte tenu du contexte temporel de l'événement, les réactions principales après avoir su qu'un incendie était en cours, répondent aux consignes de sécurité. Cependant, elles n'ont été appliquées que par une petite majorité de la population enquêtée : 48% ont recherché des informations, 47% sont restés ou se sont mis à l'abri, et seulement 32% ont décidé de ne pas se rendre sur son lieu de travail ou d'études, et 22% ont bouché les arrivées d'air et arrêté la ventilation.

Tous ne sont pas restés à leur domicile, ils sont ainsi 10% des enquêtés à déclarer être partis directement pour fuir l'incendie et les risques associés après la première alerte. Au total, sur la seule journée du jeudi 26 septembre 2019, ce chiffre s'élève à 14% des personnes qui ont répondu à l'enquête (Figure 49) et jusqu'à 23% s'échelonnant du jeudi au lundi. Même si ces départs peuvent paraître massifs rapportés à la population générale, leurs étalements dans la journée du 26 et les jours suivants n'ont pas provoqué d'effet remarquable sur le trafic ni d'effets de panique. Se pose cependant la question des effets potentiels de ce comportement si l'incendie s'était déroulé en pleine journée avec des conditions initiales de trafic très différentes de celles observées le 26 septembre 2019. En ce qui concerne les motifs de ces départs, les odeurs (66,3%) et la crainte des effets toxiques (86,5%) sont les principales raisons évoquées.

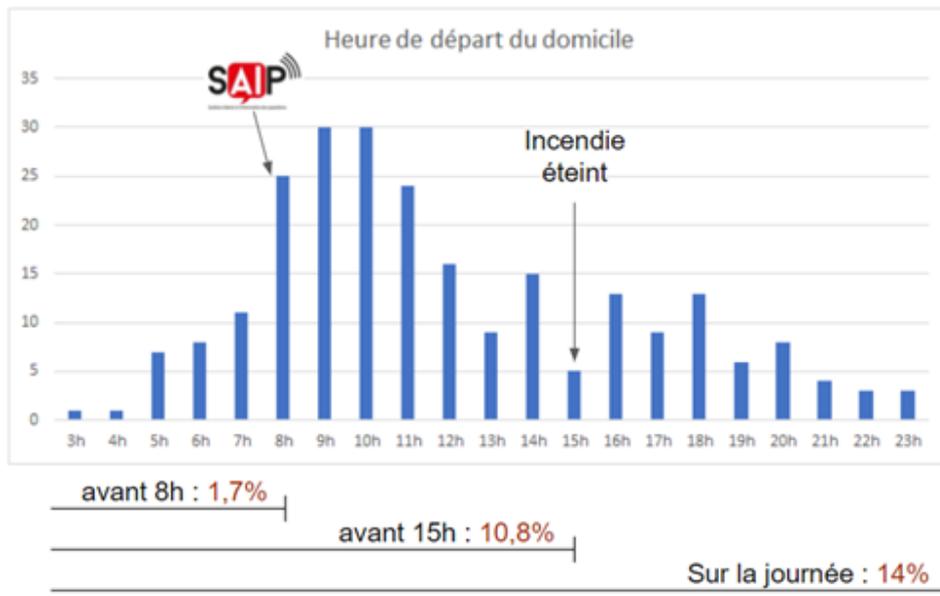


Figure 49 : Des départs importants mais étalés dans le temps de la crise

Parmi les personnes qui ont fui, une majorité était domiciliée sous le nuage (98%). Ce sont donc majoritairement des rouennais, des habitants de Mont-Saint-Aignan, de Petit-Quevilly et de Bois-Guillaume qui ont fui leur résidence. À une échelle infra communale, à l'échelle du carreau d'un kilomètre sur un kilomètre, il apparaît clairement que les résidents situés à proximité du foyer de l'incendie sont le plus partis, que ce soit à Petit-Quevilly ou Rouen, quartier des docks et de la Préfecture (Figure 50).

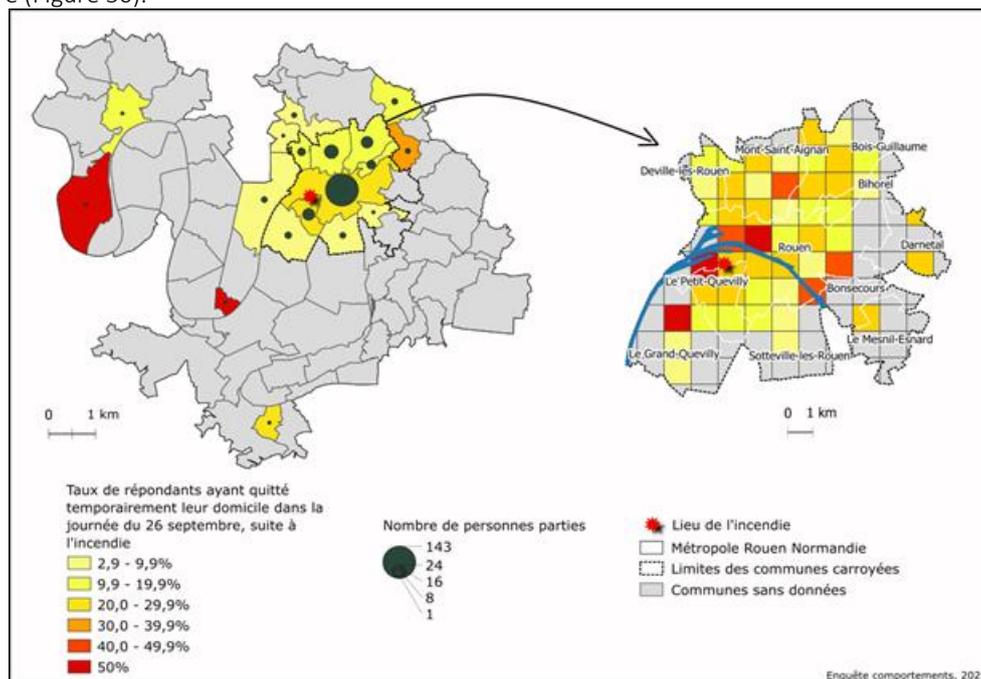


Figure 50 : Combien ont fui leur domicile, et d'où sont-ils partis ?

Afin de comparer l'évolution de la journée vécue par les répondants relativement aux activités qu'ils avaient prévu de réaliser ce jour-là, des questions étaient proposées permettant de se positionner dans ou en dehors du domicile par tranche horaire. Le traitement de ces questions par un chronogramme permet de comparer l'écart entre une journée de crise avec une journée ordinaire (Figure 51). Le premier chronogramme représente les activités effectuées par les répondants, lors de la journée du 26 septembre 2019, tandis que le second représente les activités qui étaient prévues s'il n'y avait pas eu l'incendie. En orange sont représentés la part des répondants présents à leur domicile, toutes les autres activités étant effectuées en-dehors du domicile.

Comme on l'a vu, la population dans sa grande majorité a respecté les consignes données par les autorités, notamment celle d'éviter les déplacements inutiles. A 10h, ce 26 septembre 2019, 62% des répondants sont ainsi restés à domicile alors que seuls 23,3% avaient initialement prévu de ne pas sortir. Le travail et la formation (lycée ou formation supérieure) sont les activités qui ont le moins été suivies ce jour-là. Ainsi alors que près de 67,3% des répondants auraient dû, à 10 heures, être au travail ou sur son lieu d'études, seulement 24% s'y sont rendus, soit un écart de 43 points. Tout comme le travail et les études, les loisirs, les activités essentielles et les déplacements qui y sont associés ont été réduits avec l'incendie. Ainsi des loisirs qui pointent habituellement à 5,4% à 18h contre 2,3% le jour de l'incendie. Le schéma est le même pour les activités essentielles, prévues chez 4,8% des répondants à 10h et dont seulement 3,5 les ont honorés.

L'incendie a fait émerger d'autres activités, ou plutôt réactions chez les répondants, comme la curiosité vis-à-vis de l'événement qui a conduit 1,4% des répondants à se rendre à proximité de l'incendie pour prendre des photos par exemple. D'autres réactions traduisent un sentiment d'insécurité voire de peur vécue par les répondants. Le fait de quitter son domicile ou son lieu de travail et de partir de la zone supposée comme dangereuse pour se mettre à l'abri ailleurs, notamment « chez un proche », en est l'illustration. On l'a vu si ces départs s'échelonnent toute la journée, on observe un pic à 10h. Ces départs pour aller vivre temporairement ailleurs à cause de l'incendie ne concernent en effet pas toutes les catégories socio-économiques. Les étudiants, les cadres et professions intellectuelles supérieures sont les plus partis. Les étudiants ont rejoint leur famille, tandis que les cadres, à la faveur d'un capital économique favorable, ont pu rejoindre une maison secondaire, des proches ou réserver une ou plusieurs chambres à l'hôtel.

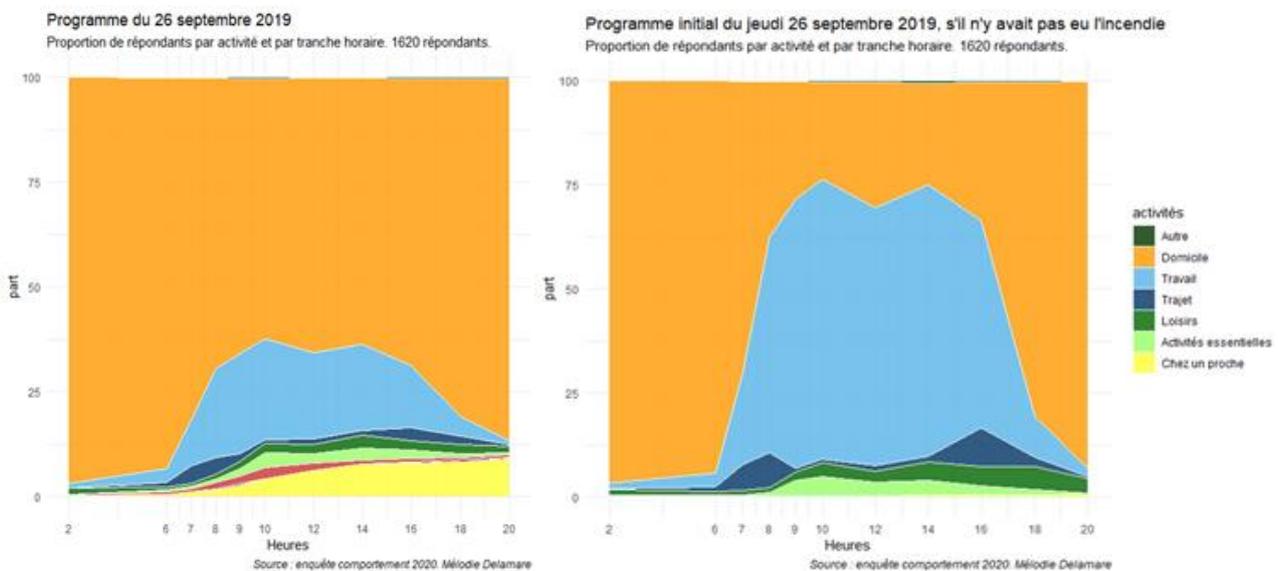


Figure 51 : Activités des répondants pour la journée du 26/11/2019 (à gauche l'activité réalisée, à droite celle prévue)

Au-delà des événements du 26 septembre, nous visions également à aborder la thématique des effets de l'accident sur l'amélioration de la culture du risque, qui passe notamment par une appréciation objective des dangers présents dans le territoire fréquenté. Nous avons donc demandé aux enquêtés quel était le nombre d'usines classées Seveso dans la Métropole Rouen Normandie. Moins de 10% de l'échantillon indiquent le nombre exact d'usines Seveso sur le territoire métropolitain, qui s'élève à 28, seuil haut et bas confondus. Si l'on considère que les répondants se sont focalisés sur les établissements seuil haut, présents au nombre de 12, alors ils sont près de 30% à avoir estimé une valeur approchante (Figure 52).

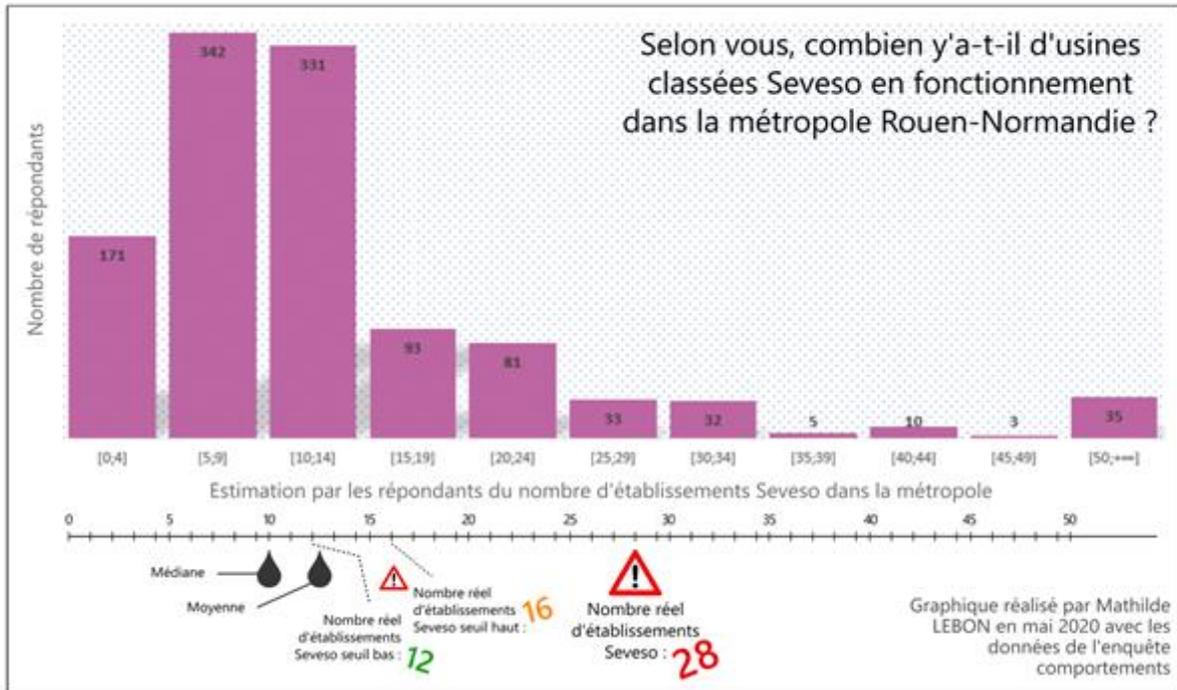


Figure 52 : Nombre d'établissements Seveso dans la MRN selon les enquêtés

Nous avons finalement proposé aux enquêtés de réfléchir aux comportements qu'ils auraient pu avoir si l'incendie s'était déclaré non pas en pleine nuit mais en plein jour, à 10h30. En complément des informations sur les actions qu'ils auraient dû réaliser ce jour-là (Figure 51), nous avons pu collecter des informations sur le lieu où ils se trouveraient à cette heure-ci, et quelles seraient leurs réactions. A partir de ces réponses, nous avons pu résumer les informations sous forme d'une chaîne de comportements. Certaines personnes n'ont déclaré qu'une action, d'autres plusieurs, d'où la présentation sous forme de trois colonnes (Figure 53).

À 10:30 un jeudi, les adultes sont au travail (79%) ou à domicile (14%), les enfants à l'école, davantage de personnes sont en extérieur pour se balader. Si la consigne en cas d'alerte est que chacun se mette à l'abri, sur son lieu de travail ou dans l'établissement le plus proche, une enquête sur la connaissance du signal national d'alerte émis par les sirènes et les comportements réflexes réalisée en 2019 avait déjà montré la difficulté des personnes à suivre cette ligne de conduite (Fenet et Daudé). Des comportements de fuite, d'indifférence ou d'attente d'informations avaient été identifiés comme majoritaires parmi la population enquêtée. Les comportements varient également selon l'endroit et le moyen de transport utilisé : un automobiliste aurait tendance à rester dans sa voiture et continuer son programme ou fuir, plutôt que d'abandonner sa voiture pour se mettre à l'abri.

Ces tendances sont en partie confirmées par cette nouvelle enquête déclarative. Quel que soit l'endroit où se situe la personne, 40% déclarent se confiner ou se mettre à l'abri. Ils sont entre 17 et 19% à ne pas interrompre leur activité et à ne pas se confiner, augmentant ainsi la vulnérabilité des populations. Le retour au domicile est mentionné par plus de 20% des répondants, alors qu'ils sont 17% à déclarer chercher les enfants à l'école, ce chiffre représentant 19% des parents de l'enquête. Enfin, ils sont 8% à dire qu'ils fuiraient la zone en cas de nouvel accident. En classant les actions réalisées et leurs effets sur la vulnérabilité (augmente, réduit, neutre), l'enchaînement des actions révèle que les comportements suivis par la majorité des enquêtés conduisent à réduire la vulnérabilité globale, au moins dans un premier temps. Les dynamiques conjointes des populations et de l'aléa qui ne sont pas explorées ici peuvent malgré tout laisser craindre que même si "seulement" 18% n'interrompt pas leur activité, 17% vont chercher leurs enfants à l'école et 8% fuit, les effets cumulés de ces populations à l'extérieur peuvent engendrer une exposition significative à un danger.

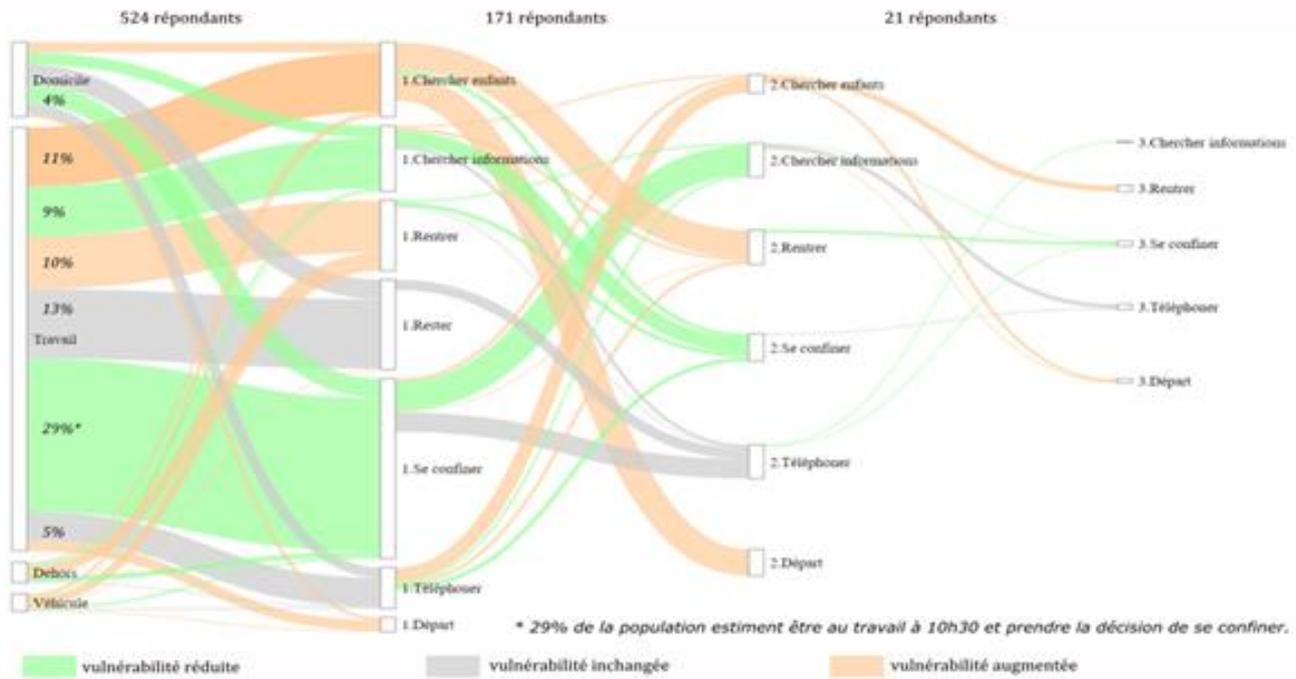


Figure 53 : Comportements et exposition au danger en cas d'accident en plein jour

8.1.5 Conclusion et perspectives

La survenue de nuit de l'incendie et les recommandations des autorités d'éviter tous déplacements non nécessaires a contribué à ce que la population reste en grande majorité chez elle ce jour-là. Mais certains comportements qui ne respectent pas les consignes de sécurité perdurent. Les cadres et les étudiants représentent une part non négligeable de départ pour fuir l'incendie. Si un incendie se déclarait en journée, nombreux sont ceux qui préféreraient rentrer chez eux plutôt que de se mettre à l'abri où ils se situent, ou encore les parents inquiets pour leurs enfants et qui déclarent souhaiter les retirer de l'école. Cela prouve qu'il faut encore travailler sur l'apprentissage des consignes de sécurité, à travers l'accès à l'information, qui reste aujourd'hui inégale sur le territoire, ou encore les formations sur les risques à travers les exercices de sécurité spécifiques au risque industriel.

Afin de compléter l'analyse sur les comportements de mobilité de la population, nous étudions ses déplacements lors de la journée du 26 septembre 2019 afin de les comparer à ceux observés lors de journées ordinaires, avant et après l'incendie. Les données utilisées ont été achetées auprès d'Orange, service FluxVision, qui représente environ 40% des parts de marché en téléphonie mobile. Les bases de données sont créées sur le comptage du nombre de mobiles par des sondes de signalisations (appels, SMS, connexion, data re-sélection du réseau). Afin d'obtenir des données représentatives de la population, le nombre de mobiles est redressé par rapport à la population standard, à l'échelle désirée. Pour notre étude, l'échelle de l'IRIS a été choisie, afin d'examiner les mobilités le plus finement possible. Une sélection de 35 IRIS a été réalisée sur la base du nombre de répondant de notre enquête, afin de pouvoir comparer les résultats de l'enquête et des données mobiles. Il est important pour nous d'avoir à la fois des IRIS situés sous le nuage (au nord de Rouen) et des IRIS hors du nuage (plutôt au sud et à l'est de Rouen), pour étudier spatialement les départs des populations à la suite de l'incendie (Figure 54).

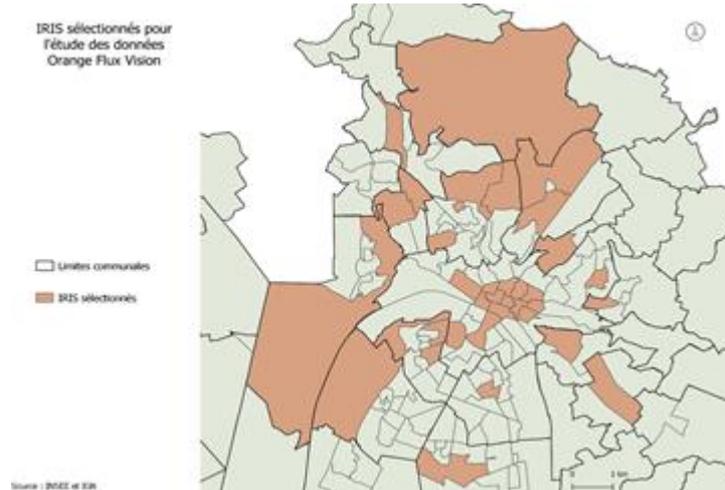


Figure 54 : Zonage d'acquisition des données de téléphonie mobile

Une deuxième étude va être menée, celle-ci axée sur la crise vécue à travers les réseaux sociaux. Nous avons enregistré tous les tweets émis le 26 septembre 2019 et les jours qui ont suivi avec la mention, via des #, de l'événement. Les objectifs seront d'étudier l'évolution de la description / perception de l'événement par les utilisateurs du réseau social, d'observer comment des fake news ont été créées et retweetées durant la journée ou encore d'évaluer l'impact des messages officiels dans la twitter sphère.

Synthèse en quelques points marquants :

- Près de 20 % des répondants ont été informés de l'incendie avant 6 heure (dont les $\frac{3}{4}$ en entendant les explosions)
- Près de 80 % avant 8 heure (dont les $\frac{3}{4}$ par un proche, et la radio)
- Seul 4% ont été alerté par l'alerte sirène
- Au pic de l'événement, entre 8 et 10:00 du matin, près de 80% des répondants sont restés à leur domicile, contre 35% un jeudi ordinaire.
- Deux ans après, ils sont près des deux tiers à n'avoir engagé aucune démarche relativement à cet incendie (72% ne sont pas inscrit au système d'alerte SMS de la métropole par exemple)
- 16% des répondants ont décidé de se mettre à l'abri, pour quelques heures à quelques jours, en fuyant la zone le 26 septembre 2019.

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

8.2.1 Méthodologie et objectif

Notre objectif était initialement de nous focaliser sur la dimension groupale dans les équipes des collèges. Nous avons rédigé un premier projet pour solliciter des enseignants et des personnels de vie scolaire pour former des groupes de six à huit professionnels et travailler avec eux sur leurs récits de la crise, tels qu'ils pouvaient s'écrire dans un dispositif groupal. La mise en place tardif du projet puis l'arrivée de la crise sanitaire avec la fermeture des établissements scolaires en mars 2020 nous ont empêchés de le mettre en place dans sa version initiale.

Lorsque nous avons relancé ce projet, en septembre 2020, nous avons choisi de réaliser des entretiens des conseillers principaux d'éducation de quatre collèges de l'agglomération rouennaise. Ceux-ci ont eu lieu entre janvier et mars 2021. Ce délai s'explique par la crise sanitaire d'une part, et par nos réticences à réaliser ces entretiens en ligne. Ainsi, nos choix méthodologiques ont été modifiés et nous ont été en partie imposés par un contexte de crise : celui de la crise sanitaire liée à l'épidémie de Covid-19 caractérisé par un temps profondément marqué par l'incertitude.

Notre échantillon se compose de quatre Conseillers principaux d'éducation (CPE) dans quatre collèges qui travaillent avec 2062 élèves. Notre échantillon est assez varié, tant pour ce qui concerne les caractéristiques sociologiques des populations accueillies, que pour la zone géographique dans laquelle ils se situent. 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 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 ».

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 ?

8.2.2 Principaux résultats

Nous présentons ici nos premiers résultats, sous forme d'hypothèses qui doivent être approfondies. Nous y travaillons pour un projet de publication d'article dans une revue scientifique en sciences de l'éducation et de la formation.

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 postériori, 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. À *postériori*, cette peur semble se transformer en colère en réponse à un sentiment de détresse. Un des CPE rappelle que dans les jours qui ont suivi l'incendie, *"il y a eu une prise de conscience plus forte qui a amené le jeudi à une demande d'heures syndicales qui a débouché sur cette grève / il y a eu une inquiétude là par rapport à la santé par rapport à ce que la fumée en tout cas le feu avait dégagé comme toxicité éventuelle"*. Un-e autre CPE dit : *"la deuxième inquiétude c'était l'angoisse des parents à terme qui posaient la question à quel moment ils pouvaient venir récupérer les enfants parce qu'il y avait un risque aussi"*.

Ces premières hypothèses présentées ici sur les liens entre le sentiment d'abandon et sa transformation dans l'après coup méritent d'être davantage étayées. Actuellement, nous poursuivons notre recherche sur les affects éprouvés en lien avec la question de l'incertitude. Cette recherche pourra déboucher sur des propositions concernant la formation initiale et continue des conseillers principaux d'éducation.

8.3 La perception des risques industriels chez les jeunes de l'agglomération rouennaise suite à l'incendie de Lubrizol-Normandie logistique

8.3.1 Objectifs

Cette recherche en psychologie a pour objectif le recueil et l'analyse des représentations des adolescents et les jeunes adultes concernant les risques industriels et les stratégies de régulation des émotions qu'ils ont mis en place à la suite de l'incendie du 26 septembre 2019.

8.3.2 Méthodologie

Le recueil de données s'est effectué en deux phases. Dans un premier temps, un questionnaire a été réalisé auprès de collégiens et lycéens en juin 2020. L'analyse des résultats de ce questionnaire a servi de socle à l'élaboration de l'enquête qualitative, réalisée dans un deuxième temps, au premier semestre 2021, en conduisant des entretiens individuels et des focus groups

8.3.2.1 Enquête quantitative : questionnaire

Modalité de passation et items

Cette enquête auprès des collégiens et lycéens a été lancée au mois de juin 2020 sitôt la diffusion des conclusions de la commission sénatoriale³¹ suite à l'incendie du site Lubrizol le 26 septembre 2019. Il s'agit d'une enquête par questionnaire en ligne répondant aux attentes des règles de protection des données personnelles. Le consentement parental éclairé a été demandé et les répondants ont été explicitement avertis de leur droit de retrait de l'étude. Le questionnaire comprend des items visant à évaluer :

- les connaissances sur les sites et les risques industriels de façon générale,
- les stratégies de régulation des émotions après l'explosion de Lubrizol,
- les émotions ressenties (peur, colère, etc.) au moment de l'accident Lubrizol puis 9 mois après l'incendie.

Analyse des réponses au questionnaire

L'étude a visé à analyser les représentations du risque industriel chez les adolescents et jeunes adultes en évaluant l'effet:

- d'exposition (sous nuage ou non)
- de proximité du lieu d'incendie (zone urbaine ; zone > 5 km ; zone > 10 km)
- de distance temporelle à l'événement (immédiat/ 9 mois)
- de développement social et cognitif (collège ou lycée) en lien avec les capacités métacognitives de construction des représentations.

Particularités de la population

La population d'étude est issue de 53 établissements (34 collèges et 19 lycées de l'enseignement public ou privé) du département de la Seine Maritime, situés de Neufchâtel en Bray (limite nord des réponses), à Elbeuf (limite sud), de Franqueville Saint Pierre (limite est) à Canteleu (limite ouest). Au total, 315 ont répondu, mais seulement 178 questionnaires ont été exploités, ceux-ci ayant reçu une autorisation parentale pour y répondre :

- 72% des élèves résident en ville.
- 52% déclarent que le nuage est passé au-dessus de chez eux ou de l'établissement scolaire
- 64% de la population comprend des filles

³¹ Rapport de Mmes Christine BONFANTI-DOSSAT et Nicole BONNEFOY, fait au nom de la CE Incendie de l'usine *Lubrizol* n° 480 tome I (2019-2020)- 2 juin 2020

- 61% des élèves sont au lycée (enseignement général, technique ou professionnel) ;
- 39% sont au collège
- 50% regardent régulièrement une chaîne d'informations (France Info, BFM, LCI, Cnews)
- 81% utilisent Youtube ; 70% Instagram, 60% Snapchat, soit plus de trois médias en moyenne.

Codage et analyse de la Question : « *Ecrire ce que vous avez ressenti suite à l'incendie Lubrizol* » (dans les trois jours après l'incendie)

Le codage et l'analyse de cette question ouverte ont permis d'élaborer la structure des guides d'entretiens pour la phase qualitative du projet et permis une analyse de comparaison des réponses des collégiens à celles des lycéens, ainsi que des réponses des personnes se situant sous le passage du nuage à celles hors du passage du nuage. Suite au comptage du nombre d'occurrences, au recodage des réponses et à la réalisation de nuages de mots produits, il a été possible de dégager des éléments récurrents dans les textes produits à cette question.

Les réponses ont ainsi été codées à partir de cinq catégories :

- *Réponses sensorielles* : Elles rassemblent les réponses faisant référence à tout ce qui relève de perceptions olfactives ou visuelles (nuage, odeurs, fumée, etc.), ainsi que de manifestations corporelles (toux, maux de tête, etc.).
- *Indifférence* : Cette catégorie regroupe les réponses exprimant un détachement à l'égard de l'incendie de Lubrizol et de ses conséquences.
- *Colère* : lexique référé à la colère.
- *Peur* : sentiments d'anxiété, de peur et d'inquiétude.
- *Défiance* : exprimée soit à l'égard des médias, soit de la gestion politique de l'évènement (ex : annonces de la préfecture entendues comme mensonges).

Les images et textes qui servent de support à l'animation de la discussion des focus groups et des entretiens de recherche reprennent ces cinq catégories.

8.3.2.2 Enquête qualitative : entretiens individuels et Focus groups

Entretiens individuels et focus groups ont été menés de janvier à juin 2021 dans le but de confirmer et approfondir les données quantitatives issues des questionnaires. La technique de focus group, fondée sur l'échange entre participants à partir de thèmes ciblés, est un mode de recueil de données particulièrement adéquat et recommandé pour étudier les représentations sociales. La confrontation aux corpus issus des entretiens individuels alimente la validité de l'analyse des discours recueillis en groupe. 11 étudiants de l'université de Rouen ou de l'ENSAN ont été interrogés en entretiens (1^{er} semestre 2021). 14 étudiants de l'ENSAN ont composé 2 focus groups.

Chaque focus group est composé de 7 participants qui ont été sous ou hors de la trajectoire du nuage et qui résidaient en ville ou hors de l'agglomération rouennaise. Les activités proposées aux participants des focus groups se sont appuyées sur l'analyse du questionnaire de juin 2020. De ce fait, 7 planches ont été présentées aux participants. Les trois premières sont des photographies en lien avec l'explosion du site Lubrizol à Rouen. Les 4 planches suivantes sont des réactions identifiées dans le questionnaire : déni, peur, média/manque d'information, défiance à l'égard du politique.

8.3.3 Principaux résultats

8.3.3.1 Euphémisation des risques

L'euphémisation des risques est une donnée récurrente dans les discours produits lors des entretiens et des focus groups. Cela confirme les écrits produits par les collégiens et lycéens (Q31« Ecrire ce que vous avez ressenti suite à l'incendie Lubrizol ») où 20% des textes évoquent le « déni » ou la minoration de l'accident. On observe ainsi un désintérêt relatif des collégiens et des lycéens pour les risques industriels liés à l'incendie Lubrizol. On retrouve cette donnée de manière plus systématique dans les discours produits lors des entretiens individuels et des focus groups, où les enquêtés adoptent une posture d'observateur, de spectateur. Cela se traduit par le fait de ne pas être sous le nuage, mais de l'avoir vu passer. Ils se mettent ainsi dans une distance physique et psychique vis à vis de Lubrizol et du nuage. On note aussi un biais d'optimisme comparatif qui est la tendance à considérer que le danger qui touche les autres a épargné les personnes enquêtées, en identifiant des personnes et des lieux qui ont été davantage touchés par l'incendie

et ses conséquences. Les conséquences de l'incendie sont mises à distance au niveau temporel et estimée « dans 20 ans », « pour les générations futures », etc.).

Des comportements adaptatifs ont été mis en place à la suite de l'incendie, les données issues des entretiens individuels et des focus groups indiquent que ce sont des conduites transitoires abandonnées après janvier 2021. Ces conduites ont consisté en des changements dans les modes de consommation, notamment en prêtant attention à la provenance des aliments et en évitant l'eau du robinet.

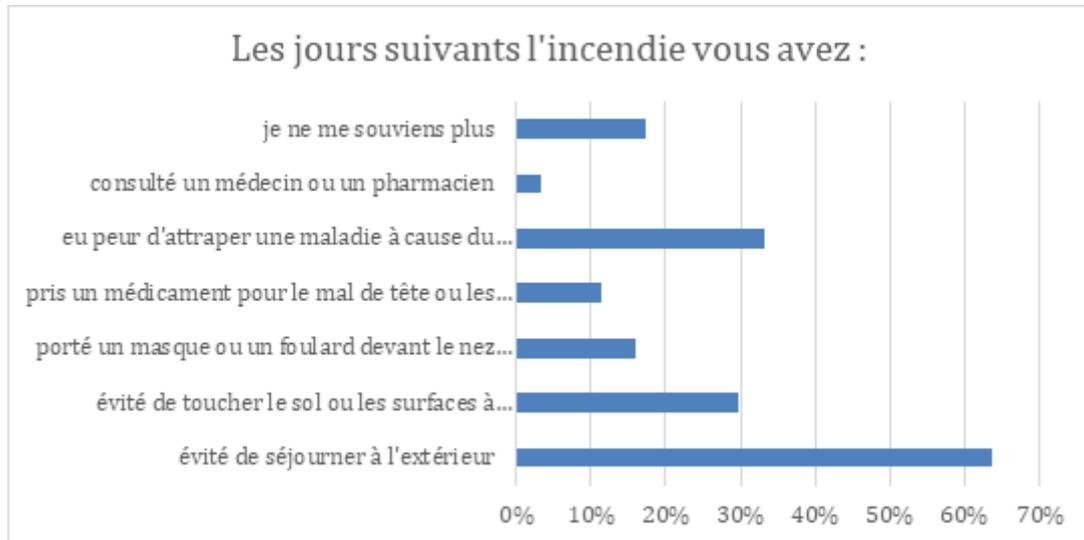


Figure 55 : Réponses en % à la question posée aux élèves « Le jour de l'incendie et les 4 jours suivants, vous avez »

En revenant à des comportements antérieurs à l'incendie et en les justifiant par un danger qui est « derrière soi », les enquêtés évitent ainsi d'être confrontés à un mécanisme de dissonance cognitive (Festinger, 1957³²) c'est-à-dire à un comportement qui ne va pas dans le sens de sa pensée.

8.3.3.2 Perceptions sensorielles du risque

Les réponses sensorielles sont évoquées par au moins un élève sur cinq dans les textes produits. La référence à la sensorialité se trouve davantage dans les réponses des collégiens (23%) que dans celles des lycéens (16%). On note, par ailleurs, un écart négligeable 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%.

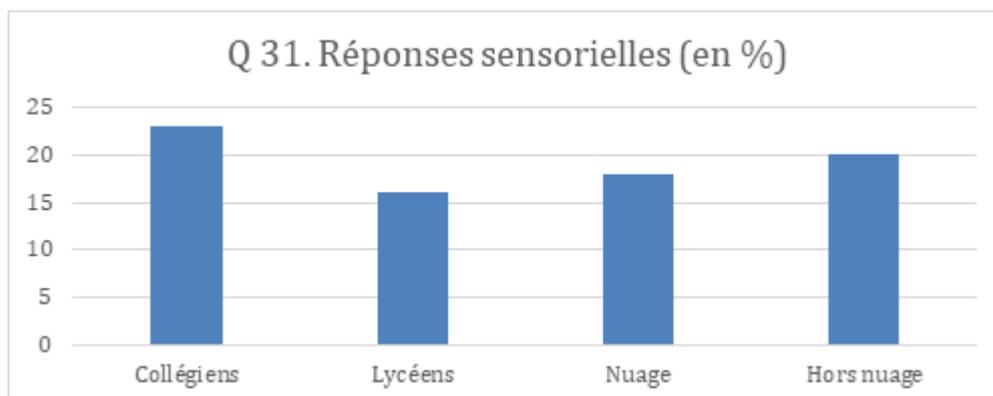


Figure 56 : évocation d'expérience sensorielle dans le texte demandé à la question " Écrire ce que vous avez ressenti suite à l'incendie Lubrizol " (ou une liste d'au moins 5 mots ou expressions)

³² Festinger, L. (1957). *A theory of cognitive dissonance*. Stanford, CA: Stanford University Press.

La perception sensorielle du risque est aussi très présente dans les entretiens individuels et de groupe, l'évocation du nuage est fréquemment associée à un adjectif qui relève du registre de la peur : inquiétant, menaçant. Au-delà du voir (noir, saleté, nuage) et du sentir (mauvaises odeurs) pour se représenter le risque, on note dans les entretiens la nécessité de recourir à un savoir expérientiel. L'incendie a participé à ce qu'on pourrait qualifier d'« apprentissage olfactif » du risque. L'odeur de soufre, d'œuf pourri de caoutchouc brûlé est désormais associée à Lubrizol. L'olfactif occupe une place particulière, dans la mesure où il participe à la réactivation du souvenir Lubrizol. Il nous a semblé nécessaire de distinguer le visuel de l'olfactif même s'ils participent tous deux à la perception du risque. En effet, si le nuage est inquiétant et représente un danger, l'odeur est associée au danger qu'on respire. Contrairement au nuage qui était mis à distance, l'odeur par le biais de la respiration, pénètre dans l'organisme. Elle représente un risque contre lequel les individus ne peuvent plus se prémunir en utilisant la « mise à distance ». Les réponses sensorielles traduisent que le choc émotionnel qui fait suite à l'incendie comporte une charge psychotraumatique potentielle.

8.3.3.3 Les émotions ressenties dans l'immédiat : anxiété et peur, et à 9 mois : intensité persistante de la colère

Lors de l'enquête par questionnaire, les collégiens et lycéens ont évalué l'intensité de six sentiments (colère, peur, tristesse, agressivité, inquiétude, soulagement). Il leur a été demandé d'évaluer ces sentiments « juste après l'incendie » puis « 9 mois plus tard en juin ». Chacun de ces sentiments est noté sur une échelle d'intensité allant de 1 (très faible) à 4 (très élevée). La figure ci-dessous donne les réponses codées 3 et 4 (élevée et très élevée) pour septembre 2019 et en juin 2020.

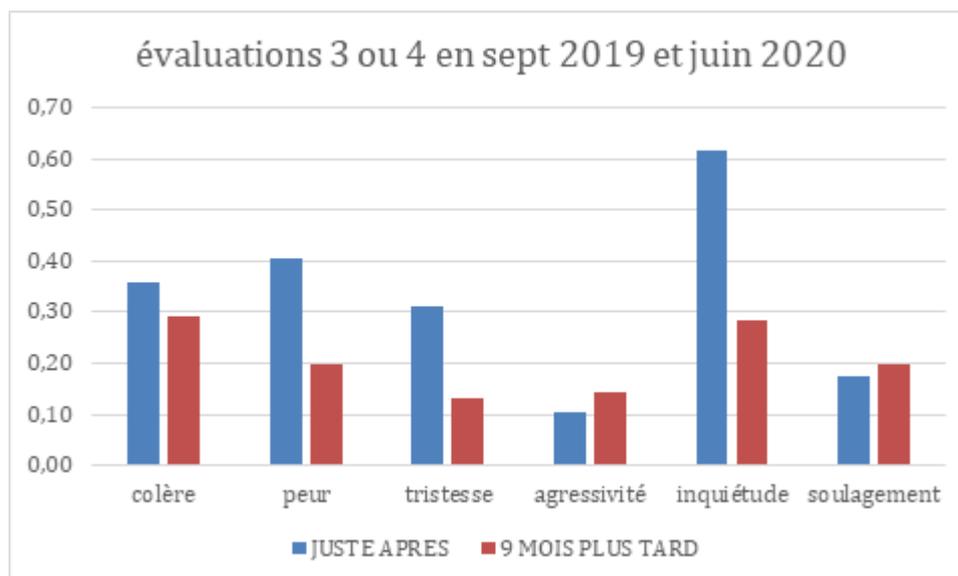


Figure 57: Intensité des émotions en septembre 2019 et juin 2020 pour l'ensemble des jeunes sous nuage et hors nuage

L'analyse globale des réponses évaluées intensité 3 ou 4 indique que les sentiments d'anxiété (peur et inquiétude) dominent en septembre. La colère et la tristesse sont déclarées fortes chacune par 30% des élèves. Neuf mois plus tard, en juin, la colère et l'inquiétude sont fortes ou intenses pour 1/3 des élèves. Colère, peur, tristesse et inquiétude néanmoins sont atténuées en juin. Chez les collégiens : si on considère l'intensité élevée cotée 4, le regroupement des sentiments en 4 catégories indique que la peur intense (peur+ inquiétude) concerne 25% des élèves exposés au nuage en septembre et que quasi le même pourcentage déclare un soulagement très élevé en juin. Pour les hors nuage, c'est aussi la peur et la colère (colère + agressivité) qui sont les plus fréquentes en septembre alors que la colère reste intense pour 12% des élèves.

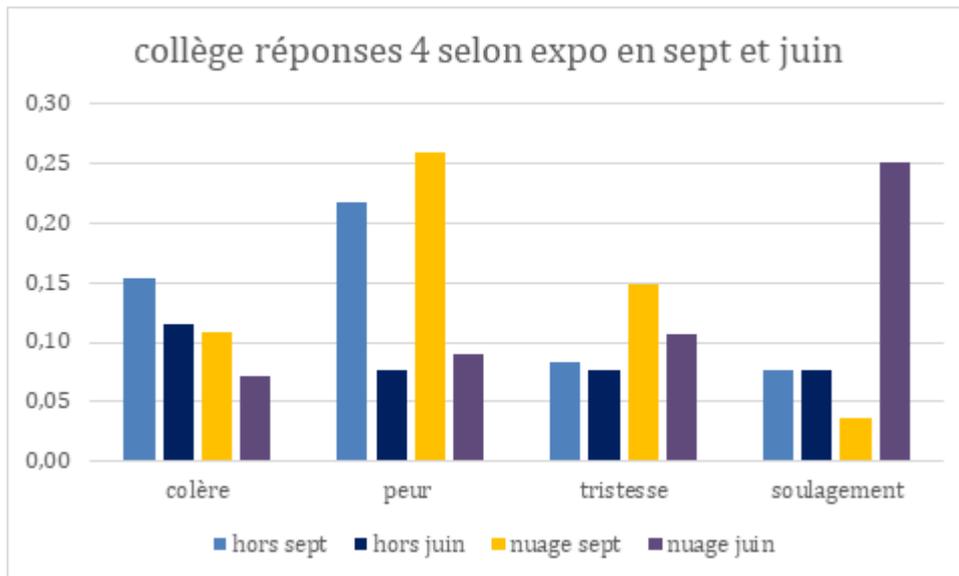


Figure 58 : intensité des émotions chez les collégiens en septembre et juin

Chez les lycéens, c'est le soulagement qui est le plus fréquent pour ceux qui ont été exposés (>25%) puis la peur (18%). En juin la colère et le soulagement très élevés pour eux subsistent chez 10% des enquêtés. Chez les hors nuage, c'est la peur qui prédomine (>30%) juste après l'incendie, alors qu'en juin, colère et soulagement sont chacun à 12%.

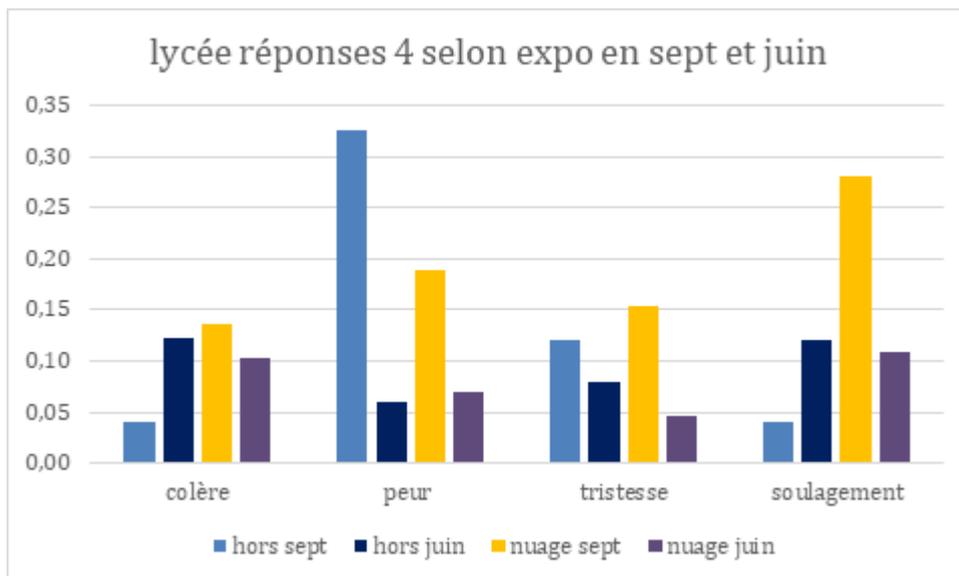


Figure 59 : intensité des émotions chez les lycéens en septembre et juin

On observe des profils émotionnels relativement différents au collège et au lycée avec une atténuation 9 mois après l'incendie. Les données ne permettent pas de faire la part des entre l'apaisement à distance et l'effet conjugué des émotions induites par la crise sanitaire, le confinement, l'école à distance. Le relevé de la fréquence lexicale des mots émotionnels dans le texte écrit par les élèves montre d'abord que plus d'un quart des textes utilisent largement les formes pronominales à la première personne dont « je ». Cela signifie un engagement personnel de l'élève dans la production du texte. On note ensuite que les mots peur, stress, sont les plus usités. Cela vaut au collège comme au lycée. On remarque que l'effet d'exposition au nuage ne modifie pas les usages lexicaux.

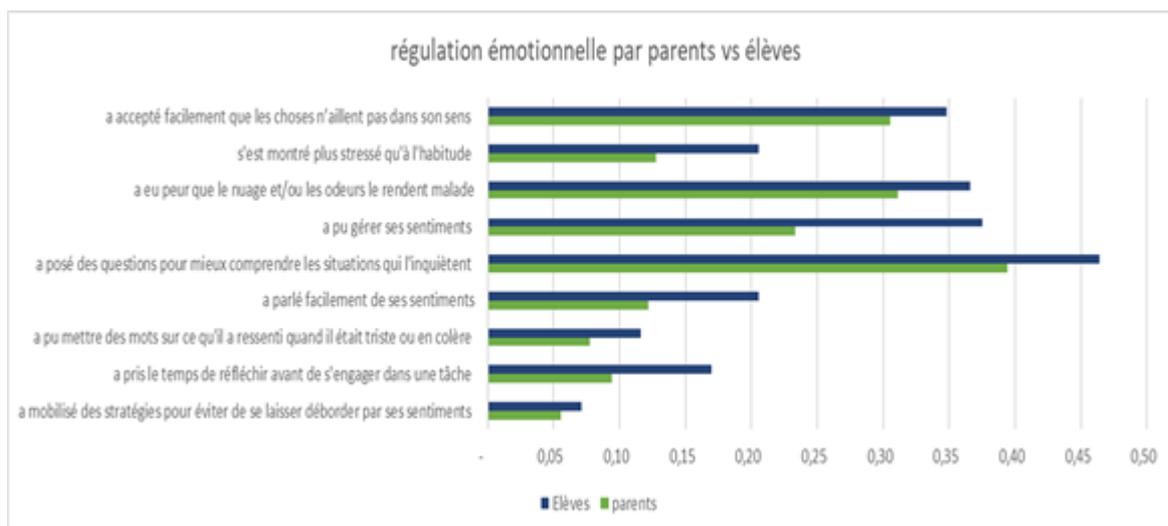


Figure 62 : La régulation émotionnelle

8.3.3.4 Méconnaissance des comportements à adopter en cas d'alerte

A noter d'abord que les enquêtés ont des connaissances très floues voir lacunaires sur le nombre de sites Seveso dans l'agglomération, le nombre de coups sirènes pour alerter. Les comportements de protection à adopter sont globalement adaptés pour un peu plus que la moitié des enquêtés (au moins fermer les fenêtres et boucher les aérations). La différence en fonction de la zone de résidence est négligeable. On ne peut pas conclure que ceux qui résident dans la zone qui a reçu de l'information au titre du plan de prévention se montre plus informés que ceux qui sont loin des sites. Depuis l'incendie de Lubrizol, les enquêtés n'ont pas déclaré avoir obtenu ou cherché des informations sur les consignes à respecter en cas d'alerte. S'ils ne se sont pas renseignés par eux-mêmes (30% l'ont fait), les enquêtés déplorent le manque d'information suite à l'incendie. Ainsi, dans les entretiens, beaucoup signalent, le manque de communication, l'absence de courrier ou de mail indiquant les consignes à respecter et les comportements à adopter. Ainsi, pour beaucoup des jeunes le doute persiste. Compte tenu de ce résultat, l'information de la population quant aux comportements à adopter en cas d'alerte est une question centrale d'autant plus qu'elle rencontre un bas niveau d'intérêt chez les jeunes enquêtés. On constate ainsi un état d'impréparation des jeunes pour gérer psychologiquement une situation de stress aigu lors d'un accident industriel, de façon individuelle et sans doute collective.

8.3.3.5 Parents lanceurs d'alerte et protecteurs

Lors de l'enquête par questionnaire, 50% des collégiens et lycéens de l'agglomération ont déclaré avoir été informé de l'incendie par leur parent. Ce résultat se retrouve au sein des entretiens que nous avons menés auprès des étudiants. L'incendie s'étant déclaré dans la nuit, les jeunes ont bien souvent été réveillés par leurs parents.

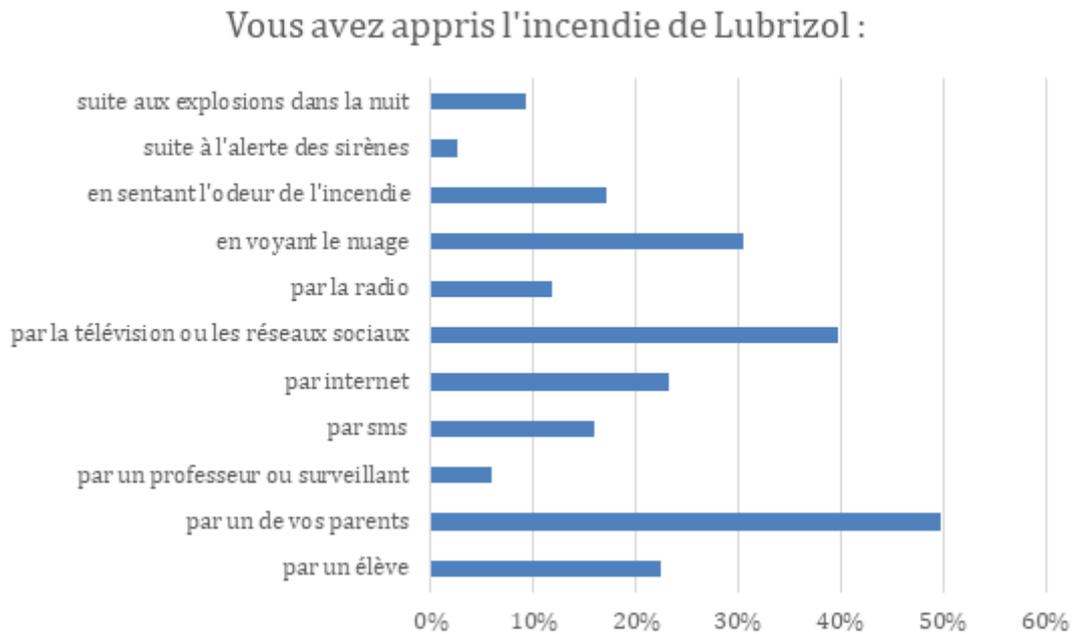


Figure 63 : canal d'informations par lequel collégiens et lycéens ont appris l'incendie Lubrizol

L'alerte émanant des parents s'est généralement associée de recommandations : rester chez soi, boucher ses fenêtres par exemple. Il est d'ailleurs à noter que dans les réponses au questionnaire, 62% des familles avait déclaré avoir donné des recommandations de prévention à leur jeune. Ainsi, le rôle des parents ne s'est pas limité à signaler l'incendie de Lubrizol, c'est aussi eux qui ont alerté les jeunes quant aux dangers potentiels représentés par l'évènement. En ce sens, les parents ont permis aux jeunes de prendre conscience du danger. Les résultats de notre recherche convergent ainsi vers le fait que les parents suivent les informations et relaient celles-ci auprès de leurs enfants. La famille ne se cantonne pas à un rôle purement informatif, mais donne des consignes et des préconisations. Les consignes parentales sont généralement respectées par les enfants. Elles deviennent un référentiel dans un contexte d'incertitude. Ce référentiel joue un rôle essentiel dans la mesure où la population a une méconnaissance des comportements à adopter en cas d'alerte pour un risque industriel (Fenet et Daudet, 2020)³³.

Dans les réponses recueillies dans le questionnaire, 23% des familles ont décidé de s'éloigner de Rouen, a minima le weekend suivant l'incendie. Par ailleurs, 7% des familles ont déclaré avoir songé à déménager un jour pour habiter plus loin des sites Seveso. Les comportements de fuite se sont retrouvés au sein de notre recherche. Ainsi, 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.

8.3.4 Conclusion

Nos premiers résultats mettent en évidence un impact émotionnel fort chez tous les adolescents et jeunes adultes impliqués directement (sous le nuage) ou indirectement (hors nuage). Pour tous, la famille a joué un rôle important en termes d'alerte et de lieu protecteur. On observe une indifférence notable et une méconnaissance inquiétante des risques industriels dans un bassin géographique largement concerné par cette problématique. Une réflexion quant à la sensibilisation des collégiens, lycéens et jeunes adultes aux risques industriels apparaît essentielle à mettre en place.

³³ Fenet, J., Daudé, E. (2020). « La population, grande oubliée des politiques de prévention et de gestion territoriales des risques industriels : le cas de l'agglomération rouennaise », *Cybergeo : European Journal of Geography* [En ligne], Espace, Société, Territoire, document 932.

8.4 Les médecins généralistes face aux événements de Lubrizol – Normandie Logistique

8.4.1 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.

Les premiers échanges ont permis de découvrir que les méthodes des uns et des autres n'étaient pas aussi éloignées qu'on aurait pu le penser. La méthode de l'entretien semi-directif était éprouvée d'un bout à l'autre de la table, et, mieux, la méthode de la théorie ancrée (Glaser et Strauss, 1999³⁴ ; Juston et Barbier, 2019³⁵) s'est imposée pour articuler nos perspectives disciplinaires et mettre à l'épreuve les hypothèses de recherche. 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.

8.4.1.1 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 ? Intégrer la Covid dans notre objet est apparu évidente et de cette lucidité naquit le collectif du même nom : LuCid (Lubrizol et Covid-19) (Figure 64).

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 confronté à l'incendie de Lubrizol.

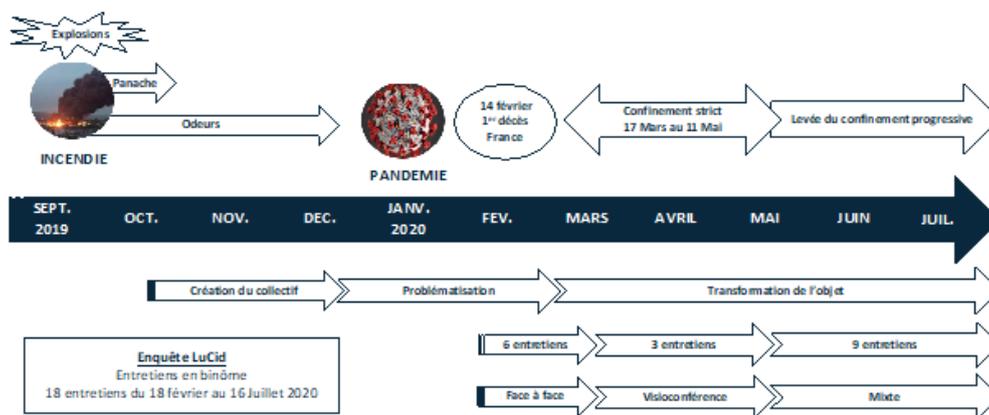


Figure 64 : Frise chronologique de septembre 2019 à juillet 2020. Au-dessus de la flèche, les événements liés à l'incendie et la pandémie et en dessous, les différentes étapes de construction de l'étude

³⁴ BARNEY G. GLASER, ANSELM L. STRAUSS, 1999, *The Discovery of Grounded Theory: Strategies for Qualitative Research*, Chicago, Aldine Transaction.

³⁵ JUSTON R., BARBIER K., 2019, « Équiper le processus de recherche. Retours réflexifs comparés sur l'usage d'Atlas.ti et de Sonal dans deux recherches doctorales », *Bulletin de Méthodologie Sociologique / Bulletin of Sociological Methodology*, 143, p. 53-76.

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

Pour comprendre comment ces deux crises sanitaires ont configuré la pratique médicale, nous avons donc opté pour une approche orientée par la problématique sociologique de l'effet des épreuves professionnelles sur les pratiques.

L'apport conjoint des approches a été mis en pratique en situation d'entretien. Les guides d'entretien ont été discutés et approuvés collectivement. 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, 2004³⁶). 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.

Au-delà de la situation d'entretien, l'enquêteur médecin pose un cadre, esquisse les lignes de force du tableau et l'enquêteur sociologue bouscule les perspectives et apporte les nuances et contrastes nécessaires à la compréhension de l'objet. Le sociologue, garant du cadre problématique de la recherche, redéfinit l'échange entre professionnels dans une description des pratiques et connecte les récits des médecins à des enjeux identifiés par la littérature en sociologie ou anthropologie de la santé.

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., 2020³⁷). Ces crises définies comme « sanitaires » fonctionnent ici comme des « épreuves » (Lemieux, 2018³⁸) 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, 2021³⁹).

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., 2002⁴⁰ ; Bloy, 2008⁴¹ ; Fox, 1988⁴² ; Gocko et al., 2017⁴³ ; Han, Klein et Arora, 2011⁴⁴ ; Motte et al., 2020⁴⁵). Les « omnipraticiens » « par leur place dans le système de soins et les caractéristiques de leur exercice, [...] sont confrontés à plusieurs formes d'incertitude » (Bloy, 2008⁴¹, 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, 2009⁴⁶). 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, 2019⁴⁷ ; Todeschini, 1999⁴⁸), 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, Fernandez et Borgne-Uguen, 2019⁴⁹).

³⁶ GALEMBERT C. DE, BELBAH M., 2004, « Vertus heuristiques d'une recherche en tandem », *Terrains travaux*, n° 7, 2, p. 127-145.

³⁷ BERGERON H., BORRAZ O., CASTEL P., DEDIEU F., 2020, *Covid-19 : une crise organisationnelle*, Presses de Sciences Po (Essai), 136 p.

³⁸ LEMIEUX C., 2018, *La sociologie pragmatique*, La Découverte, (Repères), 128 p.

³⁹ 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*.

⁴⁰ 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 »,

⁴¹ BLOY G., 2008, « L'incertitude en médecine générale : sources, formes et accommodements possibles », *Sciences sociales et sante*, Vol. 26, 1, p. 67-91.

⁴² FOX R.C., 1988, *L'incertitude médicale*, Paris, L'Harmattan.

⁴³ GOCKO X., PERDRIX C., COMPAGNON L., GHASSAROSSIAN C., RENARD V., 2017, « Socialisation professionnelle et futur DES de médecine générale », *exercer*, 131, p. 140-142.

⁴⁴ 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.

⁴⁵ 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.

⁴⁶ VEGA A., 2009, « Les déterminants de la décision médicale », *Médecine*, 5, 6, p. 282-286

⁴⁷ MOYAL A., 2019, « Rationalisation des pratiques professionnelles en maisons de santé pluriprofessionnelles », *Revue française de science politique*, Vol. 69, 5, p. 821-843.

⁴⁸ TODESCHINI M., 1999, « Illegitimate Sufferers: A-Bomb Victims, Medical Science, and the Government », *Daedalus*, 128, 2, p. 67-100.

⁴⁹ PEDROT F., FERNANDEZ G., BORGNE-UGUEN F.L., 2019, « Les maisons de santé pluriprofessionnelles : des espaces de coordination du soin entre professionnels de santé, patients et proches-soutiens », *Journal de gestion et d'économie de la sante*, N° 1, 1, p. 110-126

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

8.4.2.1 Méthodologie

L'irruption de la pandémie dès la phase exploratoire de l'enquête a bouleversé et transformé notre objet d'étude [figure 1]. 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., 2021⁵⁰). Le Tableau 37 résume les caractéristiques sociodémographiques des enquêtés. La Figure 65 a été réalisée en collaboration avec une ingénieure d'étude géographe également membre du WP4 et représente la répartition géographique des enquêtés selon leurs expositions.

Tableau 37 : caractéristiques socio professionnelles des enquêtés (février-juillet 2020)

	Genre	Âge (ans)	Lieu d'exercice	Localisation	Type d'exercice	Durée entretien (min)
M1	F	40-50	Urbain	Centre Rive Droite	Cabinet	64
M2	F	40-50	Urbain	Centre Rive Droite	Cabinet	69
M3	F	40-50	Urbain	Centre Rive Gauche	Maison de santé	56
M4	F	50-60	Urbain	Centre Rive Droite	Maison de santé	28
M5	H	40-50	Rural	Plateau Est	Maison de santé	29
M6	H	> 60	Urbain	Plateau Nord	Maison de santé	74
M7	F	30-40	Rural	Plateau Est	Cabinet	91
M8	F	50-60	Urbain	Plateau Ouest	Cabinet	100
M9	F	30-40	Rural	Plateau Nord	Maison de santé	83
M10	H	30-40	Semi Rural	Plateau Est	Cabinet	93
M11	M	50-60	Urbain	Plateau Nord	Cabinet	82
M12	F	30-40	Rural	Plateau Nord	Maison de santé	64
M13	H	> 60	Urbain	Centre Rive Droite	Cabinet	71
M14	F	> 60	Urbain	Centre Rive Gauche	Cabinet	95
M15	H	30-40	Semi Rural	Plateau Ouest	Cabinet	79
M16	F	30-40	Urbain	Centre Rive	Cabinet	62

⁵⁰ 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 à court et moyen termes de l'incendie industriel de Rouen en 2019 : matériels et méthodes d'enquête », *Environnement Risques Santé*, 20, 2, p. 185-190.

				Gauche		
M17	F	40-50	Rural	Plateau Est	Cabinet	82
M18	H	> 60	Urbain	Centre Rive Droite	Cabinet	62
M19	H	> 60	Urbain	Centre Rive Droite	Cabinet	110

La dénomination « cabinet » regroupe les cabinets individuels, mono et pluri professionnels et « maison de santé » : les centres de santé municipaux et maisons de santé pluri professionnelles.

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).

8.4.2.2 Résultats principaux

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 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, 2009⁵¹ ; Charvolin et al., 2015⁵² ; Faugere, 2002⁵³).

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.

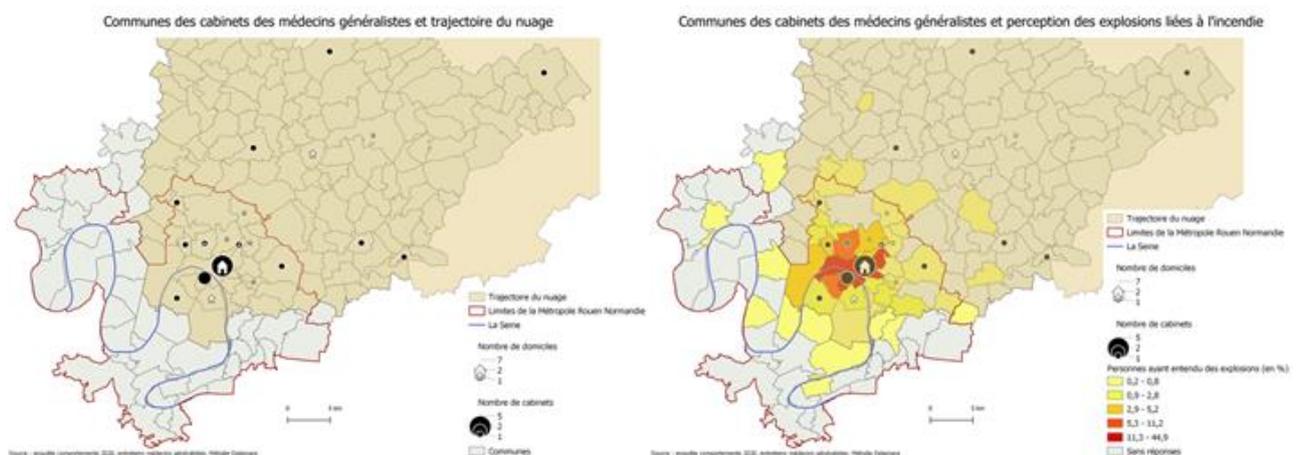


Figure 65 : Répartition des enquêtés selon leur lieu de vie, de cabinets Réalisées par Mélodie Delamare (Ingénieure d'Étude Géographie)

⁵¹ ARNODIN L., 2009, « Imaginaires du brouillard », *Ethnologie française*, Vol. 39, 4, p. 609-622.

⁵² CHARVOLIN F., FRIOUX S., KAMOUN L., MÉLARD F., ROUSSEL I., 2015, *Un air familial ? Sociohistoire des pollutions atmosphériques*.

⁵³ FAUGERE E., 2002, « Percevoir ou mesurer ? Approche anthropologique de la qualité de l'air », *EUROPAEA-Journal des Européanistes*, VIII, 1, 2, p. 19.

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 confronté 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 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, 1983⁵⁴). 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 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.

⁵⁴ DOUGLAS M., WILDAVSKY A., 1983, *Risk and Culture: An Essay on the Selection of Technological and Environmental Dangers*, 224 p.

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, 2003⁵⁵).

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.

« 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 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.

8.4.3 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.

8.4.3.1 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

⁵⁵ DODIER N., 2003, *Leçons politiques de l'épidémie de sida*, Paris, Editions de l'École des hautes études en sciences sociales (Cas de figure), 359 p.

crise(s). À mesure que la maîtrise d'un savoir objectif s'étiolo 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.

8.4.3.2 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, 2008⁵⁶ ; Richard et Lussier, 2016⁵⁷). 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.

⁵⁶ LUSSIER M.-T., RICHARD C., 2008, « En l'absence de panacée universelle », *Canadian Family Physician*, 54, 8, p. 1096-1099.

⁵⁷ RICHARD C., LUSSIER M.-T., 2016, *La communication professionnelle en santé 2e édition*, PEARSON, 828 p.

8.5 Perspectives et conclusion

Cette démarche d'enquête pluridisciplinaire au sein du projet COP HERL a abouti sur des résultats et des collaborations scientifiques porteuses que nous souhaitons faire perdurer.

Après la publication dans la revue Santé Publique « De l'incendie d'une usine Seveso à la Covid-19 : le médecin généraliste en situation de crise ? », l'écriture d'un article centré sur la représentation des risques face à l'incendie Lubrizol et Normandie Logistique est envisagé. Une analyse approfondie des entretiens réalisés, mis en regard avec la littérature scientifique constituée sur d'autres accidents industriels - vécus en France comme à l'international sera réalisée. Cette comparaison permettra la modélisation locale du rapport aux risques, à vocation de généralisation.

Les données cumulées vont donc continuer d'être analysées, et ceci sous des prismes pluriels qui s'étendent de l'étude de l'incendie Lubrizol à des réflexions sur la crise sanitaire Covid-19. L'appréhension conjointe de ces deux événements vécus successivement par les médecins généralistes s'est en effet révélée heuristique, enrichissant nos questionnements de recherche. Cette comparaison a par exemple mis en exergue l'importance des liens de solidarité et de réseaux mobilisés par les médecins lors de leur confrontation à des situations de travail exceptionnelles.

Des interrogations sur les fonctions (et la place) des secrétaires des cabinets médicaux pourraient conduire à une nouvelle phase de terrain pour mieux comprendre cette profession. Les situations de crises, comme pour les MG, permettent de mettre en lumière les spécificités professionnelles.

La communication et la publication scientifique sera poursuivie avec entre autres la journée d'étude rouennaise dédiée à l'accident Lubrizol, qui se tiendra le 26 septembre 2022.

Le collectif LuCid n'interviendra pas dans la seconde phase du projet COP HERL, mais sa dynamique se poursuit dans le long terme. L'incendie extraordinaire de Lubrizol-Normandie Logistique a permis la rencontre et le décloisonnement des disciplines universitaires grâce à la collaboration originale entre médecins généralistes et sociologues.

Nos premiers résultats concernent l'information, tant celle touchant à l'annonce de l'événement qu'à ses conséquences. La grande majorité des personnes ont été prévenues par un proche, les parents préviennent aussi leurs enfants même adultes, et moins d'un tiers l'ont également été par leur employeur. L'information relative aux consignes de sécurité apparaît problématique, en effet celles-ci n'ont été appliquées que par une petite majorité de la population enquêtée (Comportements des populations lors de l'incendie du 26 septembre 2019). Depuis l'incendie, les enquêtés adolescents et jeunes adultes n'ont pas cherché d'informations sur les consignes à respecter en cas d'alerte, bien qu'ils déplorent le manque d'information dans les suites de l'incendie.

Compte tenu de ces résultats, **l'information de l'ensemble de la population concernant les conduites à adopter en cas d'alerte est une question centrale** d'autant plus qu'elle rencontre un bas niveau d'intérêt chez les jeunes enquêtés. On observe ainsi un état d'impréparation de la population pour gérer matériellement et psychologiquement un accident industriel. Dans le cas de l'incendie de Lubrizol, les médecins généralistes ont pu eux même être confrontés à un manque d'informations, qui les a amenés à prodiguer des conseils de « bon sens » à partir de leur expérience personnelle, faute d'informations et de connaissances « officielles » et homogènes.

Outre le problème de l'information, les analyses menées ici soulignent un défaut général d'accompagnement, tant en amont de l'événement (concernant les comportements à avoir en situation d'accidents) qu'en aval (pour la gestion de l'incertitude à courts, moyens et longs termes). Ce point concerne aussi bien la population en général que les acteurs en situation de responsabilité (médecins, parents, etc.). En conséquence, on observe que cette responsabilisation spontanée des populations génère des dysfonctionnements (réflexes problématiques pendant l'événement, stress, colère/défiance) mais pousse aussi les individus à agir et à réagir en puisant dans leurs propres ressources (recherche d'information, de solutions, évaluations personnelles des risques et des possibilités d'adaptation, etc.). Si elles témoignent de capacités réelles de résilience, ces ressources ne retirent rien aux besoins de coordination, d'anticipation et de prévention face aux risques tels que celui intervenu à Rouen le 26 septembre 2019.

L'apprentissage des consignes de sécurité, à travers l'accès à l'information, ainsi que des formations sur les risques à travers les exercices de sécurité spécifiques au risque industriel et adaptés à des publics de tous âges.