

PROJET COP HERL

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

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

NOTE DE SYNTHÈSE

PHASE 1

NOVEMBRE 2020 – DECEMBRE 2021

L'accident majeur qui s'est produit sous la forme d'un incendie sur les sites de Lubrizol et Normandie Logistique 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.

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. 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.

Une des spécificités de cet incendie, outre sa violence et sa proximité avec le centre-ville, a été la complexité des mélanges de par le nombre de molécules mises en jeu et leur phase d'entrée en combustion. Ainsi, 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 chimiques 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 a été déployée dans le cadre du projet COP HERL et qui fait sa plus-value et sa spécificité par rapport aux nombreuses analyses déployées lors de la phase de crise pour évaluer le risque pour la population.

Le projet COP HERL porte 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 peuvent être les stratégies d'adaptation et de résilience des acteurs ?

Le projet COP HERL rassemble 19 laboratoires et plus de 100 personnels scientifiques et techniques. Il durera 3 ans de novembre 2020 à décembre 2023 et s'organise autour de 4 groupes de travail afin de i) caractériser l'incendie, ii) mesurer la contamination des matrices environnementales, iii) évaluer la santé et toxicité des produits issus de l'incendie, iv) jauger les perceptions sociales et les capacités de résilience.

Dans le cadre de la phase 1, il a été mis l'accent sur l'urgence i) d'identifier des marqueurs de l'incendie capables ensuite d'être suivis dans les milieux environnementaux (sols et eaux), ii) de détecter une incidence éventuelle de l'incendie sur la teneur en métaux et HAP dans les cheveux, iii) de diagnostiquer les réactions des populations durant le temps de la crise. Ainsi les résultats et livrables attendus pour la phase 1 du projet concernent :

- Les 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
- Les premiers résultats sur la progression du panache en fonction des conditions atmosphériques et le rabattement des suies
- Les premiers résultats sur la caractérisation du bruit de fond et différenciation par rapport aux marqueurs spécifiques issus de l'incendie
- Les 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
- Les résultats des premières enquêtes auprès des acteurs de l'éducation et de la santé et sur la réaction des populations en situation de crise

Cette note de synthèse a pour objet de présenter ces premiers résultats issus de la phase 1.

1) Caractérisation de l'incendie et incidences

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

L'objectif était de réaliser un calcul permettant de simuler la chronologie de la dispersion du panache de fumées de l'incendie de l'usine Lubrizol - Normandie Logistique de Rouen du 26 septembre 2019. Pour y répondre, nous avons choisi de réaliser une simulation aux grandes échelles avec le code de calcul YALES2 développé au CORIA. 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 contaminants issus d'un incendie industriel, divers phénomènes physiques doivent être pris en compte comme le vent, qui influence majoritairement la direction de propagation des fumées, la source des contaminants, qui pilote les phénomènes convectifs et la topographie autour de l'incendie, qui modifie l'écoulement et influence ainsi la dispersion du panache de fumées et des contaminants transportés.

Topographie et Maillage

La première étape de ce travail a consisté à extraire la topographie de notre zone d'intérêt. Deux zones centrées autour de l'usine Lubrizol ont été extraites afin un maillage plus fin sur le centre-ville 5x5km et une lâche de 10x15km pour l'extérieur de l'agglomération. Les bâtiments n'ont pas été intégrés dans la topographie mais il est tenu compte des effets de leur présence dans la modélisation de la couche limite au niveau du sol qui intègre une longueur de rugosité.

Pour ce premier calcul, nous avons choisi de nous focaliser sur la zone du centre-ville. Avec de telles dimensions, on peut écarter 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.

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. 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.

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, 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 adapté une loi puissance qui passe par le point de coordonnées [9.1m/s,100m]. La puissance obtenue est cohérente pour une atmosphère neutre et une vitesse proche du sol inférieure à 6 m/s. On pourrait également se baser sur la hauteur de couche limite atmosphérique fournie dans les données AROME pour corriger cette loi.

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 couvert. Il existe 6 classes de stabilités, caractérisées par l'intensité de la turbulence. 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. 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 atmosphérique. Ces boîtes, appelées boîtes de Mann, sont calculées pour une atmosphère neutre et une longueur rugueuse représentative d'un environnement urbain dense.

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. 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).

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. 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.

Estimation de la trajectoire

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. 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. On a cherché 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 a tracé 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). 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.

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. 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.

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.

Pour une comparaison plus quantitative, nous avons également estimé l'altitude du panache. Après environ 1h de temps physique simulé, la visualisation de l'altitude du panache en fonction de la distance au point d'injection des fumées confirme les observations qualitatives réalisées précédemment en montrant une trajectoire assez rapidement quasi-horizontale. 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 pompiers. Nous attribuons cette surestimation à la valeur de puissance de l'incendie que nous avons sélectionné pour ce premier calcul (puissance maximale). Or cette puissance n'a été atteinte que pour une durée limitée comparativement à la durée totale de l'incendie. Nous avons donc réalisé le même calcul mais cette fois-ci en dimensionnant le terme source pour une puissance moyenne de l'incendie. Afin de nous affranchir de la valeur de l'isocontour choisi pour Z, nous avons également adapté une méthode de calcul de trajectoire basée sur le maximum du gradient de Z et utilisé celle-ci pour valider nos résultats précédents et estimer la nouvelle altitude du panache à cette puissance moyenne. Cette fois-ci, l'altitude maximale obtenue (d'environ 475m) est tout à fait cohérente avec les observations des pompiers.

B. Analyses non ciblées et multi-résidus de la pollution chimique émise par voie atmosphérique

Dans cette partie du projet, l'accent a été mis sur une recherche non ciblée des molécules émises lors de l'incendie du 25-26 Septembre 2019 dans des échantillons de suies et d'air prélevés dans les jours qui ont suivi l'incendie. Il s'agit donc de mettre en œuvre des méthodes analytiques puissantes pour détecter des molécules réglementées mais également des molécules qui ne sont pas attendues *a priori* et potentiellement nouvelles, pour une recherche plus fine dans l'environnement. Ces molécules ne peuvent pas être détectées actuellement par les méthodes d'analyses ciblées, qui recherchent pour l'essentiel quelques familles de molécules déjà connues en pollution environnementale.

A cette étape de l'étude, il faut noter qu'aucune estimation des quantités n'a été réalisée, mais l'effort a porté sur une identification de nouvelles molécules potentiellement marqueurs de l'incendie.

Plusieurs types d'échantillons ont été récoltés dans les jours qui ont suivi l'incendie:

- des échantillons de suies (dépôts carbonés) récoltés sur des lingettes de précision et sur des écouvillons stériles, des résidus carbonés récupérés directement sur le sol ainsi que des suies en suspension dans de l'eau,
- des prélèvements passifs d'air avec piège sur phase solide. Les prélèvements ont été placés dans des endroits jugés stratégiques. Les molécules présentes dans l'air vont se fixer sur la phase selon leur affinité avec celle-ci. Les molécules d'intérêt sont ensuite transférées directement dans le chromatographe sur une unité de thermodésorption.

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

Les analyses de suies effectuées par le laboratoire COBRA par FTICR-MS ont mis en évidence des spectres de masse extrêmement complexes, montrant une grande diversité de familles moléculaires, incluant la présence de nombreux sels de sodium, potassium et calcium en accord avec les analyses de chromatographie ionique réalisées en amont. La présence de ces sels est peu commune en comparaison des suies issues de combustion d'hydrocarbures.

Parmi les formules moléculaires attribuées, se trouve une petite proportion de composés hautement condensés, ces composés pouvant être hypothétiquement liés à une pyrolyse ou combustion. Parmi ces composés se trouvent des Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques (HAP) oxygénés et azotés, espèces peu étudiées en analyse ciblée réglementaire. Cependant, il est difficile de relier ces composés à l'incendie car pouvant être produits par la combustion de nombreux matériaux. D'autres familles de molécules ont été identifiées pour ces échantillons (acides gras, phtalates...) ; bien que particulièrement abondantes, elles ne

peuvent pas non plus être reliées uniquement à l'incendie du 25-26 Septembre 2019 de par leur présence déjà avérée dans l'environnement de l'agglomération rouennaise. Étonnamment, peu de composés soufrés ont été trouvés avec ce type d'analyse, sachant que d'après les fiches de sécurité fournies par Lubrizol après l'incendie, de nombreux produits comme les additifs de lubrifiants contenaient du soufre et du phosphore. Un traitement des données plus approfondi pourrait permettre de caractériser des molécules avec du soufre ou du phosphore. De plus, les structures de nombreuses molécules n'ont pas pu à ce jour être complètement élucidées. D'autres méthodes d'ionisation vont être mises en œuvre afin de caractériser au mieux ces échantillons très complexes.

Les analyses réalisées en GC×GC-Orbitrap au laboratoire SMS sont complémentaires des analyses présentées précédemment. Deux stratégies ont été mises en œuvre pour caractériser les molécules potentiellement liées à l'accident : les recherches des molécules présentes dans les stocks Lubrizol et la proposition d'hypothèses de structures des molécules détectées. Les résultats des échantillons prélevés ont été comparés avec ceux de suies de référence dont on considèrera qu'elles sont caractéristiques d'un bruit de fond de pollution urbaine. Les résultats de l'analyse des suies montrent de façon évidente la forte présence d'hydrocarbures linéaires et/ou ramifiés, de formule brute C_nH_{2n+2} , dans les échantillons. L'intensité des pics obtenus est élevée, ce qui est en accord avec la nature des produits stockés sur les sites Lubrizol et Normandie Logistique, où le produit le plus abondant ayant brûlé est de l'huile minérale. Quelques hydrocarbures aromatiques (HA) monocycliques (aussi appelés alkyl benzènes) sont retrouvés. Les HAP sont également présents dans les échantillons de suies liés à l'accident. Seul l'anthracène est détecté à des teneurs beaucoup plus élevées dans les échantillons mais il ne pourra pas être utilisé comme marqueur de l'incendie dans la mesure où il est présent de manière récurrente dans l'environnement : il est émis par diverses sources (chauffage, voiture...). En ce qui concerne les hypothèses de structure, une dizaine de molécules intéressantes se dégagent des analyses de suies tels que des dérivés azotés (morpholines, ...) et phosphorés. 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. Cependant beaucoup de composés n'ont pu être identifiés avec un degré de confiance suffisant pour poser des hypothèses fiables sur leur structure chimique. Le travail d'identification est toujours en cours.

Par la suite, d'autres échantillons de suie seront analysés afin de dégager des marqueurs communs entre les échantillons de suies. En complément, l'analyse de suies issues de la combustion contrôlée en laboratoire de produits proches structuralement de ceux produits par 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, permettant ainsi de conforter les hypothèses sur la structure des composés possiblement identifiés.

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

Les analyses ont été réalisées au laboratoire SMS, avec l'appareil GC×GC – Orbitrap, équipé d'une unité de thermodésorption pour les analyses d'air. Comme précédemment des analyses non-ciblées ont été menées. Afin de caractériser les molécules émises lors de l'incendie et les différencier du bruit de fond urbain, des prélèvements d'air ont été réalisés sur les mêmes lieux en 2021. Les résultats obtenus ont été comparés avec le rapport d'AtmoNormandie numéro 2520-001, publié en mai 2021 : « Incendie Lubrizol et NL : bilan des mesures de polluants et d'odeurs dans l'air ambiant et les retombées atmosphériques ».

A l'instar des suies, les hydrocarbures sont les molécules les plus abondantes dans les échantillons d'air. Il semble cohérent d'affirmer que tous les hydrocarbures n'ont pas brûlé lors de l'incendie et qu'une grande partie a été vaporisée dans l'air ambiant. De la même manière, des hydrocarbures aromatiques tels que le benzène, le naphthalène (présent dans les stocks de Lubrizol et/ou NL) ont été détectés, cependant ces molécules sont également présentes dans les blancs et les analyses réalisées en 2021, donc dans le bruit de fond de pollution urbaine. De nombreuses molécules oxygénées, azotées et soufrées ont été détectées dans les échantillons. Certaines d'entre elles se révèlent particulières et pourraient potentiellement être liées à l'incendie. Nous retrouvons notamment de nombreux thiophènes, qui ont une forte présence organoleptique. Ces molécules ont été détectées en 2019 et pas, ou peu, lors de la campagne de prélèvement d'air réalisée en avril 2021. Ces résultats seront à confirmer lors de prochaines campagnes de prélèvements.

La comparaison avec les résultats d'AtmoNormandie montre d'ailleurs 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 réalisées non-ciblées ont montré la présence de di-tert-butyl disulphide, di-tert-butyl trisulphide ainsi que de tetrahydrothiophène.

C. Mise en place d'un suivi environnemental

L'objectif était la mise en place des stations de mesures sur des hydrosystèmes afin de suivre la propagation dans l'environnement des marqueurs physico-chimiques de l'incendie puis l'extraction de deux carottes sédimentaires afin de caractériser l'évolution temporelle de la contamination dans l'agglomération et ainsi définir le bruit de fond urbain. Les sites ont été installés mais les carottes sédimentaires seront finalement extraites en phase 2 suite à une avarie matérielle.

L'objectif était également de contextualiser les données de qualité des eaux acquises dans la phase de gestion de crise puis de gestion sanitaire renforcée par des données environnementales. L'analyse a montré la prévalence des phénomènes de restitution de contaminants communs, ne pouvant pas être exclusivement associés à l'incendie, lors des phénomènes de ruissellement importants consécutifs aux pluies efficaces. Aussi, les restitutions de contaminants les plus importantes n'ont pas eu lieu dans les

jours qui ont suivi l'incendie mais lors de grands épisodes pluvieux en novembre 2020 et février 2021 avec des anomalies et dépassements de valeur réglementaire limite principalement pour les eaux brutes souterraines à Fontaine-sous-Préaux et Maromme. Ceci met en évidence le fonctionnement de réservoir tampon de l'environnement qui stocke les contaminants pour ensuite les restituer à la faveur d'épisodes particuliers en lien avec la pluviométrie, la turbidité et le comportement karstique des aquifères locaux.

D. Impact sur la teneur en métaux et HAP dans les cheveux

Les conditions environnementales des milieux de vie imprègnent les matrices biologiques humaines (lait, sang, urines, peau, cheveux, cuticules, ...). Ainsi, le dosage de contaminants dans ces matrices constitue un témoin de la qualité de l'environnement dans lequel vivent les personnes. Cependant leur durée de vie sont très différentes d'une part selon les matrices et d'autre part selon les contaminants. Aussi, la demi-vie de nombreux contaminants 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, 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. De plus, on dispose de bases de données sur la présence d'HAP+métabolites et métaux dans les cheveux permettant une comparaison des niveaux d'imprégnation.

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

6 métaux ont été dosés : cadmium, chrome, mercure, plomb, vanadium et zinc ainsi que 16 HAP et leurs métabolites. 13 personnes ont été incluses dans l'étude, la survenue de la pandémie ayant mis un coup d'arrêt aux consultations dans le centre de prélèvement. Chaque cheveu a été segmenté en une partie proximale (4 premiers centimètres) puis distale (4 derniers centimètres) pour réaliser une comparaison avant et après incendie. Cette segmentation n'a pas été permise pour les métaux (exceptée la patiente 13) et pour la patiente 8 pour les HAP.

Les dosages de HAP et de leurs produits mères ne montrent pas d'exposition significative, et les comparaisons entre les analyses de la partie distale et de la partie proximale ne montrent pas d'évolution homogène, qui aurait pu ainsi marquer une exposition plus importante sur la période post-incendie par rapport à la période témoin antérieure à la date de l'incendie. Aucune tendance franche ne se dégage donc de nos résultats, les évolutions étant parfois discordantes entre deux composés.

L'analyse des métaux n'a pas pu, pour des raisons techniques de masse de cheveux disponibles, 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 issus d'une étude menée dans la région du Havre.

2) Diagnostics comportementaux et impacts sociaux

Dans cette première phase, 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.

Il convient de noter que 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.

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

La première enquête porte sur la chronologie de la crise vécue par la population en insistant sur différents items : la connaissance initiale des risques, la réception de l'alerte, pratiques de recherche d'information durant la crise, les prises de décision et leur évolution au cours de l'alerte, l'état émotionnel au cours de la journée, les moyens de communication employés, etc. Réalisée sur

un échantillon représentatif de la population (1870 personnes, dont 1639 résidant dans la Métropole Rouen Normandie), cette enquête fait ressortir quelques points marquants :

- Près de 20 % des répondants ont été informés de l'incendie avant 6 heure (dont les ¾ en entendant les explosions)
- Près de 80 % avant 8 heure (dont les ¾ par un proche, et la radio)
- Seul 4% ont été alerté par l'alerte sirène
- Au pic de l'événement, entre 8:00 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.

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.

B. La perception des risques industriels chez les jeunes de l'agglomération rouennaise suite à l'incendie de Lubrizol-Normandie Logistique

La seconde enquête menée par une équipe de chercheurs 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

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.

Les 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). Les sentiments d'anxiété (peur et inquiétude) dominent en septembre 2019, la colère et la tristesse sont également chacune déclarées fortes par 30% des élèves. Neuf mois plus tard, en juin 2020, la colère et l'inquiétude restent fortes ou intenses pour 1/3 des élèves, même si elle se sont néanmoins atténuées en juin. Presque 40% ont eu peur sur le moment que le nuage les rende malade et 20% ont été plus stressés que d'habitude. On a donc les composants d'un choc émotionnel qui a désorganisé les élèves, avec moins de 15% qui ont pu mettre en mots leurs sentiments, rapportant un état de malaise peu identifié et régulé. L'incendie a ainsi ponctuellement induit une sidération émotionnelle.

Pour tous, la famille a joué un rôle important en termes d'alerte et de lieu protecteur, les parents ont en particulier été attentifs aux réactions de leur jeune et ont été à leur écoute. 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.

Une étude portant sur la gestion de la crise dans des collèges de la métropole a montré un sentiment d'abandon voire de détresse des personnels face aux incertitudes. Le caractère traumatique de l'événement se caractérise par une hypermnésie des événements. L'enchaînement avec la crise COVID porte également question sur la manière dont les professionnels de l'éducation perçoivent et gèrent les effets de l'incertitude sur leurs prises de décision en situation de crise.

C. Les médecins généralistes face aux événements de Lubrizol – Normandie Logistique

La troisième enquête a été menée conjointement par des sociologues et des médecins sous la forme d'entretiens avec des médecins généralistes afin de mettre en évidence leur perception et leur gestion de la crise dans une situation d'incertitude accentuée.

Les 19 médecins interrogés ont pour la plupart été confrontés à la vue du nuage et/ou à ses retombées odorantes. Ils 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. 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. L'expérience personnelle du médecin devient alors une des premières sources informationnelles. Cependant, le manque de savoir scientifiquement étayé s'impose comme le principal défi et avec lui la faiblesse des informations institutionnelles communiquées aux médecins : « *C'était le silence* ». Face à l'incertitude dans laquelle patients et médecins se trouvent plongés, ces derniers ne se limitent pas à des réponses strictement médicales mais ont parfois eu recours à des réponses très pragmatiques, relevant du sens commun : 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. Les plaintes des patients 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.

Les médecins 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. Ces expériences 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 ».

3) Conclusions et perspectives

- Les simulations aux grandes échelles pour étudier la propagation du panache sont satisfaisantes dans la mesure où les analyses tant qualitatives que quantitatives semblent concorder avec les observations réalisées le jour de l'accident.
- Il est prévu de faire varier dans le temps le terme source ou encore des conditions de vent puis d'estimer les capacités prédictives du modèle en termes de concentration de contaminants en confrontant notre calcul à des mesures expérimentales.
- Les analyses de suies (dépôts carbonés) ont montré la très grande diversité des familles de molécules adsorbées sur le matériau solide, avec une proportion inhabituelle de sels de sodium, potassium, calcium, et de nombreuses molécules oxygénées.
- La méthode d'analyse des échantillons d'air 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 évidence. Ces molécules sont susceptibles d'être liées à l'accident et pourraient potentiellement, pour certaines, être des marqueurs de l'accident.
- Si certaines classes de molécules non recherchées dans les analyses réglementaires ont pu être identifiées, un gros travail reste encore à effectuer, compte tenu de la complexité des échantillons. Par ailleurs, il s'agira de différencier les molécules déjà présentes dans le bruit de fond urbain de celles directement liées au processus de combustion durant l'incendie.
- Le suivi de la restitution des contaminants dans l'environnement lors de la phase de gestion de crise montre que ceux-ci sont mobilisés au sein de l'hydrosystème à la faveur de processus de transfert hydrosédimentaire complexe liés à la nature karstique du sous-sol. Ceci illustre une imprégnation du milieu qui sera suivie dans le cadre de la phase 2.
- L'étude sur la contamination de cheveux par des métaux et HAP, 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.
- Etat d'impréparation de la population pour gérer matériellement et psychologiquement un accident industriel : grande majorité des personnes prévenue par un proche et moins d'un tiers par leur employeur, consignes de sécurité appliquée par une petite majorité de la population enquêtée, absence d'intérêt face l'information des conduites à adopter en cas d'alerte notamment chez les jeunes, absence également de consigne et d'information en direction des médecins.
- 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) aussi bien pour la population en général que pour les acteurs en situation de responsabilité (médecins, parents, corps professoral et administratif).
- Responsabilisation spontanée des populations générant des dysfonctionnements (réflexes problématiques pendant l'événement, stress, colère/défiante) mais les poussant aussi 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.).