



Evaluation des retombées atmosphériques des éléments traces métalliques (ETM) et des dioxines et furanes (PCDD/F) par analyse des lichens à proximité d'un site industriel

Etude de faisabilité de la mise en œuvre d'une méthode de biosurveillance suivant la norme NF X43-904

CONDITIONS DE DIFFUSION

Diffusion libre pour une réutilisation ultérieure des données dans les conditions ci-dessous :

- Les données produites par ATMO Grand Est sont accessibles à tous sous licence libre «**ODbL v1.0**».
- Sur demande, ATMO Grand Est met à disposition les caractéristiques des techniques de mesures et des méthodes d'exploitation des données mises en œuvre ainsi que les normes d'environnement en vigueur et des guides méthodologiques nationaux.
- ATMO Grand Est peut rediffuser ce document à d'autres destinataires.
- Rapport non rediffusé en cas de modification ultérieure des données.

PERSONNES EN CHARGE DU DOSSIER

Rédaction : *Martin Nathan, stagiaire Master 2*

Relecture : *Robellet Pierre, chargé d'études – Maitre de stage*
Pallares Cyril, responsable « Unité Surveillance Réglementaire et Permanente »

Approbation : *Rivière Emmanuel, directeur délégué*

Référence du modèle de rapport : COM-FE-001_5

Référence du projet : MSP 00432

Référence du rapport : SURV-EN-300_1

Date de publication : 15/01/2020

ATMO Grand Est

Espace Européen de l'Entreprise – 5 rue de Madrid – 67300 Schiltigheim

Tél : 03 88 19 26 66 - Fax : 03 88 19 26 67

Mail : contact@atmo-grandest.eu

SOMMAIRE

LISTE DES ACRONYMES ET SIGLES UTILISÉS	4
RÉSUMÉ.....	5
1. CADRE ET OBJECTIF DE L'ÉTUDE.....	6
2. LA BIOSURVEILLANCE DE L'AIR PAR LES LICHENS.....	7
2.1. LA BIOSURVEILLANCE VÉGÉTALE ET FONGIQUE DE L'AIR	7
2.2. LES LICHENS.....	9
3. MÉTHODES ET MOYENS MIS EN ŒUVRE	12
3.1. POLLUANTS MÉSURÉS.....	13
3.2. ZONE D'ÉTUDE.....	18
3.3. ÉMISSIONS.....	20
3.4. STRATÉGIE D'ÉCHANTILLONNAGE	21
3.5. REPÉRAGE DES STATIONS.....	24
3.6. CHOIX DES STATIONS	25
3.7. PROTOCOLE	28
3.8. LIMITES DE L'ÉTUDE.....	30
4. INTERPRÉTATION DES RÉSULTATS	33
4.1. CONCENTRATIONS SUR LA ZONE D'ÉTUDE	34
4.2. CONCENTRATIONS PAR POLLUANTS.....	43
4.3. CONCENTRATIONS PAR STATIONS.....	55
4.4. COMPARAISON AVEC L'ÉTUDE RÉALISÉE AUTOUR DE LA CENTRALE THERMIQUE DE BLÉNOD-LÈS-PONT-A-MOUSSON EN 2014	56
4.5. GRADIENT DE CONCENTRATION	58
4.6. RELATIONS ENTRE LES CONCENTRATIONS EN ÉLÉMENTS TRACES MÉTALLIQUES	61
4.7. ANALYSE FACTORIELLE (ACP).....	62
5. CONCLUSION ET PERSPECTIVES.....	64
5.1. LES ÉLÉMENTS TRACES MÉTALLIQUES.....	64

5.2. LES DIOXINES ET FURANES	65
5.3. PERSPECTIVES.....	65
6. RÉFÉRENCES.....	66

LISTE DES ACRONYMES ET SIGLES UTILISÉS

AASQA : Association Agréée de Surveillance de la Qualité de l’Air

ACP : Analyse en Composantes Principales

AFNOR : Association Française de Normalisation

BRAMM : Biosurveillance des Retombées Atmosphériques Métalliques par les Mousses

CITEPA : Centre Interprofessionnel Technique d’Études de la Pollution Atmosphérique

ETM : Éléments Traces Métalliques

ICPE : Installations Classées pour la Protection de l’Environnement

INERIS : Institut National de l’Environnement industriel et des RISques

MS : Matière Sèche

OMS : Organisation Mondiale de la Santé

OTAN : Organisation du Traité de l’Atlantique Nord

PCDD/F : PolyChloroDibenzoDioxine / PolyChloroDibenzoFurane (dioxines et furanes)

TEF : Facteur d’Équivalence de Toxicité

TEQ : Quantité Équivalente Toxique

X. parietina : *Xanthoria parietina*

RÉSUMÉ

La biosurveillance végétale et fongique de la qualité de l'air permet d'estimer l'impact des pollutions atmosphériques sur les organismes et les écosystèmes. L'une de ces méthodes, la bioaccumulation, consiste à mesurer les teneurs en polluants accumulées par certains organismes. Dans ce sens, la norme NF X43-904 propose un protocole d'échantillonnage et de prélèvement de lichens épiphytes et offre un cadre de référence pour mesurer les concentrations en contaminants inorganiques et/ou organiques dans ces organismes.

Les lichens ou champignons lichénisés, étant donné leurs particularités anatomiques, sont bien adaptés pour l'étude des polluants atmosphériques, aussi bien gazeux que particuliers.

Dans le cadre du Programme Régional de Surveillance de la Qualité de l'Air (2017-2021) (actions 1, 2 et 28) et conformément à la stratégie de développement de la biosurveillance de la qualité de l'air (SURV-EN-079), l'année 2019 a été consacrée à réaliser une étude de faisabilité de l'évaluation de la qualité de l'air par bioaccumulation.

L'étude s'est déroulée autour de l'usine de Saint-Gobain PAM, située sur les communes de Pont-à-Mousson et de Blénod-lès-Pont-à-Mousson. Cet établissement se trouve dans le département de la Meurthe-et-Moselle et produit notamment des pièces de voiries et des canalisations en fonte ductile.

1. CADRE ET OBJECTIF DE L'ÉTUDE

La stratégie de surveillance définie dans le Programme Régional de Surveillance de la Qualité de l'Air d'ATMO Grand Est 2017/2021 a inscrit le recours à la biosurveillance dans plusieurs actions :

- Axe A (Répondre aux besoins d'observation) :
 - Action 1 – Dans le cadre de cette action d'optimisation des outils de surveillance de la qualité de l'air, la biosurveillance sera utilisée en complément des moyens d'évaluation métrologiques de la qualité de l'air.
 - Action 2 – Concernant la végétation, ATMO Grand Est affinera la connaissance de l'exposition des écosystèmes aux polluants par les méthodes alternatives de biosurveillance (bioindication, biointégration et bioaccumulation).
- Axe D (Développer une communication mobilisatrice et innovante) :
 - Action 28 – En partenariat avec le monde de l'éducation et des collectivités, la biosurveillance sera utilisée comme un vecteur de sensibilisation à la pollution atmosphérique.

La biosurveillance végétale et fongique de l'air évalue les effets des pollutions atmosphériques sur un ou des organisme(s). Elle implique l'utilisation d'organismes vivants tels que des mousses ou des lichens pour mettre en évidence les impacts de ces pollutions sur l'environnement. Plusieurs méthodes existent en biosurveillance de l'air, à différents niveaux d'organisation du vivant. Lorsque des réactions physiologiques au sens large sont observées, on parle alors de biomarquage (échelle infra-individuelle), de bioindication (échelle individuelle) ou de biointégration (échelle de la communauté biologique). Si les organismes servent de matrice pour la mesure des teneurs en polluants, il s'agit alors de la bioaccumulation.

Avec l'objectif d'évaluer l'opportunité de réaliser un diagnostic de qualité de l'air à l'aide la biosurveillance, ATMO Grand Est a réalisé en 2018 une étude de faisabilité de la mise en œuvre d'une méthode normalisée de biointégration (norme NF EN 16413). Sur le territoire de 5 communes de la plaine d'Alsace (Haut-Rhin), la qualité de l'air globale a ainsi été estimé à l'aide d'indicateurs lichéniques.

Suivant cet objectif, en 2019, ATMO Grand Est a souhaitée évaluer la faisabilité de la mise en œuvre d'une étude de bioaccumulation par les lichens, à proximité d'un site industriel en Meurthe-et-Moselle. Les travaux se sont appuyés sur la norme NF X43-904 : « Biosurveillance de l'air – Biosurveillance passive de la qualité de l'air à l'aide de lichens autochtones : de la récolte à la préparation des échantillons » (AFNOR, 2013).

La norme a été utilisée comme support méthodologique pour la stratégie d'échantillonnage, le protocole de prélèvements et le traitement des données mesurées. Le but de l'étude a été de déterminer l'impact du site industriel sur les retombées atmosphériques accumulées par les lichens, dans l'environnement proche de l'établissement.

2. LA BIOSURVEILLANCE DE L'AIR PAR LES LICHENS

L'étude de faisabilité de la mise en œuvre de la bioaccumulation s'est appuyée sur la norme NF X43-904, publiée en 2013, par l'AFNOR. La norme précise la démarche méthodologique à suivre, de la stratégie d'échantillonnage jusqu'à l'envoi des échantillons au laboratoire d'analyse. Elle permet d'avoir une méthode objective et reproductible pour toutes les études réalisées et l'obtention de résultats comparables.

2.1. LA BIOSURVEILLANCE VÉGÉTALE ET FONGIQUE DE L'AIR

2.1.1. Définition de la biosurveillance

La biosurveillance est « l'utilisation des réponses à tous niveaux d'organisation biologique (moléculaire, biochimique, cellulaire, physiologique, tissulaire, morphologique, écologique) d'un organisme ou d'un ensemble d'organismes pour prévoir et/ou révéler une altération de l'environnement et pour en suivre son évolution (Garrec & Van Haluwyn, 2002).

La biosurveillance végétale et fongique est une méthode complémentaire aux mesures physico-chimiques. Elle permet de voir l'impact et l'évolution des pollutions atmosphériques sur les organismes et les écosystèmes (Van Haluwyn, 2009).

2.1.2. Concepts utilisés pour la mise en évidence de pollutions

Selon les végétaux, les polluants et les objectifs, différents concepts peuvent être utilisés pour mettre évidence les pollutions atmosphériques (Tableau 1).

Tableau 1 : Concepts de la biosurveillance de l'air (Van Haluwyn, 2009).

Concept	Approche	Niveau d'organisation biologique	Impacts biologiques
Biomarqueage	Moléculaire	Infra-individuel	Moléculaires, biochimiques, cellulaires ou physiologiques
Bioindication	Ecologique	Individuel	Physiologiques, tissulaires ou morphologiques
Biointégration	Ecologique	Supra-individuel	Populationnels ou communautaires
Bioaccumulation	Chimique	Individuel	

Ces concepts sont au nombre de 4 :

- Le biomarquage se base sur l'utilisation de biomarqueurs qui indiquent l'influence du milieu environnant sur les différentes fonctions biologiques d'un organisme. Il peut s'agir de modifications au niveau des enzymes, de la physiologie ou de la génétique.
- La bioindication concerne l'observation d'altérations visibles (physiologiques, morphologiques ou tissulaires) d'un organisme à une pollution. L'étude de l'apparition des nécroses sur des plants de tabac, à la suite de concentrations élevées en ozone dans l'air ambiant, est un exemple de ce concept.
- La biointégration correspond à l'étude des modifications des coefficients de présence, d'absence et d'abondance des espèces au sein de populations ou de communautés.
- La bioaccumulation consiste à mesurer les teneurs en polluants accumulées par des organismes soumis à une pollution à plus ou moins long terme.

2.1.3. Approches passive et active de la biosurveillance

Deux approches différentes peuvent être utilisées dans le cadre d'étude de biosurveillance de l'air :

- La biosurveillance passive ou *in situ* consiste à étudier l'impact des pollutions atmosphériques sur des organismes présents naturellement dans l'environnement.
- La biosurveillance active a pour but d'observer les effets de la pollution sur des organismes introduits dans une zone d'étude. Les organismes utilisés sont cultivés dans des conditions contrôlées ou prélevés depuis des lieux non-pollués.

2.2. LES LICHENS

Etudiés depuis de très nombreuses années et notamment depuis 1866 par le finois Nylander, les lichens sont des organismes symbiotiques entre un champignon (mycobionte) et une algue et/ou une cyanobactérie (photobionte) (Figure 1).

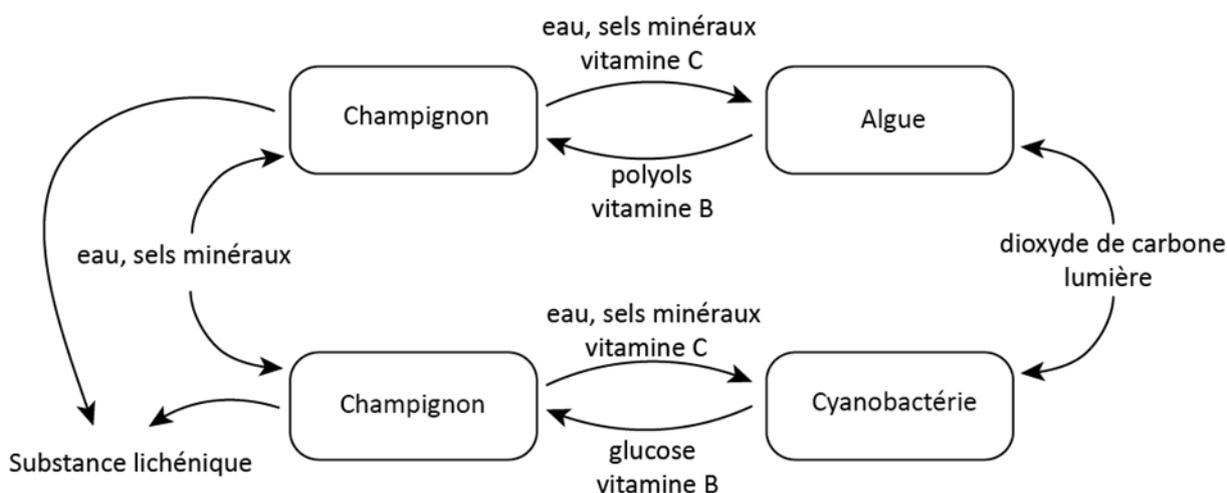


Figure 1 : Echanges réalisés entre le mycobionte et le photobionte d'un lichen.

Le champignon (mycobionte) a un rôle de protection, de support au substrat et apporte l'eau et les sels minéraux. L'algue verte réalise quant à elle la photosynthèse. Lorsqu'il y a une cyanobactérie dans l'association, celle-ci effectue ce processus mais capte aussi l'azote atmosphérique. Les lichens sont classés dans le règne des *Fungi*, et sont appelés « champignons lichénisés ». Il existe dans le monde, plus de 18 000 espèces de lichens (Feurerer & Hawksworth, 2007).

2.2.1. Diversité au sein de ce groupe

Les lichens sont des organismes très diversifiés à de nombreux niveaux. On peut les retrouver sur différents substrats tels que des roches, de la terre, des arbres ou encore des substrats artificiels. Cette diversité est présente :

- Par le type de champignon symbiotique (ascomycète ou basidiomycète) ;
- Par le type d'algue et/ou de cyanobactérie ;
- Par le mode de reproduction (multiplication végétative, reproduction sexuée ou asexuée) ;
- Par leur anatomie interne (homéomère ou hétéromère) ;
- Par les diverses structures produites (poils, apothécies, rhizines, lirelles, etc.) ;
- Etc.

Les lichens n'ont pas de racines, de feuilles ou de tiges mais un appareil végétatif que l'on appelle un thalle. Celui-ci peut se distinguer par ses formes et ses couleurs variées. On peut distinguer plusieurs types de thalles : complexes, crustacés, foliacés, fruticuleux, gélatineux, lépreux et squamuleux (Figure 2, Annexe 1).



Figure 2 : (De gauche à droite) Lichens à thalle crustacé (*Lecanora* sp.), foliacé (*Physcia aipolia*) et fruticuleux (*Evernia prunastri*).

2.2.2. Indicateurs de la qualité de l'air

Les lichens sont de nos jours utilisés couramment pour des études de biosurveillance de l'air. Les espèces lichéniques ont comme principale interface l'atmosphère. Elles échangent les composés dont elles ont besoin tel que l'oxygène mais aussi ceux dont elles sont sensibles (SO₂, NO_x, etc.).

Les lichens ont une grande dépendance biologique à l'air due à l'absence de cuticule de protection, de système racinaire ou de système d'excrétion. De plus, ils sont des organismes immobiles et actifs une grande partie de l'année. Les lichens sont ainsi de très bons témoins de la qualité de l'air qui règne dans leurs environnements.

La grande diversité chez les lichens a pour conséquence que toutes les espèces n'ont pas le même niveau de sensibilité à certains polluants ou à la pollution globale de l'atmosphère. On parle alors d'espèces poléotolérantes ou poléosensibles. Les lichens les plus utilisés en biosurveillance sont les lichens épiphytes, qui se développent sur l'écorce des arbres.

Ces différences ont pu aboutir à la création d'indices lichéniques de qualité de l'air (norme NF EN 16413) mais également d'échelles de sensibilité pour le dioxyde de soufre ou l'azote (Van Haluwyn & Lerond, 1986 et Wirth, 2010).

2.2.3. Bioaccumulation par les lichens

Absorbant l'ensemble des composés de l'air, les lichens sont des organismes bioaccumulateurs. L'absorption des polluants atmosphériques dans ces organismes se fait lors de dépôts particulaires ou gazeux secs ou lors de dépôts humides par les précipitations. La bioaccumulation a ainsi pour but de mesurer les teneurs en polluants inorganiques et/ou organiques¹ bioaccumulées par les lichens.

¹ Un polluant organique est un composé possédant au minimum du carbone et de l'hydrogène. On retrouve par exemple les pesticides, les PCB, les HAP ou encore les dioxines et furanes. Un polluant inorganique est un composé métallique qui est à l'état de trace dans l'environnement.

Les mécanismes qui permettent aux lichens d'accumuler des polluants (le piégeage particulaire, l'adsorption extracellulaire et intracellulaire) ne sont pas encore tout à fait démontrés. A contrario, des recherches ont montré que les quantités de polluants dans les lichens ont des relations linéaires avec les concentrations présentes dans l'air. Plus le polluant est présent dans l'atmosphère, plus il a tendance à s'accumuler dans les lichens. Cependant, il est impossible à partir d'une mesure dans ces organismes de déterminer une teneur précise en polluant dans l'air (Agnan, 2013).

La bioaccumulation par les lichens est une méthode recommandée pour évaluer les dépôts atmosphériques autour d'un site industriel (INERIS, 2016).

3. MÉTHODES ET MOYENS MIS EN ŒUVRE

L'étude de bioaccumulation s'articule autour de 3 phases décrites dans la Figure 3 :

- Organisation et de planification
- Collecte des échantillons
- Exploitation et interprétation des résultats.

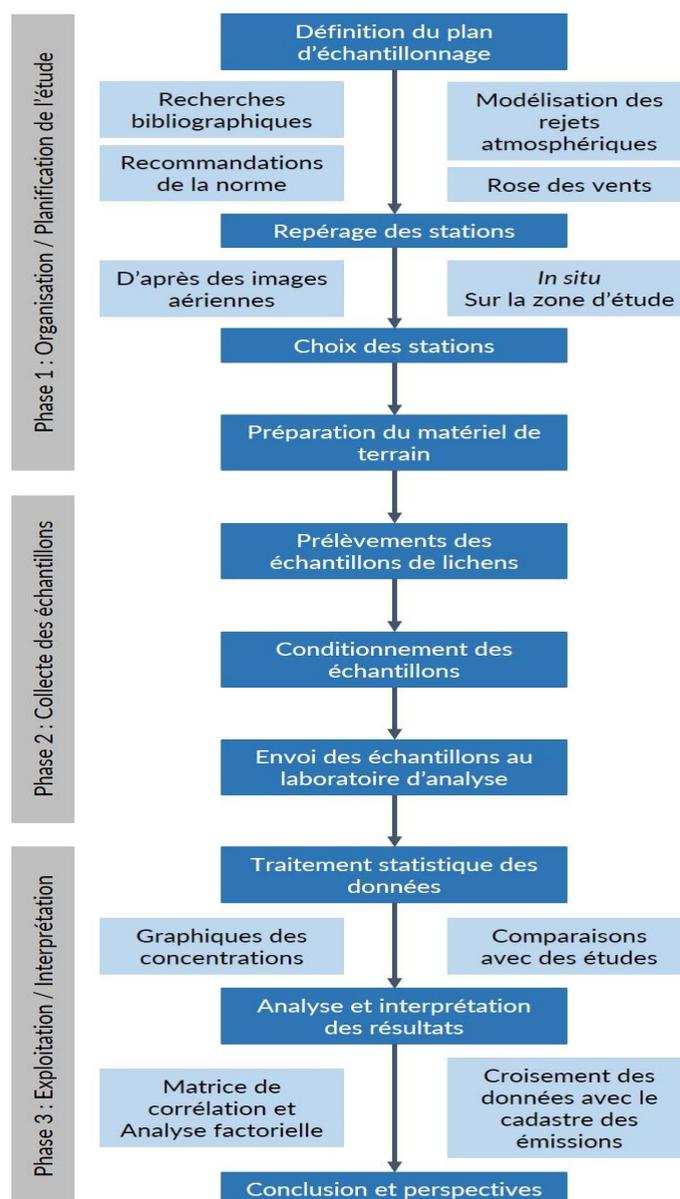


Figure 3 : Logigramme de l'étude.

3.1. POLLUANTS MÉSURÉS

Autour du site industriel, deux types de polluants ont été analysés. Il s'agit des éléments traces métalliques (ETM) et des dioxines et furanes (PCDD/F). Pour les besoins de l'étude, 9 métaux lourds ont été inventoriés : l'arsenic (As), le cadmium (Cd), le chrome (Cr), le cuivre (Cu), le mercure (Hg), le nickel (Ni), le plomb (Pb), le sélénium (Se) et le zinc (Zn).

3.1.1. Les éléments traces métalliques

Les éléments traces métalliques (ETM) sont généralement définis comme des métaux lourds, naturellement présents dans les sols à l'état de trace (moins de 1% de la composition totale du sol terrestre). Les ETM regroupent des composés réputés toxiques. Les 9 éléments inventoriés autour du site industriel sont considérés comme à risques pour la santé humaine.

Les émissions de métaux lourds dans l'air proviennent de sources naturelles et anthropiques diverses (Tableau 2). A proximité du site industriel, les sources naturelles d'émissions sont négligeables.

Tableau 2 : Principales sources d'émissions d'ETM dans l'air (Rausch de Traubenberg, 2013).

Sources naturelles	Sources anthropiques
Volcan : As, Cd, Cu, Hg, Ni, Pb, Zn	Extraction de minerais : As, Ni, Hg
Croûte terrestre : As, Cr, Cu, Ni	Métallurgie : As, Cd, Ni, Pb
Feux de forêts : Zn	Production d'énergie (combustion fossile et production d'énergie nucléaire) : As, Cd, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb, Zn
Végétation : As, Hg, Cd, Cu, Ni, Zn	Transport automobile, ferroviaire et aérien : As, Cd, Cr, Cu, Pb, Zn
Embruns marins : Ni, Se	Engrais et pesticides : As, Cd, Cu
	Incinération des déchets : Cd, Cu, Hg, Zn

Pour l'ensemble des ETM sauf le mercure, la dispersion dans l'air de ces polluants se fait par les particules fines auxquelles ils sont adsorbés. Le mercure est transporté sous forme gazeuse dans l'atmosphère. Plus la taille des particules est petite, plus celles-ci vont être transportées loin de la source d'émission. A l'inverse, des particules plus grosses vont principalement se déposer à proximité de la source d'émission.

Des métaux comme le cuivre ou le zinc sont essentiels pour certaines fonctions biologiques ; ce sont des oligo-éléments. Cependant, ils peuvent être toxiques à des concentrations élevées. D'autres éléments (cadmium, mercure, plomb) ne sont pas indispensables pour les organismes vivants et sont considérés comme toxiques à faibles doses.

Les ETM peuvent atteindre l'homme par inhalation ou ingestion de produits contaminés (Figure 4). Ils s'accumulent alors dans le corps humain et peuvent affecter le système nerveux, les fonctions rénales, hépatiques ou respiratoires. Le cadmium, l'arsenic, le nickel et le chrome sont reconnus comme cancérigènes. Ces polluants sont également biopersistants et détériorent les sols, les eaux de surface, les écosystèmes, etc.

Les données d'émissions par élément sont issues de l'inventaire des émissions d'ATMO grand Est pour l'année 2017 version 2019 (mettre site observatoire).

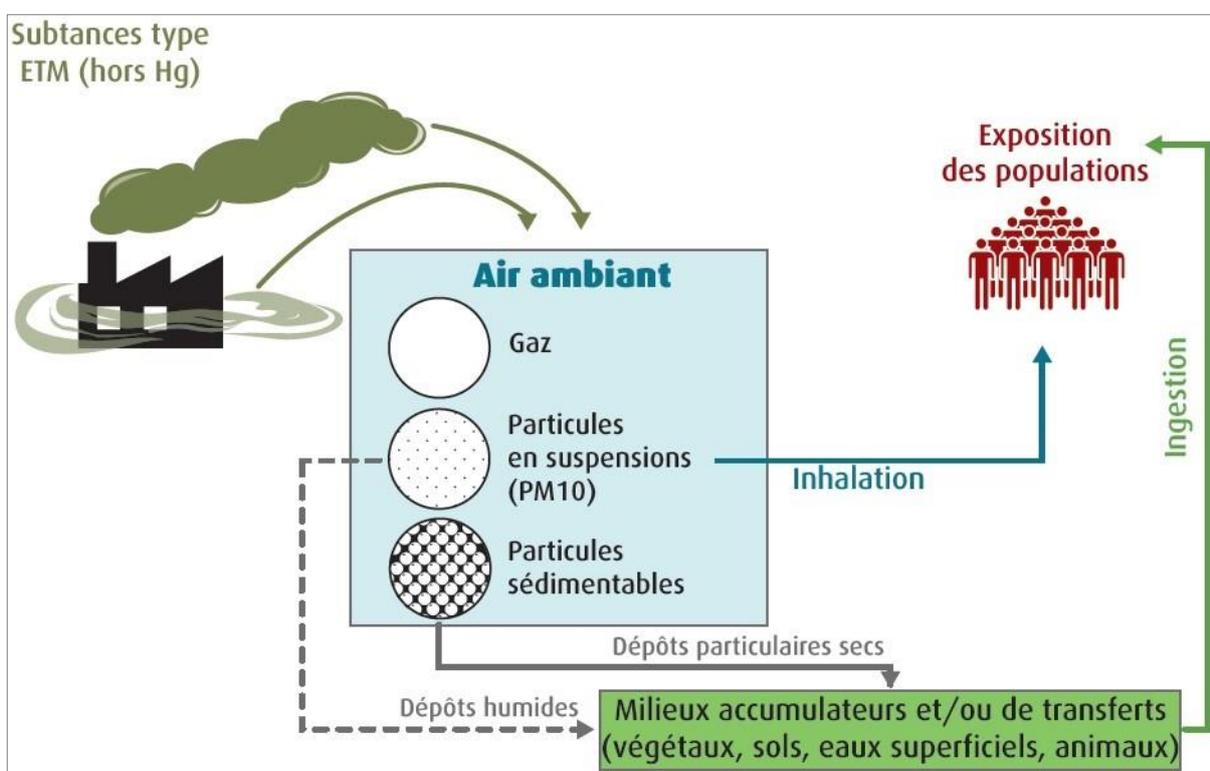


Figure 4 : Processus de transfert des ETM vers l'Homme (INERIS, 2016).

3.1.1.1. L'arsenic

Cet élément est le seul métalloïde² échantillonné autour de Saint-Gobain PAM. Naturellement présent dans la nature et notamment dans les roches, les sources naturelles d'émissions sont les feux de forêts, l'activité volcanique ou l'érosion des roches. Les rejets atmosphériques anthropiques proviennent majoritairement de la combustion de produits fossiles (charbons, pétroles, huiles) ou de la production de verre et de la métallurgie des métaux ferreux et non ferreux.

En 2017, dans la région Grand Est, 0,79 tonnes d'arsenic ont été émises dans l'air, avec comme principaux émetteurs : l'industrie manufacturière (46%), le secteur résidentiel (25%) et le transport routier (18%). Une exposition prolongée à l'arsenic par inhalation peut aboutir à l'apparition de lésions cutanées et de troubles digestifs, au développement de cancer des voies respiratoires et à une augmentation du risque de mortalité par accident cardiovasculaire.

3.1.1.2. Le cadmium

Ce métal est présent dans l'environnement en association avec le zinc, le plomb et le cuivre. Les sources d'émissions anthropiques sont majoritairement liées à l'industrie (production de zinc), à l'incinération des déchets et à la combustion de combustibles minéraux solides, de fioul lourd ou de biomasse.

Dans la région Grand Est, en 2017, l'industrie manufacturière (69%), le secteur résidentiel (15%) et la branche énergie (11%) ont été les trois secteurs les plus émetteurs (0,22 tonnes au total). Le cadmium est considéré comme un cancérigène pour l'Homme. L'absorption peut se faire par inhalation ou ingestion, avec un transport par le sang. Le cadmium s'accumule principalement dans le foie, les reins et les os.

3.1.1.3. Le chrome

Cet élément provient principalement des aciéries électriques et des fonderies de fonte. Le chrome est présent dans une grande partie de la croûte terrestre et en petites quantités. En 2017, 3,3 tonnes de chrome ont été émises dans l'air de la région Grand Est, avec 53% pour l'industrie manufacturière et 29% pour le secteur résidentiel. Le chrome hexavalent (Cr⁶⁺) est le plus dangereux des composés chromés et peut provoquer des irritations des muqueuses respiratoires ou des atteintes au système respiratoire.

3.1.1.4. Le cuivre

Cet ETM est produit de manière naturelle par les éruptions volcaniques, les décompositions végétales, les feux de forêts ou encore les aérosols marins. Les sources d'émissions anthropiques sont liées à l'industrie du cuivre et des métaux, l'industrie du bois, l'incinération des ordures ménagères, la fabrication de fertilisants ou la combustion de charbon, d'huile ou d'essence.

Le cuivre est parmi les métaux les plus employés à cause de ses propriétés physiques (conductivité électrique et thermique). En 2017, dans la région Grand Est, 23,43 tonnes de cuivre ont été émises dans l'atmosphère. Le transport routier (54%) et les autres transports (33%) en sont les principaux responsables. Le cuivre peut provoquer chez l'Homme, des irritations au niveau des voies aériennes, des troubles gastro-intestinaux ou une insuffisance hépatique.

² Les métalloïdes sont des éléments chimiques dont les propriétés sont intermédiaires entre celles des métaux et des non-métaux.

3.1.1.5. Le mercure

Les émissions naturelles de mercure dans l'atmosphère à l'échelle de la planète sont issues majoritairement des océans (52%), des feux de biomasse (13%) suivi des zones désertiques, métallifères et non-végétalisées. Les sources d'émissions anthropiques sont l'exploitation des minerais, la combustion des produits fossiles, les rejets industriels (industries chimiques, production de peintures, de batteries, etc.) et l'incinération de déchets.

Parmi les 0,63 tonnes de mercure émises dans l'air en 2017 sur la région du Grand Est, 79% provient de l'industrie manufacturière. Certains composés du mercure sont considérés comme des substances reprotoxiques et mutagènes. L'inhalation de vapeurs de mercure peut par exemple aboutir à des effets nocifs pour les systèmes nerveux, digestif et immunitaire, les poumons et les reins.

3.1.1.6. Le nickel

Ce métal est présent dans différents minerais et représente entre 0,8 et 0,9% de la croûte terrestre. Les principales sources anthropiques de nickel sont la combustion de charbon ou de fuel, l'incinération de déchets, l'épandage des boues d'épuration, etc. On le retrouve dans des batteries, comme catalyseur en chimie organique ou pour la fabrication de pigments minéraux.

Dans la région du Grand Est, en 2017, ce sont 2,48 tonnes de cet ETM qui ont été émises dans l'air. L'industrie manufacturière est le principal émetteur (71%). L'inhalation de composés de nickel est cancérogène pour l'être humain.

3.1.1.7. Le plomb

À la suite de la suppression du plomb dans l'essence en 2000, les émissions de cet élément ont rapidement diminué dans les mois qui ont suivi l'interdiction. Les autres sources anthropiques sont les industries d'extraction de première et de seconde fusion du plomb, la fabrication de batteries électriques, etc.

En 2017, 10,35 tonnes de plomb ont été émises dans l'air du Grand Est. Le transport routier (39%), l'industrie manufacturière (32%) représentent près de 70% des émissions. Le plomb est un composé reconnu comme toxique et les composés de ce métal sont classés comme reprotoxiques et nocifs par inhalation pour l'Homme.

3.1.1.8. Le sélénium

Cet élément est essentiel pour la grande majorité des espèces animales et végétales, c'est un oligo-élément. Il est par exemple nécessaire pour de nombreuses enzymes. Cependant, des œdèmes pulmonaires peuvent apparaître après des expositions aiguës.

Dans le Grand Est, ce sont 1,23 tonnes de cet ETM qui ont été émises pendant l'année 2017, avec comme principal responsable l'industrie manufacturière (72%). Le sélénium est utilisé dans l'industrie du verre, des pigments, des composants électroniques, etc.

3.1.1.9. Le zinc

Cet élément est émis naturellement dans l'air par les éruptions volcaniques, les feux de forêts, les aérosols marins ou le transport par le vent de particules du sol.

Les principales sources d'émissions anthropiques de zinc sont les activités minières et industrielles, les épandages agricoles, l'incinération de déchets, le secteur résidentiel ou celui des transports.

On le retrouve dans les revêtements de protection des métaux contre la corrosion, dans divers alliages, dans les équipements automobiles, etc.

En 2017, dans le Grand Est, 53,79 tonnes de zinc ont été émises dans l'atmosphère. Les principaux émetteurs sont le transport routier (36%), l'industrie manufacturière (36%) et le secteur résidentiel (20%). Essentiel pour l'Homme, le zinc peut cependant devenir toxique à des doses élevées.

3.1.2. Les dioxines et furanes

Les PCDD/F (polychlorodibenzodioxines et polychlorodibenzofuranes) sont des polluants organiques persistants. Ils regroupent 210 congénères qui sont des composés aromatiques polycycliques chlorés avec une structure chimique proche (Figure 5). Parmi-eux, 17 congénères sont suivis plus particulièrement pour leur toxicité.

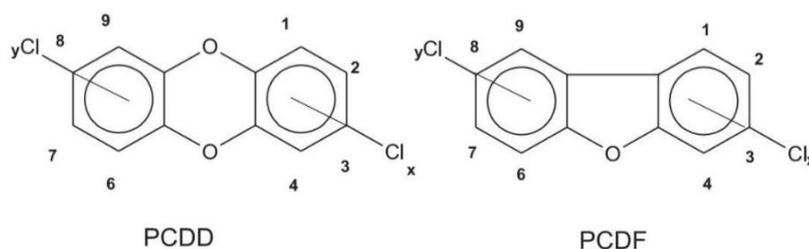


Figure 5 : Structure des PCDD/F (Souza Pereira, 2004).

Les dioxines et furanes comme les ETM peuvent être d'origines naturelles ou anthropiques. La formation complexe des PCDD/F est liée à des activités nécessitant de fortes températures comme l'incinération de déchets, la production de chaleur ou les procédés métallurgiques. En 2017, 7,3 grammes de dioxines et furanes ont été émis dans l'air, dans la région du Grand Est. Les secteurs les plus émetteurs sont la branche énergie (31%), le résidentiel (20%) et l'industrie manufacturière (28%).

Ces polluants sont peu biodégradables et persistent longtemps dans l'environnement en s'accumulant dans les chaînes alimentaires. Ils sont toxiques pour l'Homme et peuvent causer des cancers, interférer avec le système hormonal, léser le système immunitaire et provoquer des effets néfastes au niveau du développement et de la procréation (OMS, 2016).

L'exposition des populations aux PCDD/F se fait à 95% par la voie alimentaire et seulement à 5% par inhalation.

Les quantités en dioxines et furanes dans les lichens sont exprimées en I-TEQ (« Equivalents Toxiques Internationaux »). Trois systèmes existent actuellement avec des facteurs d'équivalence de toxicité (TEF)

différents pour chaque congénère. Chaque TEF est calculé par rapport à la substance la plus toxique, la « dioxine de Seveso » (2,3,7,8-TCDD). La quantité équivalente toxique (TEQ) d'un échantillon est la somme de la concentration de chaque congénère multipliée par son TEF (cf. Annexe 2).

3.1.3. Références aux normes

Actuellement, aucune réglementation concernant les concentrations en ETM et PCDD/F dans les lichens n'existe. Dans l'air ambiant, les teneurs en arsenic, cadmium, nickel et plomb sont réglementées par deux directives européennes (2008/50/CE et 2004/107/CE). D'autres textes européens fixent des concentrations en arsenic, cadmium, mercure et plomb dans les denrées alimentaires et les aliments pour les animaux (Règlement n°1881/2006 et 2002/32/CE). Enfin, la recommandation de la commission européenne (UE 2011/516) impose des concentrations maximales en PCDD/F pour certaines denrées alimentaires comme le lait, la viande ou les œufs.

3.2. ZONE D'ÉTUDE

L'évaluation des retombées atmosphériques en ETM et PCDD/F par les lichens s'est faite autour de l'usine de Saint-Gobain PAM. Elle est située sur les communes de Blénod-lès-Pont-à-Mousson et Pont-à-Mousson, dans le département de la Meurthe-et-Moselle. La zone d'étude prioritaire est d'environ 3km autour de l'usine (Figure 6).

Présent dans de nombreux pays, et employant plus de 2 200 personnes en France, Saint-Gobain PAM est aujourd'hui un leader européen et mondial dans la production de canalisations en fonte ductile. Appartenant au groupe Saint-Gobain, Saint-Gobain PAM possède 5 usines entre la Meurthe-et-Moselle et la Haute-Marne (52), permettant la fabrication de divers produits utilisés dans les secteurs de l'eau, de l'assainissement, de la voirie ou du bâtiment. L'entreprise existe depuis plus de 150 ans et produit des tuyaux et des pièces de voiries en fonte ductile sur son site de Pont-à-Mousson et Blénod-lès-Pont-à-Mousson.

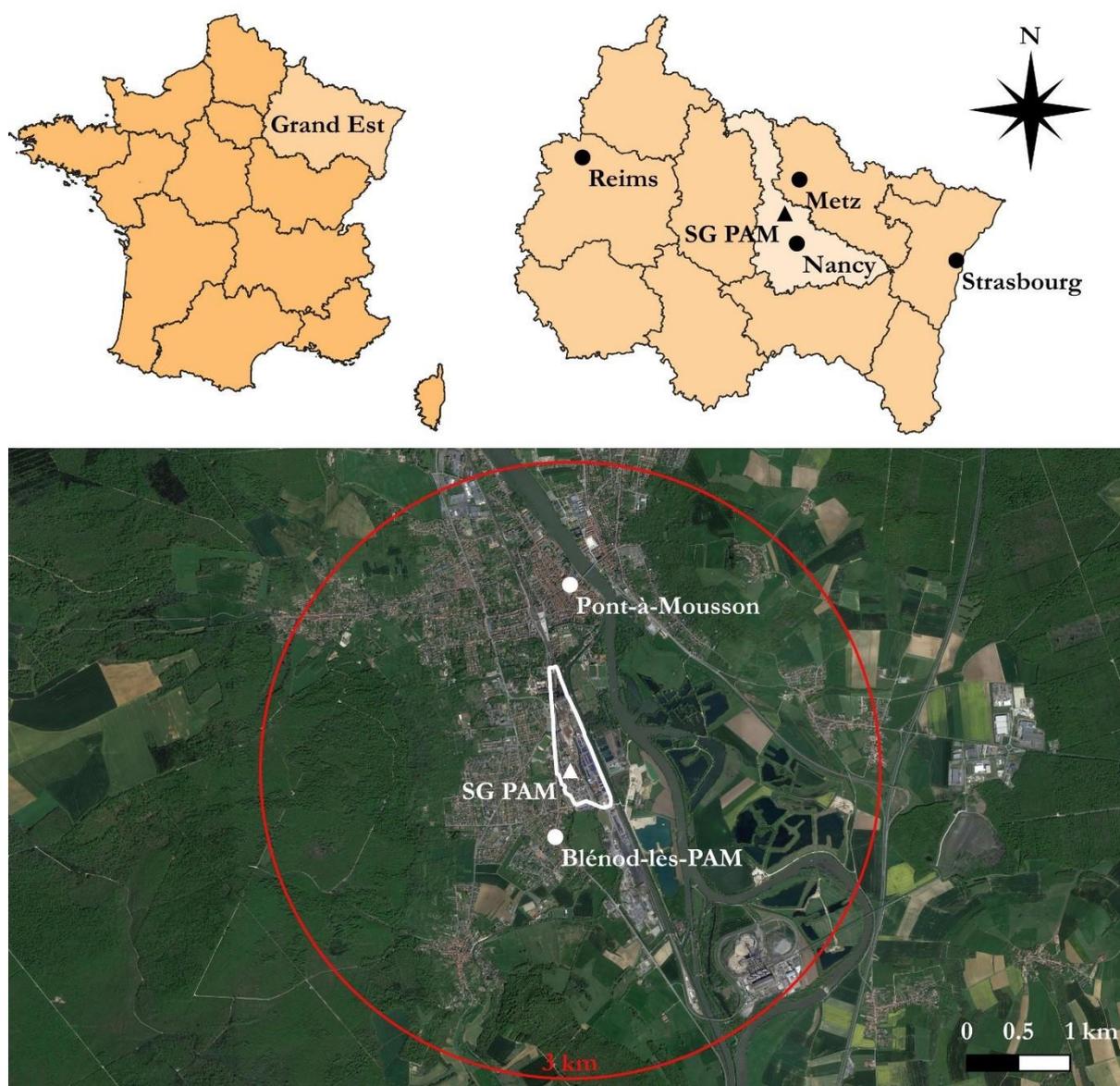


Figure 6 : Localisation de l'usine de Saint-Gobain PAM.

3.3. ÉMISSIONS

L'usine de Saint-Gobain PAM est une installation classée pour la protection de l'environnement (ICPE).

En 2017, l'usine de Saint-Gobain PAM se classait parmi les trois premiers émetteurs de la région Grand Est pour le zinc, le cuivre, le chrome, le cadmium, le mercure et le nickel (Tableau 3). Les émissions les plus importantes en ETM de Saint-Gobain PAM sont le zinc et le cuivre. A contrario, la contribution aux émissions d'arsenic, de cadmium, de plomb et de sélénium est plus faible.

Tableau 3 : Part des émissions de Saint-Gobain PAM dans celles des ICPE du Grand Est, en 2017 (Invent'Air A2017-V2019).

Polluant	Part des émissions de SG PAM dans celles des ICPE du Grand Est (%)	Rang parmi les ICPE du Grand Est
Cu	22,4	1 ^{er}
Zn	21,7	1 ^{er}
Cr	18,6	2 ^{ème}
Ni	13,1	3 ^{ème}
Hg	11,3	3 ^{ème}
As	8,6	6 ^{ème}
Cd	6,4	3 ^{ème}
Pb	5,1	6 ^{ème}
Se	3,6	5 ^{ème}
PCDD/F	0,5	22 ^{ème}

Les émissions de Saint-Gobain PAM ont été comparées à celles des communes de Pont-à-Mousson et de Blénod-lès-Pont-à-Mousson. La part des émissions d'ETM de l'usine aux émissions communales est supérieure à 76%, avec des pourcentages au-dessus de 98% pour le chrome et le mercure (Tableau 4).

Tableau 4 : Part des émissions de Saint-Gobain PAM dans celles des communes de Blénod-lès-Pont-à-Mousson et Pont-à-Mousson, en 2017 (Invent'Air A2017-V2019).

	As	Cd	Cr	Cu	Hg	Ni	Pb	Se	Zn	PCDD/F
Part des émissions de SG PAM / celles des deux communes (%)	85,8	97,7	98,8	76,7	98,5	87,0	86,6	94,5	96,2	17,5

La contribution des émissions d'ETM de Saint-Gobain PAM aux émissions environnantes est importante pour les communes à proximité du site industriel (Blénod-lès-Pont-à-Mousson et Pont-à-Mousson). C'est pourquoi, le site de Saint-Gobain PAM est tout indiqué pour réaliser une étude de bioaccumulation par les lichens.

3.4. STRATÉGIE D'ÉCHANTILLONNAGE

Afin de déterminer un plan d'échantillonnage le plus complet pour évaluer les retombées atmosphériques en ETM et PCDD/F autour de l'usine de Saint-Gobain PAM, plusieurs documents ou sources d'informations ont été nécessaires.

3.4.1. Recherches bibliographiques

Un recensement le plus exhaustif possible des études, articles, etc. se référant à la biosurveillance et plus particulièrement à la bioaccumulation par les lichens, a été effectué. Celui-ci a eu pour but de servir de référence pour la connaissance, la réalisation et l'interprétation des résultats de l'étude. Il a permis de recenser des études similaires auxquelles il a été possible de comparer les valeurs mesurées autour du site industriel. Cette étape a été primordiale dans l'organisation et la planification de l'étude.

3.4.2. Rose des vents

La direction des vents est importante dans le choix des stations. Les zones sous l'influence des vents dominants auront des retombées atmosphériques plus importantes que celles opposées aux directions principales ; le vent ayant une influence significative sur le transport et la dispersion des polluants.

Les relevés utilisés pour la rose des vents sont ceux de l'année 2018. Ils proviennent de la station d'ATMO Grand Est, située sur la commune d'Atton, limitrophe de Blénod-lès-Pont-à-Mousson et Pont-à-Mousson. Elle est localisée à environ 2,8km au nord-est de l'usine de Saint-Gobain PAM. Les vents avec une vitesse inférieure à 1 m/s ne sont pas été pris en compte dans les calculs.

La rose des vents montre que 15% des vents dominants viennent du sud-ouest (220°). En intégrant les secteurs 190 et 250°, ce sont 37% des vents dominants qui sont compris dans cet intervalle de direction. Les vents du nord-nord-est sont aussi importants (12%). Les vents compris entre 1 et 3 m/s ont été les plus présents en 2018, avec 77% des vents mesurés. Les vents forts (≥ 7 m/s) ne représentent que 0,3% (Figure 7).

En résumé, les vents dominants proviennent majoritairement du sud-ouest et plus occasionnellement du nord-est.

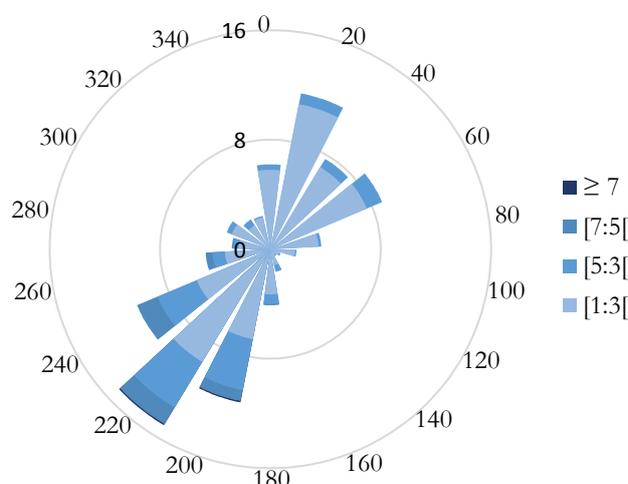


Figure 7 : Rose des vents (m/s) de la station d'Atton, en 2018.

3.4.3. Modélisation des rejets atmosphériques de l'usine

Des cartes de modélisation des seules émissions de l'industriel pour des polluants ciblés (Hg, Pb, Zn et PCDD/F) ont été réalisées. Même si plusieurs approximations ont été faites (rejets canalisés sur une seule cheminée, données d'émissions de 2016, non prise en compte de la topographie de la zone d'étude), ces cartes fournissent, en première approche, des éléments sur la dispersion des polluants autour du site industriel. La bute de Mousson n'a pas d'influence sur le panache présenté par la modélisation figure 8. Les concentrations moyennes les plus fortes (par exemple pour le zinc) se retrouvent à proximité de la cheminée (300m). La forme du panache du zinc comme celle des autres polluants modélisés, montre un profil large de secteur nord, nord-est et à l'opposé, un profil restreint mais plus allongé de secteur sud-ouest (Figure 8)



Figure 8 : Modélisation des rejets atmosphériques en zinc autour de Saint-Gobain PAM.

3.4.4. Recommandations de la norme

La norme NF X43-904 propose deux possibilités de plan d'échantillonnage – Cf. Annexe 3.

- a) Si une étude de modélisation des retombées atmosphériques est disponible et fiable, les points de prélèvements peuvent être situés en fonction de la zone de dépôt maximal et du sens du vent avec également un site de collecte en zone témoin (hors du domaine d'influence).
- b) A l'inverse, si aucune étude de modélisation n'est disponible, 2 à 5 sites de collectes doivent être placés dans les deux axes principaux de direction du vent (entre le lieu de pollution et 500m). Un site de collecte doit également être localisé en amont de la source de pollution et un autre en zone témoin.

Au regard des cartes de modélisations des retombées en ETM réalisées sur la zone d'étude, le plan d'échantillonnage (a) a été retenu pour cette étude,

3.5. REPÉRAGE DES STATIONS

En compilant les informations de la rose des vents, des cartes de modélisation des rejets atmosphériques de Saint-Gobain PAM et des recommandations de la norme, 12 stations potentielles ont pu être déterminées et placées autour du site industriel en fonction des zones de dépôts maximales, des zones hors d'influence des émissions de l'usine et des vents dominants.

Une station (ou site de collecte) dans cette étude correspond à un ensemble d'arbres proches les uns des autres sur lesquels sont prélevés des lichens de la même espèce.

Le plan d'échantillonnage a été le suivant (Figure 9) :

- Une station est positionnée à proximité directe de l'usine (A) ;
- 4 sites de prélèvements ont été placés dans la direction nord, un tous les 500m (entre 500m et 2km de l'usine de Saint-Gobain PAM) (B à E) ;
- Les mêmes distances ont été prises pour l'alignement nord-est, avec l'ajout d'une cinquième station à 3km de Saint-Gobain PAM (F à J).
- Un point de prélèvement a été placé au sud-ouest de Saint-Gobain PAM (K) ;
- Un site témoin a été déterminé, présumé hors des zones d'influence des émissions de l'usine (L).

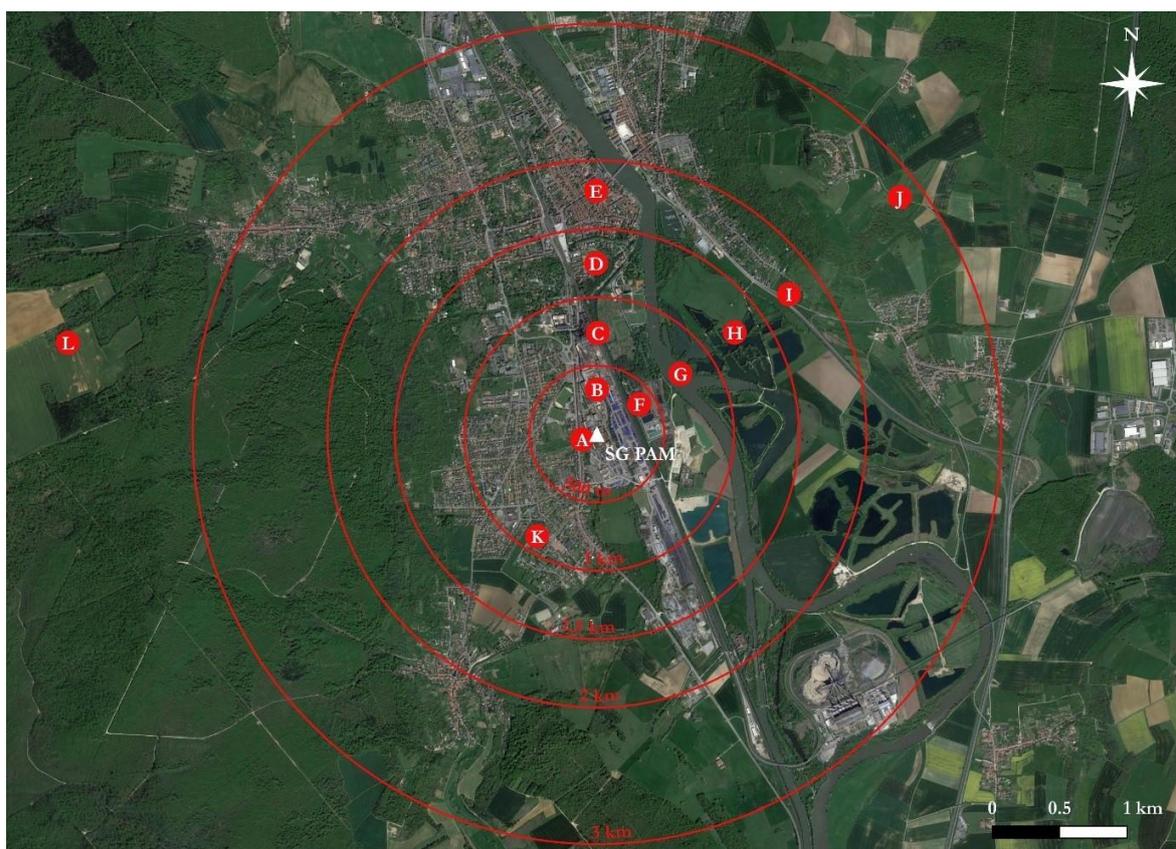


Figure 9 : Emplacements potentiels des stations autour de Saint-Gobain PAM.

Des repérages par orthophotographies et sur Google Maps et Earth ont été effectués afin d'essayer de repérer les arbres pouvant être utilisés comme phorophytes (arbres supports pour les lichens).

Les repérages *in situ* des stations potentielles correspondants au plan d'échantillonnage ont nécessités 2 jours de prospection de la zone d'étude, respectivement le 25 avril et le 2 mai 2019.

Une fiche détaillée était renseignée systématiquement afin d'assurer, dans les meilleures conditions de travail, la phase postérieure de collecte des échantillons.

Sur le terrain, plusieurs problèmes inhérents à la superficie importante du site industriel, zone non accessible pour prélever les lichens, sont apparus.

La recherche d'arbres a également été compliquée vers le nord-est avec la présence d'une zone humide d'environ 80 hectares, aux abords de la rivière la Moselle, où les conditions de prélèvements étaient relativement difficiles à remplir. Globalement, les groupes d'arbres proches, porteurs de l'espèce de lichen prélevée étaient assez rares, notamment dans le secteur Nord-Est de la zone d'étude.

3.6. CHOIX DES STATIONS

Finalement, 11 stations ont pu être inventoriées et validées (Figure 10 et tableau 5) :

- Une station à proximité de l'usine de Saint-Gobain PAM (1) ;
- 4 points de prélèvements en direction du nord (2 à 5) ;
- 3 stations vers le nord-est (7 à 9) ;
- 1 station au sud-ouest (10) ;
- un point de prélèvement au nord-ouest qui est la station témoin (11) ;
- une dernière station située au nord-est, le long d'un axe à fort trafic routier et proche de l'autoroute A31 (12).

La station 6 a finalement été abandonnée car elle ne remplissait pas entièrement tous les critères nécessaires pour l'échantillonnage des lichens.

Enfin, la présence de lichens fruticuleux de taille conséquente au niveau de la station témoin 11 pouvait laisser supposer une bonne qualité de l'air du site et l'absence de toutes influences de sources de pollutions.

Tableau 5 : Localisation des stations de prélèvements.

Station	Lieu (Commune)	Longitude	Latitude	Distance / SG PAM (m)	Orientation / SG PAM
1	Av. Victor Claude (Blénod-lès-PAM)	6.05316	48.88605	166	235,2°
2	Av. Victor Claude (Blénod-lès-PAM)	6.05177	48.89203	620	337.4°
3	Ile d'Esch (Pont-à-Mousson)	6.05997	48.89408	877	24.4°
4	Av. Camille Cavallier (Pont-à-Mousson)	6.05195	48.89642	1 082	348.0°
5	Bd. Maréchal de L. de T. (Pont-à-Mousson)	6.06187	48.90238	1 793	16.2°
7	Etang du Saussi (Atton)	6.07270	48.89093	1 372	70.9°
8	Espace loisirs du Paquis (Atton)	6.08334	48.89338	2 198	70.8°
9	D34 – Ferme de la chapelle (Mousson)	6.08560	48.91013	3 420	40.9°
10	Rue de la Carrière (Blénod-lès-PAM)	6.05139	48.87977	836	198.5°
11	Cimetière militaire (Montauville)	6.01219	48.90324	3 628	300.1°
12	Rue de la Louvrière (Lesménils)	6.10747	48.93146	6 272	37.7°

Des doublons ont été réalisés au niveau des stations 4 et 11. Afin de prendre en compte la variabilité (inter-sites) liée à la méthode dans l'interprétation des résultats, la norme préconise de réaliser au moins 3 répliqués sur au moins 2 sites de collecte de l'air d'étude ; ceci a été impossible autour de Saint-Gobain PAM à cause de la biomasse insuffisante en lichens sur les arbres pour plusieurs prélèvements (quantité de 30g demandée par le laboratoire d'analyse pour un prélèvement).

Une description de chaque station est faite en Annexe 4.



Figure 10 : Localisation des 11 stations de prélèvements autour de Saint-Gobain PAM.

3.7. PROTOCOLE

Les prélèvements de lichens ont été réalisés suivant les préconisations de la norme NF X43-904. L'espèce de lichen prélevée doit être la même tout au long d'une étude de bioaccumulation. Dans le cadre de cette étude, l'espèce choisie est *Xanthoria parietina* (L.) Th. Fr.

3.7.1. Choix de l'espèce de lichen

X. parietina fait partie des 12 espèces de lichens recommandées dans la norme comme fréquemment utilisées dans des études de bioaccumulation (Figure 11). On retrouve dans cette liste par exemple *Parmelia sulcata* Taylor ou *Evernia prunastri* (L.) Ach.

X. parietina ou xanthorie des murailles est l'espèce la plus fréquente du genre *Xanthoria*. Elle est caractérisée par son thalle jaune orangé, ses lobes bien développés et ses nombreuses apothécies à disques orangés et aux marges plus jaunâtres (Figure 3). Son thalle foliacé peut virer au jaune verdâtre si le lichen se développe à l'ombre où l'humidité est plus importante (AFL, s.d.).

Cette espèce est présente dans toute la France et est très commune, hormis dans les zones de hautes montagnes. Elle n'est pas menacée en France (statut de protection : [LC]). *X. parietina* se retrouve sur tous les substrats ; elle est saxicole, corticole, lignicole mais peut aussi croître sur des substrats artificiels comme des tuiles ou des murs par exemple (Roux et coll., 2017).

Cette espèce de lichen est utilisée fréquemment dans les études de bioaccumulation car elle peut se développer dans des zones polluées (poléotolérance) et/ou riches en azote (nitrophilie). De plus, *X. parietina* est facilement reconnaissable à l'œil nu ; il n'y a pas besoin de réactifs chimiques, ni de microscope.



Figure 11: *Xanthoria parietina* (L.) Th. Fr.

3.7.2. Prélèvements des échantillons *in situ*

Au vu de l'éloignement du site d'étude par rapport au siège social à Schiltigheim, les prélèvements ont été réalisés sur deux jours : le 6 et 7 mai 2019. La norme indique que l'échantillonnage doit se faire en un minimum de temps et pendant des périodes climatiques calmes (sans pluie, neige, vents forts, etc.) ; ces conditions ont été respectées.

Pour chaque station, 3 à 6 arbres ont été choisis comme phorophytes (sauf pour les stations 9, 10 et 12). Ces arbres sont rapprochés les uns des autres et possèdent une faible inclinaison de tronc. Pour une même station, tous les arbres sont de la même espèce.

Sur la zone d'étude, ce sont 8 espèces arboricoles qui ont été utilisées comme phorophytes (*Prunus sp.*, *Tilia sp.*, *Acer sp.*, *Sorbus sp.*, *Populus sp.*, *Fagus sp.*, *Fraxinus sp.* et *Robinia sp.*). Les lichens prélevés se situaient à environ 1,5 – 2m du sol ; et tout le pourtour de l'écorce a été utilisé pour la récolte des échantillons.

Lors de l'échantillonnage des lichens, le principal point de surveillance a été d'éviter toute contamination des lichens (fumée de cigarette, gaz d'échappement, etc.). Ainsi, des gants à usage unique ont été utilisés à chaque station ainsi que des couteaux en céramique qui ont servi à décoller les thalles de l'écorce. Entre chaque utilisation, le matériel de collecte a été nettoyé à l'eau distillée pour éviter toute contamination entre sites de collecte.

Les lichens prélevés ont été entreposés dans des boîtes en aluminium. Pour chaque station, environ 30g de *X. parietina* ont été échantillonnés, réparti en trois boîtes. Suivant les principes de la norme, les lichens de l'ensemble des phorophytes de la station ont été regroupés afin de créer un échantillon composite unique et représentatif de la station.

Les boîtes ont été numérotées et placées dans un sac de conservation puis dans une glacière réfrigérée (Figure 12). Elles ont ensuite été disposées dans un réfrigérateur jusqu'à leur envoi au laboratoire d'analyse.



Figure 12 : Prélèvements des lichens, nettoyage des couteaux et conditionnement des échantillons.

3.7.3. Analyse des échantillons

Les échantillons ont été envoyés au laboratoire d'analyse Micropolluants Technologie (4, rue de Bort-lès-Orgues, 57070 Saint-Julien-lès-Metz), le jeudi 9 mai 2019. Ils ont été placés dans une glacière réfrigérée et fermée hermétiquement afin d'assurer les meilleures conditions de transport.

Pour chaque station, les ETM (As, Cd, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb, Se et Zn) ont été analysés. Les PCDD/F ont été mesurées uniquement dans 4 stations (Figure 13).

Liste des analyses à effectuer pour l'étude de biosurveillance du site de Saint-Gobain PAM selon la norme NF X 43 904 (bioaccumulation) - ATMO Grand Est - Adresse mail : pierre.robilet@atmo-grandest.eu / Tel : 03 88 19 26 33										
Référence du sachet (une station comprend les trois boîtes du sachet)	Analyse métaux lourds (référence 336)								Analyse Mercure par AFS (référence 335)	Analyse PCDD/Fs (référence 329)
	As	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Se	Zn	Hg	PCDD/Fs
1	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui
2	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Non
3	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Non
E4	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui
D4	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui
5	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Non
7	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui
8	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Non
9	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Non
10	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Non
E11	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui
D11	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui
12	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Non
Total	13	13	13	13	13	13	13	13	13 analyses	6 analyses
	104 analyses									

Figure 13 : Liste des analyses réalisées sur chaque échantillon.

Les concentrations des 17 congénères de dioxines et furanes ont été déterminées par chromatographie en phase gazeuse couplée à la spectrométrie de masse à haute résolution (HRGC-HRMS). La technique de spectrométrie de masse à plasma à couplage inductif (ICP-MS) a été utilisée pour les concentrations en ETM, sauf pour le mercure où la spectroscopie de fluorescence atomique (AFS) a été employée. Les concentrations en ETM ont été fournies en mg/kg de MS et celles des PCDD/F en pg/g de MS.

3.8. LIMITES DE L'ÉTUDE

La norme NF X43-904 apporte un cadre réglementaire afin de réaliser des études de bioaccumulation par les lichens. Par ces nombreuses recommandations, elle permet d'effectuer sans grande difficulté le protocole qu'elle propose.

Cependant, plusieurs points délicats et incertitudes sont à préciser.

3.8.1. Écorce du phorophyte

Le type d'écorce du phorophyte peut être un problème lors du prélèvement des lichens. Des écorces lisses comme celles de tilleuls permettent un meilleur prélèvement des thalles de lichens par rapport à des écorces rugueuses. Ainsi, si possible, des écorces lisses sont à favoriser.

3.8.2. Quantité de biomasse à prélever

Il est recommandé également de prélever des thalles avec la même taille et le même degré de fertilité sur l'ensemble de la zone d'étude. Malheureusement, ce point n'a pas pu être respecté aux vues de la difficulté à prélever des thalles sur certaines écorces mais aussi par manque de biomasse pour le prélèvement.

En effet, les 30g demandés par le laboratoire d'analyses ont été un frein lors de cette étude. Une quantité largement inférieure à celle demandée aurait permis :

- De faire des triplicats plus facilement sur de nombreuses stations ;
- De choisir les thalles de *X. parietina* sur les écorces
- D'avoir une uniformité sur toute la zone d'étude.

3.8.3. Durée de bioaccumulation

La taille du thalle est à nouveau une donnée importante car celle-ci est liée à la durée de vie du lichen et donc par conséquent au temps pendant lequel l'organisme a pu accumuler des polluants.

Généralement, l'accumulation dans le thalle des lichens est considérée comme rapide car ils sont par exemple utilisés en tant que transplants lichéniques lors de études de bioaccumulation active (durée d'exposition de quelques mois) (Kularatne & de Freitas, 2013). N'ayant pas de système d'excrétion, les lichens accumuleraient en théorie les polluants tout au long de leur vie. Cependant, certains systèmes doivent exister puisqu'une étude a déjà pu mesurer des baisses dans les teneurs en métaux après plusieurs années (Walther *et al.*, 1990). Ces processus sont malheureusement très difficiles à étudier et donc peu documentés.

La durée de bioaccumulation des polluants par un lichen est liée à sa croissance, celle-ci pouvant être comprise entre 2,5 et 6,0 mm par an pour *X. parietina* (Armstrong & Bradwell, 2011). Cette différence intra-espèce peut être couplée avec des conditions de vie et d'environnement qui peuvent varier en fonction de plusieurs paramètres (vent, précipitations, relief, ensoleillement, humidité, etc.). Ces différences sont la cause de la recommandation de la norme de prélever des thalles de même taille (pour avoir des thalles avec le même âge et donc la même durée d'accumulation) et avec le même degré de fertilité (les structures reproductives accumulant plus de polluants).

Pour Garrec et Van Haluwyn (2002), dans les régions tempérées, le prélèvement des 3 à 5mm uniquement des thalles extérieurs pour des espèces comme *Parmelia caperata* ou *sulcata* permettrait de ne prendre en compte que la biomasse produite sur une année. Ce choix permettrait d'avoir des concentrations en polluants accumulées seulement sur cette même période. Il est à noter qu'il est impossible d'estimer pour les lichens un seuil de concentration maximale d'accumulation ou de mortalité.

3.8.4. Incertitudes des mesures

3.8.4.1. Liées à la biologie des lichens

La bioaccumulation des retombées atmosphériques par les lichens peut dépendre de nombreux facteurs comme la biologie de *X. parietina* mais aussi les conditions de vie des individus prélevés (climat, conditions météorologiques, relief, etc.). Ainsi, bien qu'il soit possible de déterminer les causes de nombreuses teneurs en polluants dans les lichens, certaines variations peuvent simplement être dues à des environnements légèrement différents impactant la bioaccumulation des polluants.

3.8.4.2. Liées aux prélèvements et aux analyses

Bien que le protocole soit suivi parfaitement, certaines contaminations peuvent avoir lieu lors de l'échantillonnage des lichens et/ou du transport. Afin d'avoir une information sur ces potentielles contaminations, des doublons avaient été récoltés sur deux stations.

Périodes de prélèvements dans l'année

Dans la zone industrialo-portuaire de Fos-sur-Mer, Ratier (2015) a mis en évidence des variations de concentrations pour certains métaux lourds par rapport à la période d'échantillonnage dans l'année.

Les prélèvements autour de Saint-Gobain PAM ont eu lieu sur 2 jours en mai. Les variations de concentration selon la période d'échantillonnage n'ont pas été étudiée.

4. INTERPRÉTATION DES RÉSULTATS

Sur 11 stations d'échantillonnage situées à proximité du site industriel de Saint-Gobain PAM, 9 ETM et les PCDD/F ont été mesurés (Tableau 6). Seules 4 stations (3, 5, 8 et 11) ont eu une concentration inférieure à la limite de quantification pour le sélénium (LQ³ = 0,25 mg/kg de MS).

Il est à rappeler qu'aucune valeur (seuil) de référence pour les teneurs en ETM et PCDD/F dans les lichens est préconisée en France et en Europe.

Tableau 6 : Concentrations en ETM (mg/kg de MS) et PCDD/F (pg/g TEQ OMS 2005 de MS) pour les 11 stations de la zone d'étude.

Station	As	Cd	Cr	Cu	Hg	Ni	Pb	Se	Zn	PCDD/F
1	2,16	0,6	18,3	32,6	0,091	5,68	18,7	0,71	889	2,309
2	1,75	0,43	13,4	19,5	0,071	8,28	24,9	0,42	1746	
3	0,55	0,13	3,76	6,27	0,072	2,25	8,61	< LQ	897	
4	1,19	0,53	7,03	15,5	0,072	3,43	26	0,31	590	1,624
5	0,46	0,18	3,07	7,75	0,088	1,47	3,18	< LQ	383	
7	0,7	0,085	3,49	6,83	0,081	1,49	4,81	0,31	340	1,272
8	0,61	0,042	3,05	6,8	0,052	1,54	2,2	< LQ	81,9	
9	1,23	0,076	5,1	6,94	0,079	2,1	4,19	0,26	133	
10	0,7	0,14	2,65	43,7	0,079	1,54	5,12	0,27	441	
11	0,62	0,083	1,58	4,38	0,092	1,08	3,04	< LQ	42	0,974
12	0,93	0,32	7,33	24,8	0,093	2,59	11,7	0,28	196	

Les analyses statistiques (matrices de corrélation et analyse factorielle) ont été réalisées avec le logiciel Rstudio (version 3.6), les graphiques avec ce même logiciel (packages « ggplot2 » et « factoextra ») et Excel, et les cartographies avec Qgis (version 3.6.2).

³ La limite de quantification est la valeur au-dessous de laquelle le laboratoire d'analyse n'est plus en mesure de déterminer avec précision la concentration en polluants dans les lichens.

4.1. CONCENTRATIONS SUR LA ZONE D'ÉTUDE

4.1.1. Les éléments traces métalliques

4.1.1.1. Analyse statistique

Au tableau 7 sont représentés, la médiane, le minimum, le maximum et le coefficient de variation obtenu pour chaque ETM sur l'ensemble de la zone d'étude. Les concentrations les plus élevées ont été trouvées pour le zinc et les plus faibles pour le mercure. L'ordre des concentrations en ETM de la zone d'étude selon les médianes est le suivant : Zn > Cu > Pb > Cr > Ni > As > Se > Cd > Hg.

On observe, pour certains polluants tels que **le cadmium, le chrome, le plomb et surtout le zinc, des coefficients de variation élevés (supérieurs à 80%)**, indiquant un écart important dans les teneurs mesurées. Par exemple, la différence entre le minimum et le maximum pour le zinc est très forte (environ 1 700 mg/kg de MS). A l'inverse, **le mercure possède des valeurs sur l'ensemble de la zone d'étude très proche (coefficient de variation égal à 15,41%)**.

Tableau 7 : Concentrations en métaux lourds (mg/kg de MS) calculées à partir des mesures réalisées autour du site industriel de Saint-Gobain PAM, en 2019.

	Médiane	Minimum	Maximum	CV (%)	Nbre stations
As	0,7	0,46	2,16	55,01	11
Cd	0,14	0,042	0,6	83,74	11
Cr	3,76	1,58	18,3	82,87	11
Cu	7,75	4,38	43,7	81,47	11
Hg	0,079	0,052	0,093	15,41	11
Ni	2,1	1,08	8,28	77,53	11
Pb	5,12	2,2	26	87,40	11
Se	0,31	< LQ	0,71	44,00	11
Zn	383	42	1 746	96,20	11

4.1.1.2. Comparaison avec l'échelle de Nimis & Bargagli (1999)

Les mesures d'ETM ont été comparées avec l'échelle de Nimis & Bargagli, décrite en 1999 (Tableau 8). Celle-ci est composée de 7 classes, allant d'un environnement naturel (« *naturality* ») à un environnement pollué (« *alteration* »). Cette échelle est basée sur des données obtenues sur plusieurs années et sur différents taxons de lichens corticoles dont *X. parietina*.

Tableau 8 : Classes (mg/kg de MS) de l'échelle de Nimis & Bargagli (1999).

Niveau	Classe	As	Cd	Cr	Cu	Hg	Ni	Pb	Se	Zn
« very high naturality »	1	<0,2	<0,2	<1,2	<7	<0,07	<1	<4	<0,04	<30
« high naturality »	2	<0,6	<0,4	<2,2	<10	<0,13	<2	<10	<0,15	<40
« middle naturality »	3	<1,2	<0,8	<4,0	<15	<0,20	<3	<25	<0,30	<65
« low naturality/alteration »	4	<1,9	<1,4	<6,0	<25	<0,29	<5	<55	<0,40	<94
« middle alteration »	5	<2,4	<2,0	<9,0	<34	<0,42	<6	<80	<0,70	<115
« high alteration »	6	<3,0	<2,6	<16,0	<53	<0,74	<8	<108	<0,90	<155
« very high alteration »	7	>3,0	>2,6	>16,0	>53	>0,74	>8	>108	>0,90	>155
Maximum en Italie		5,53	9,04	60,5	161	1,84	34,4	494	1,43	358

Afin de mieux visualiser les résultats de Saint-Gobain PAM, les limites basses de la classe 3 (« *middle naturality* ») et de la classe 6 (« *high alteration* ») ont été choisies et représentées par un trait vert et un trait rouge sur la Figure . Par exemple, les concentrations en arsenic entre 0,6 et 1,2 mg/kg de MS se trouvent dans le niveau « *middle naturality* »

Lorsqu'une valeur dépasse le trait vert, on peut dire que celle-ci correspond à un environnement qui n'est plus naturel, mais légèrement pollué. Si cette valeur est au-dessus du trait rouge, celle-ci nous renseigne sur la présence d'un environnement pollué, voire très pollué. Agnan (2013), considère ces valeurs **comme le seuil de *naturalité* (trait vert) et le seuil d'*altération* (trait rouge)**.

La Figure 4 représente les concentrations en métaux lourds de la zone d'étude sous forme de boîtes à moustaches (« *boxplot* »). Chaque boîte est délimitée par les quartiles 1 et 3 (Q1 et Q3), avec le trait noir plus foncé qui correspond à la médiane (Méd). 50% des valeurs d'un ETM sont comprises dans cette boîte. Les extrémités s'étendent jusqu'au minimum (Min) et au maximum (Max) des concentrations mesurées. Les points noirs au-delà de ces extrémités sont des valeurs extrêmes, pouvant être potentiellement aberrantes.

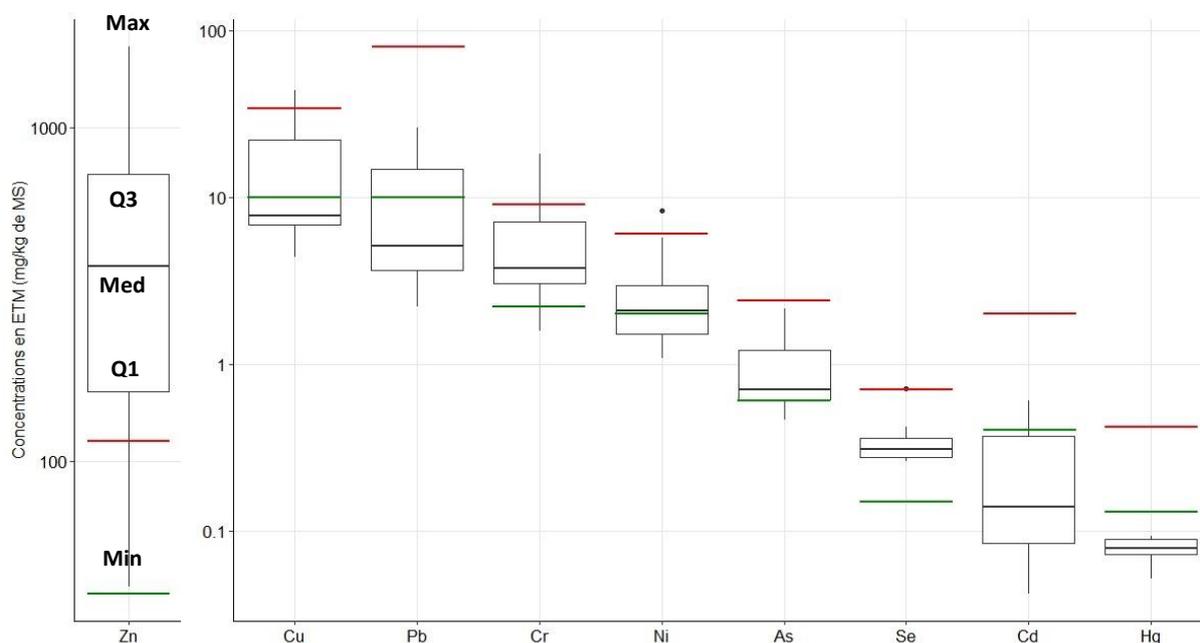


Figure 14 : Concentrations (mg/kg de MS) sur l'ensemble de la zone d'étude (« boxplot »).

Pour 8 des 9 ETM analysés (As, Cd, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb et Se), une grande partie des valeurs mesurées se trouve en dessous de la limite de « *high alteration* ». Quelques valeurs pour le chrome, le cuivre et le nickel se trouvent au-dessus de ce niveau. Certains ETM comme le cadmium, le cuivre, le mercure ou le plomb possèdent au moins 50% de leurs valeurs en dessous du seuil de *naturalité*.

Contrairement aux autres éléments traces métalliques, **le zinc a au moins 75% de ses valeurs au-dessus du niveau de « *high alteration* »**. La valeur médiane pour cet élément (383 mg/kg de MS) se trouve légèrement supérieure au maximum obtenu en Italie (358 mg/kg de MS) par Nimis & Bargagli (1999). Aucun autre élément ne dépasse les maximas mesurés dans l'étude italienne.

4.1.1.3. Comparaison avec des études similaires réalisées en France

Les concentrations relevées autour de Saint-Gobain PAM ont été comparées avec d'autres études réalisées sur *X. parietina* ces dernières années en France, notamment celles d'Ocelli *et al.* (2013) et de Dron *et al.* (2016). La première étude a été effectuée dans le Nord-Pas-de-Calais, dans la zone industrielle et portuaire de Dunkerque, l'agglomération de Lille et autour de Maubeuge. La seconde ciblait la zone industrialo-portuaire de Fos-sur-Mer, près de Marseille (Tableau 9).

Même si les activités industrielles ne sont pas les mêmes dans ces zones, il est intéressant de constater que, pour tous les ETM sauf le chrome à Lille et le zinc, les concentrations moyennes mesurées autour de Saint-Gobain PAM sont inférieures à celles obtenues à Dunkerque, Lille et Fos-sur-Mer. La moyenne des concentrations en zinc à Saint-Gobain PAM est largement supérieure à celle des autres zones (environ 3 à 5 fois plus élevée).

Tableau 9 : Comparaison des résultats (mg/kg de MS) avec d'autres études en France.

ETM	Moyenne (SG PAM)	Ocelli et al. (2013)			Dron et al. (2016)
		Moyenne (Dunkerque)	Moyenne (Lille)	Moyenne (Maubeuge)	Moyenne (Fos-sur-Mer)
As	0,99	2,1	1,1	0,8	2,9
Cd	0,24	1,4	0,7	0,3	0,87
Cr	6,25	38,3	4,6	3,8	18
Cu	15,92	19	19,1	9,5	21
Hg	0,08	0,2	0,1	0,1	0,19
Ni	2,86	24,2	3,2	2,6	11
Pb	10,22	32,7	31,1	11,5	24
Se	0,37				
Zn	521,72	178,9	112,8	74,4	178

Il est à noter également que les concentrations moyennes en arsenic, cadmium, chrome, cuivre, nickel, plomb et zinc autour de Saint-Gobain PAM sont supérieures au « fond naturel » (moyenne des trois plus faibles valeurs) observé lors de deux campagnes de mesures en Bourgogne. Les concentrations maximales de Saint-Gobain PAM restent cependant largement inférieures à celles de Bourgogne sauf pour le zinc (Daillant, 2003).

4.1.1.4. Comparaison avec des études similaires d'autres AASQA

ATMO Normandie réalise, depuis de nombreuses années, un suivi des installations polluantes (Rouen, Le Havre, etc.) dans sa région en utilisant la bioaccumulation (lichens et mousses). Ayant accumulé suffisamment de données sur les lichens, l'association peut comparer leurs mesures avec des valeurs repères régionales (percentile 95⁴) calculées à partir de 204 mesures effectuées entre 2009 et 2015 (ATMO Normandie, 2018). Les valeurs en ETM de Saint-Gobain PAM ont été comparées au percentile 95 utilisé par ATMO Normandie.

On observe qu'à Saint-Gobain PAM, 2 stations pour le chrome et 3 pour le zinc affichent une concentration plus élevée que le percentile 95 de Normandie (Tableau 10).

⁴ Le percentile 95 correspond à la valeur pour laquelle 95% des concentrations se trouvent en-dessous et 5% au-dessus.

Tableau 10 : Comparaison des résultats avec les valeurs régionales d'ATMO Normandie (mg/kg de MS).

	As	Cd	Cr	Cu	Hg	Ni	Pb	Se	Zn
Médiane (SG PAM)	0,7	0,14	3,76	7,75	0,079	2,1	5,12	0,31	383
Max (SG PAM)	2,16	0,6	18,3	43,7	0,093	8,28	26	0,71	1 746
Percentile 95 (ATMO Normandie)	2,8	1,1	11,7	187,9	0,5	49,2	70,6		591,2
Nbre de stations de SG PAM au-dessus du percentile 95 d'ATMO Normandie	0	0	2	0	0	0	0		3

4.1.1.5. Comparaison avec des études étrangères

Des études de bioaccumulation des ETM réalisées avec *X. parietina* sont assez fréquentes dans la littérature étrangère. Un résultat synthétique des valeurs de ces études est présenté dans le Tableau 11.

Les concentrations médianes retrouvées autour de l'usine sont inférieures (sauf pour le zinc) à celles autour d'une zone industrielle et urbaine en Turquie composée d'usines métallurgiques et avec l'utilisation d'énergies fossiles par certaines industries.

La concentration médiane en zinc obtenue dans la partie industrialisée de cette étude est de 1 678 mg/kg de MS, valeur proche du maximum de Saint-Gobain PAM (1 746 mg/kg de MS) (Demirqy *et al.*, 2012).

Les mêmes comparaisons sont réalisables avec une autre étude faite en Turquie, autour d'une centrale thermique au charbon. Cependant, les valeurs en zinc sont cette fois-ci très inférieures à celles de Saint-Gobain PAM, avec un maximum à 239,9 mg/kg de MS. Cette étude est l'une des rares à avoir mesurée des concentrations en sélénium. On peut noter que les valeurs en Turquie sont environ deux fois supérieures à celles de France (Gür & Yaprak, 2011).

De nombreuses études ont été effectuées également en Italie. Elles ont par exemple mesuré les concentrations en As, Cd, Cr, Hg, Ni, Pb et Zn dans deux provinces italiennes (Livourne et Pise). Pour la première étude, les concentrations moyennes obtenues à Saint-Gobain PAM sont supérieures à celles de Livourne pour le cadmium, le mercure et le zinc (Scerbo *et al.*, 1999).

Les valeurs médianes de la seconde étude italienne sont quant à elles inférieures à celles de Saint-Gobain PAM pour le chrome, le nickel, le plomb et le zinc (Scerbo *et al.*, 2002). Seul l'arsenic se retrouve avec des mesures inférieures aux deux études.

Tableau 11 : Concentrations (mg/kg de MS) en ETM des études étrangères.

Étude	Typologie	Pays		ETM								
				As	Cd	Cr	Cu	Hg	Ni	Pb	Se	Zn
SG PAM, 2019	Autour d'une fonderie	France	Moy	0,99	0,24	6,25	15,9	0,08	2,86	10,2	0,37	521,7
			Med	0,7	0,14	3,76	7,75	0,08	2,1	5,12	0,31	383
Demiray <i>et al.</i> (2012)	Zone industrialo-portuaire et urbaine	Turquie	Med	1,9	0,48		15,9	0,14	6,1	40		166
Gür & Yaprak (2011)	Autour d'une centrale thermique au charbon	Turquie	Moy	14,2	0,46	19	17,6	0,13	15,7	24	0,6	115,8
			Med	13,1	0,4	16,8	15,5	0,14	13,4	22,4	0,6	107,9
Scerbo <i>et al.</i> (1999)	Province de Livourne	Italie	Moy	1,3	0,16	7,52		0,01	6,26	11,9		46
Scerbo <i>et al.</i> (2002)	Province de Pise	Italie	Med	0,12	0,23	2,24		0,1	1,39	3,44		30,15
Brunialti & Frati (2007)	Province d'Ancona (1996)	Italie	Moy		0,2	1,6	9,1		2,05	7,66		32,3
	Province d'Ancona (2003)		Moy		0,2	2,7	9,04		3,05	2,43		47,8
Paoli <i>et al.</i> (2014)	Autour d'une cimenterie	Slovaquie	Moy	0,83	0,28	2,8	4,6	0,02	4,1	3,2		46
	Autour d'une carrière (1)		Moy	0,5	0,28	2	3	0,02	3,2	3,4		34
	Autour d'une carrière (2)		Moy	0,8	0,3	1,6	4	0,07	3,3	2,4		43
	Zone urbaine		Moy	0,37	0,24	2,1	3,3	0,05	1,9	2		30
	Zone agricole (3km)		Moy	0,56	0,21	1,7	4,5	0,02	2,1	1,8		33
	Zone agricole (10km)		Moy	0,47	0,2	1,6	4,6	0,02	2,1	1,6		39

D'autres concentrations ont été mesurées en 1996 et 2003, en Italie, sur les côtes de la mer Adriatique, avec des valeurs moyennes inférieures en arsenic, cadmium, chrome, cuivre et mercure par rapport à Saint-Gobain PAM (Brunialti & Frati, 2007).

Lors d'une étude en Slovaquie, les auteurs ont surveillé une cimenterie, deux carrières, une zone urbaine et 2 zones agricoles situées à 3 et 10km de la cimenterie. Pour 6 des 8 ETM communs entre cette étude et ceux de Saint-Gobain PAM (As, Cr, Cu, Hg, Pb et Zn), les concentrations moyennes sont supérieures en France. Pour le cadmium et le nickel, les concentrations de Saint-Gobain PAM sont au-dessus seulement de celles de la zone urbaine et des zones rurales (Paoli *et al.*, 2014).

4.1.1.6. Résumé

Par l'ensemble de ces comparaisons, on observe que les **concentrations en ETM dans les lichens autour de Saint-Gobain PAM sont inférieures (sauf pour le zinc) à celles de complexes industrialo-portuaires et d'agglomérations denses.**

Pour le Zinc, les concentrations sont, en revanche, supérieures à celles rencontrées à proximité des autres industries. Ce résultat est assez logique au vu de la multiplicité des sources éventuelles de pollution des secteurs étudiés, alors que sur la zone d'étude de Saint-Gobain PAM, la fonderie est l'une des seules sources d'émissions d'ETM importante.

Selon les études évaluées et les ETM considérés, les concentrations mesurées à Saint-Gobain PAM sont cohérentes (parfois supérieures, parfois inférieures) avec les niveaux de fond en zones rurales ou les sites d'études ciblant une seule industrie.

Au vu des résultats, l'influence du site industriel de Saint-Gobain sur les concentrations mesurées en métaux lourds autour du site s'avère plausible au regard des résultats enregistrés pour le zinc.

4.1.2. Les dioxines et furanes

4.1.2.1. Analyse statistique

Dans la stratégie d'échantillonnage, il a été convenu de retenir uniquement 4 stations pour la mesure des PCDD/F autour de l'usine de Saint-Gobain PAM (Tableau 6).

Avec une médiane de 1,448 pg/g TEQ OMS 2005 de MS, les valeurs trouvées sont assez proches les unes des autres (coefficient de variation égal à 37,2%) (Tableau 12).

Les résultats obtenus à Saint-Gobain PAM sont exprimés selon deux systèmes afin de faciliter la comparaison entre les études existantes.

Tableau 12 : Concentrations (pg/g de MS) en PCDD/F autour de Saint-Gobain PAM et des autres études.

Étude	Typologie		PCDD/F	
			TEQ OMS 2005	TEQ OTAN
SG PAM, 2019	Autour d'une fonderie	Min	0,974	0,958
		Max	2,309	2,405
		Moy	1,545	1,589
		Med	1,448	1,497
ATMO Normandie (2018)	Région Normandie	Percentile 95	13,1	
ATMO Occitanie (2018)	Unité de valorisation des déchets	Moy		1,8
Dron <i>et al.</i> (2016)	Zone industrialo-portuaire	Etendue		[1,1 : 27]
		Etendue (hors zone industrielle)		[1,5 : 4]
Augusto <i>et al.</i> (2004)	Zone industrielle et urbaine	Moy	427,74*	
Augusto <i>et al.</i> (2015)	Zone industrielle et urbaine	Moy	35,18*	
		Med	32*	

* Les études d'Augusto *et al.* (2004 et 2015) ne précisent pas le système dans lequel est exprimé leurs résultats.

4.1.2.2. Comparaison avec d'autres études

Les études de bioaccumulation par les lichens réalisées sur les polluants organiques tels que les PCDD/F sont plus rares que pour les ETM dans la littérature (Tableau 12).

ATMO Normandie mesure avec les ETM, les PCDD/F dans sa région. Ils ont ainsi pu déterminer une valeur repère régionale (percentile 95) des données récoltées pour ce polluant par rapport à 180 mesures réalisées entre 2009 et 2015. On observe que les concentrations trouvées à Saint-Gobain PAM sont largement inférieures (au minimum 6 fois) au percentile 95 des études réalisées en Normandie (ATMO Normandie, 2018).

De plus, les valeurs autour de l'usine de Saint-Gobain PAM sont inférieures à celles mesurées autour de l'unité de valorisation énergétique des déchets de Lunel-Viel (ATMO Occitanie, 2018). Elles se retrouvent également proches des minimums aussi bien sur l'ensemble de la zone d'étude de Fos-sur-Mer que sur les parties non-industrialisées de cette même étude (Dron *et al.*, 2016).

Les études d'Augusto *et al.* (2004 et 2015) permettent d'avoir un dernier point de comparaison. Les auteurs réalisent un suivi régulier des concentrations en PCDD/F dans les lichens autour de la péninsule de Sétubal, région très peuplée et fortement industrialisée du Portugal. Les résultats de ces études sont largement supérieurs aux valeurs mesurées à Saint-Gobain PAM, même si le système d'unité n'est pas précisé.

En résumé, **les teneurs en dioxines et furanes autour du site industriel de Saint-Gobain PAM sont inférieures à celles de toutes les études** utilisées comme point de comparaison.

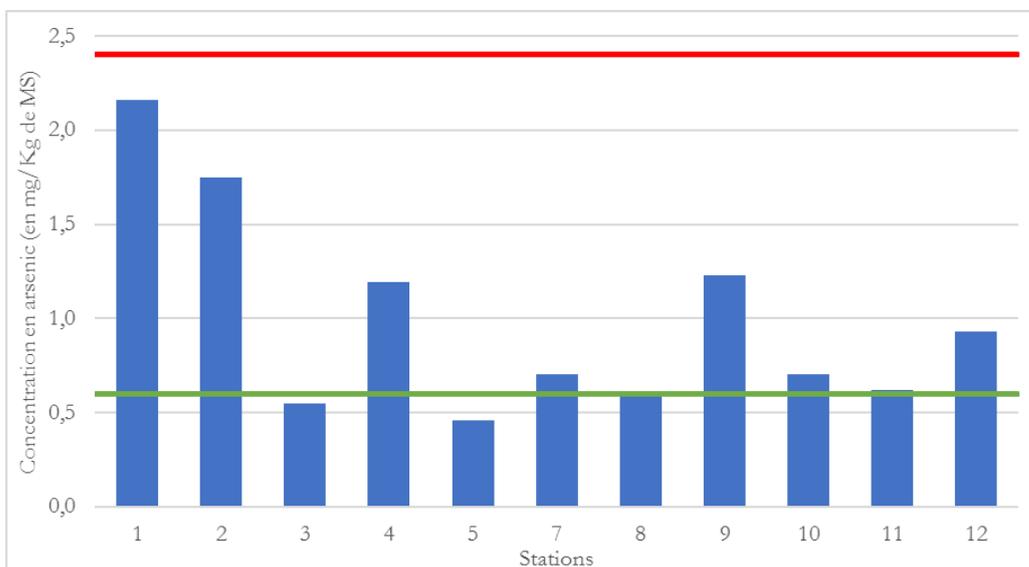
4.2. CONCENTRATIONS PAR POLLUANTS

Pour chaque polluant inventorié autour de l'usine de Saint-Gobain PAM, les concentrations obtenues sont présentées sous la forme d'un graphique et d'une cartographie et comparées à l'échelle de Nimis & Bargagli (1999). Les concentrations en ETM sont exprimées en mg/kg de MS et celles des PCDD/F en pg/g TEQ OMS 2005 de MS.

Pour chaque graphique, les traits verts et rouges indiquent respectivement la limite basse de la classe 3 (« *middle naturality* ») et de la classe 6 (« *high alteration* ») de l'échelle de Nimis & Bargagli (1999). Lorsqu'une valeur dépasse le trait vert, on peut dire que celle-ci correspond à un environnement qui n'est plus naturel, mais légèrement pollué. Si cette valeur est au-dessus du trait rouge, celle-ci nous renseigne sur la présence d'un environnement pollué, voire très pollué. Agnan (2013) considère ces valeurs comme le seuil de *naturalité* (trait vert) et le seuil d'*altération* (trait rouge).

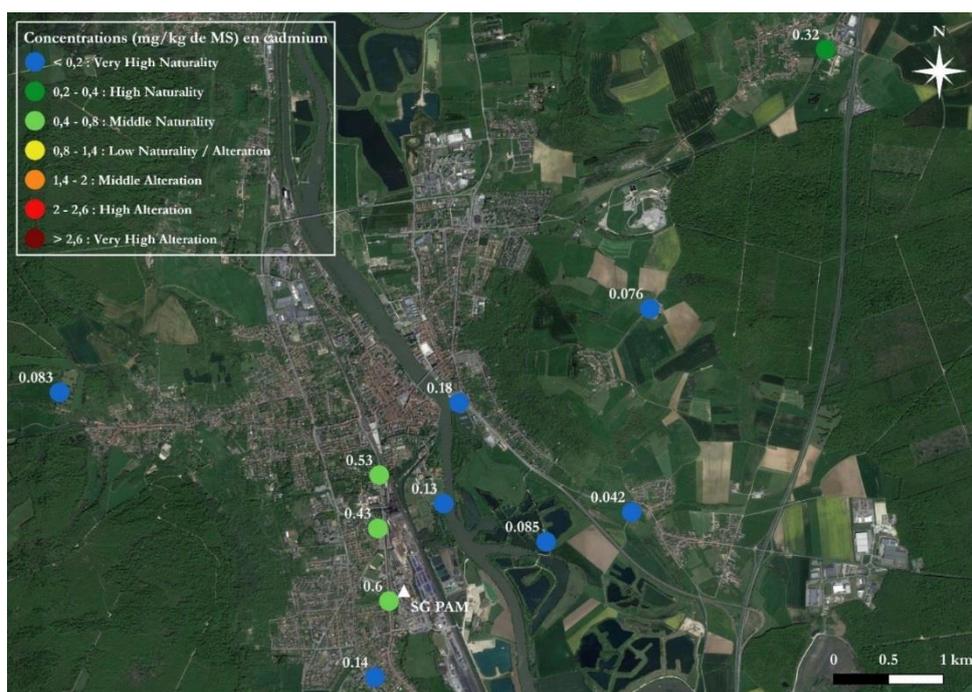
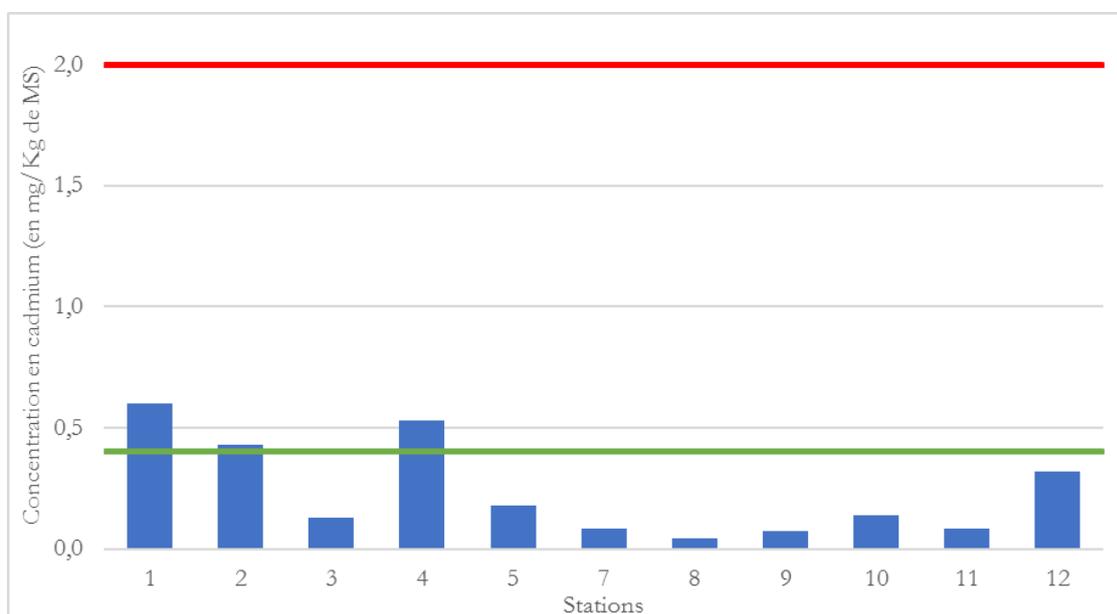
4.2.1. Les éléments traces métalliques

4.2.1.1. L'arsenic



Les concentrations en arsenic mesurées autour de Saint-Gobain PAM sont toutes inférieures à 2,4 mg/kg de MS (seuil d'altération). Les deux plus fortes valeurs se retrouvent respectivement à la station 1 (2,16 mg/kg de MS) et 2 (1,75 mg/kg de MS). Le minimum se trouve à la station 5 avec une valeur de 0,46 mg/kg de MS. La station témoin (station 11) possède une concentration en arsenic très légèrement supérieure au niveau de « middle naturality » (0,62 mg/kg de MS par rapport à 0,6 mg/kg de MS).

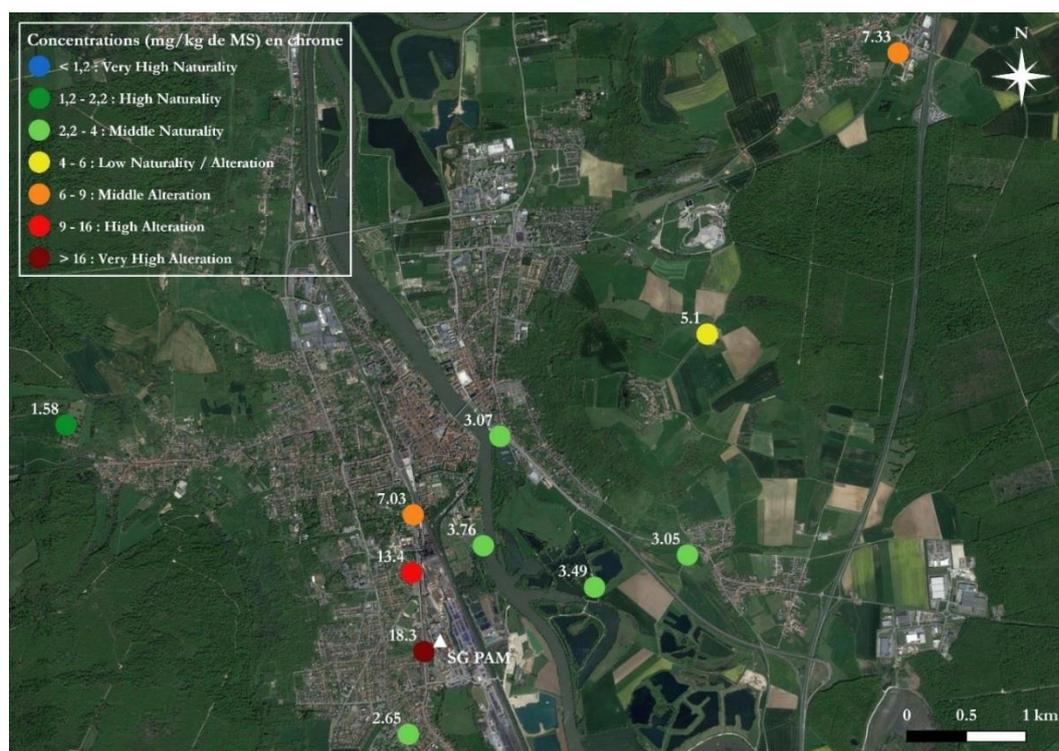
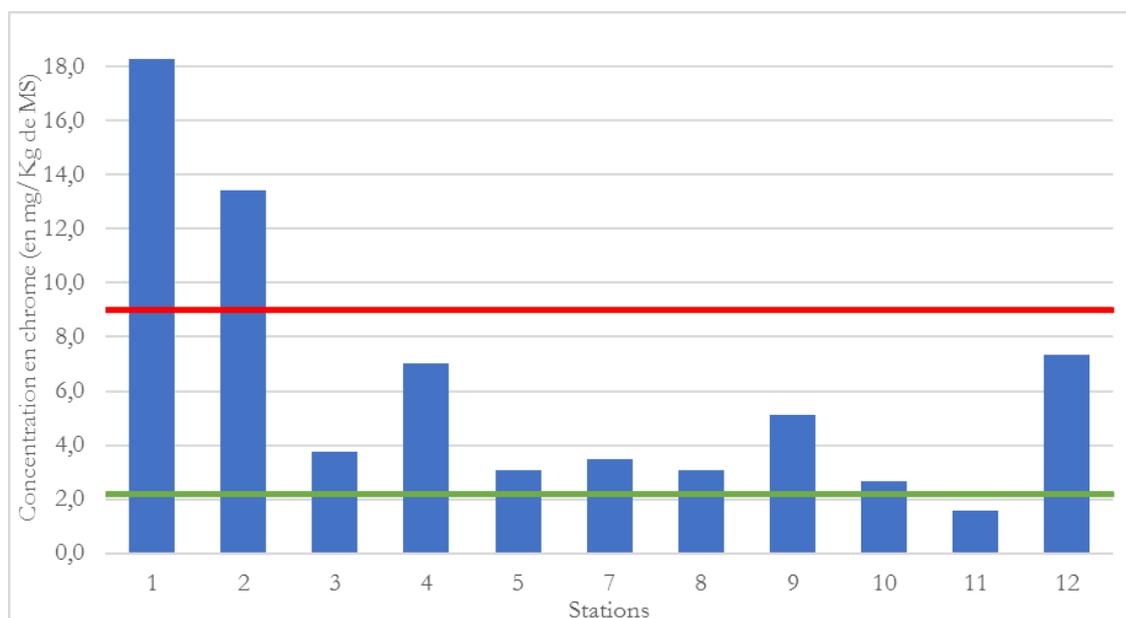
4.2.1.2. Le cadmium



Plus de la moitié des stations ne dépasse pas le niveau de « *middle naturality* », égal à 0,4 mg/kg de MS. La valeur la plus faible se trouve à la station 8 (0,042 mg/kg de MS). La station témoin fait partie des 4 stations avec des concentrations en cadmium inférieures à 0,1 mg/kg de MS (stations 7, 8, 9 et 11).

Même si aucune station n'a une concentration supérieure au seuil d'*altération*, 3 stations dépassent le seuil de *naturalité* (station 1, 2 et 4). La concentration maximale a été mesurée à la station 1 (0,6 mg/kg de MS).

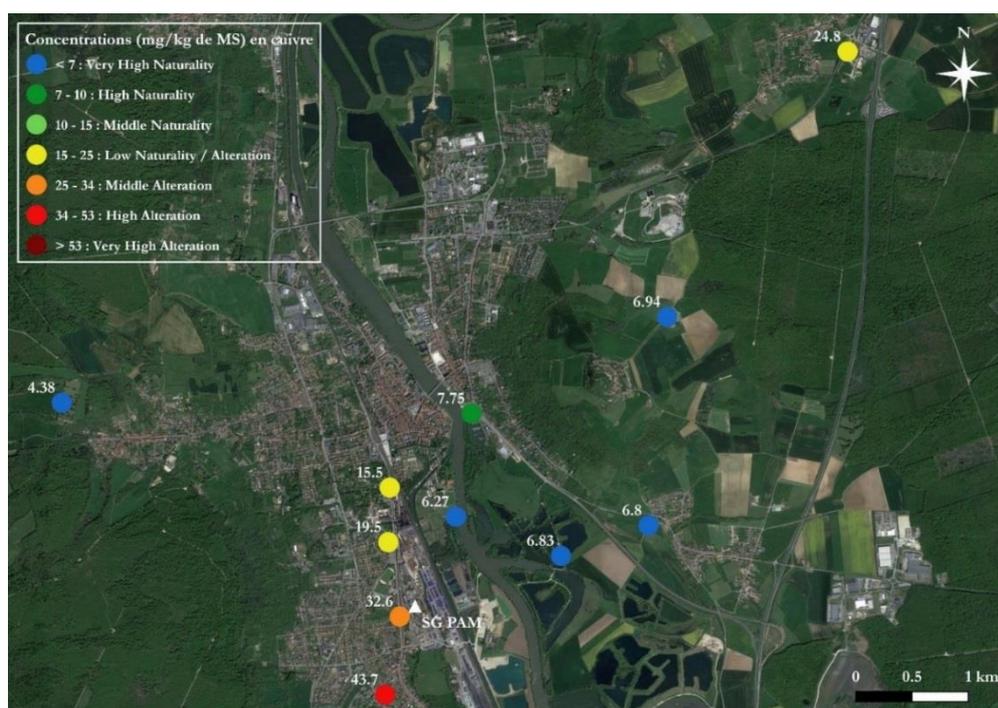
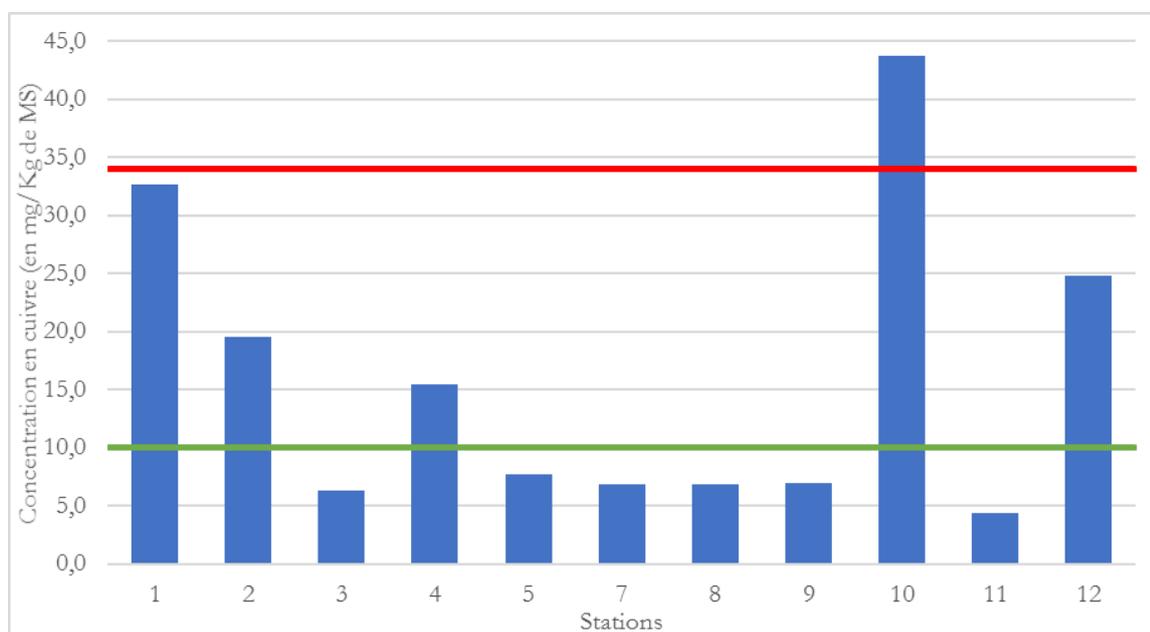
4.2.1.3. Le chrome



Deux concentrations en chrome (stations 1 et 2) ont des valeurs supérieures à la limite de « *high alteration* » (9,0 mg/kg de MS). Ces mêmes stations dépassent le percentile 95 des données d'ATMO Normandie (11,7 mg/kg de MS).

Mise à part ces deux stations et la station témoin 11 qui a la valeur la plus faible en chrome autour de Saint-Gobain PAM, toutes les autres ont des concentrations comprises entre le seuil de *naturalité* et celui d'*altération*. Parmi ces dernières, des valeurs plus fortes ont été mesurées pour les stations 4 et 12.

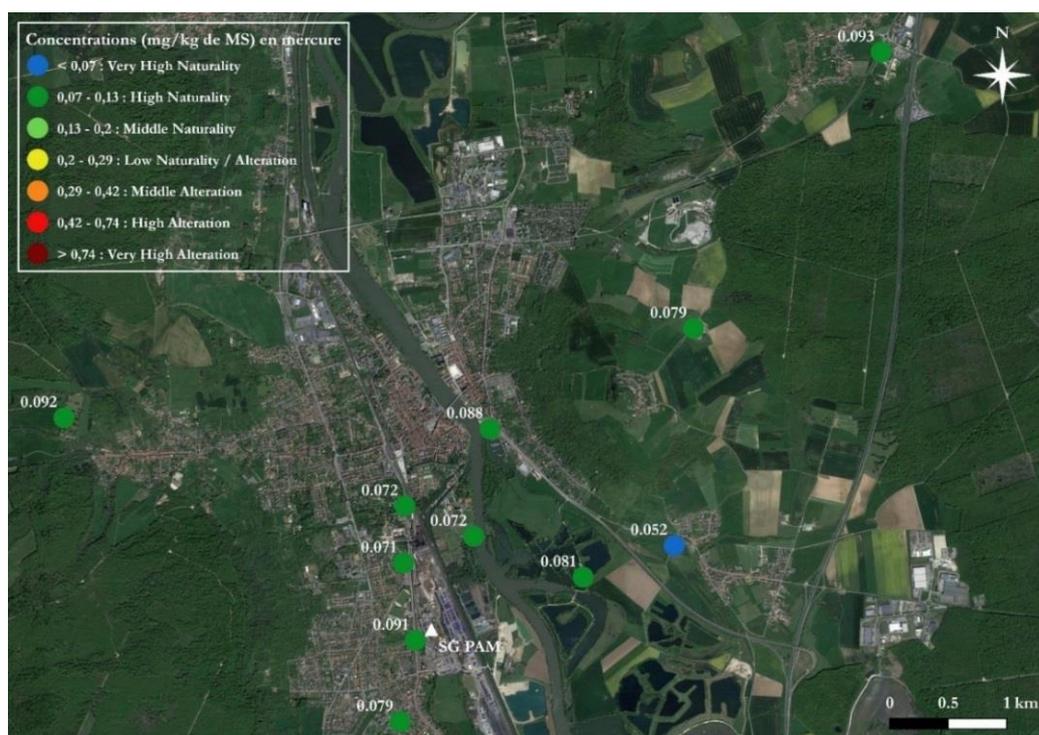
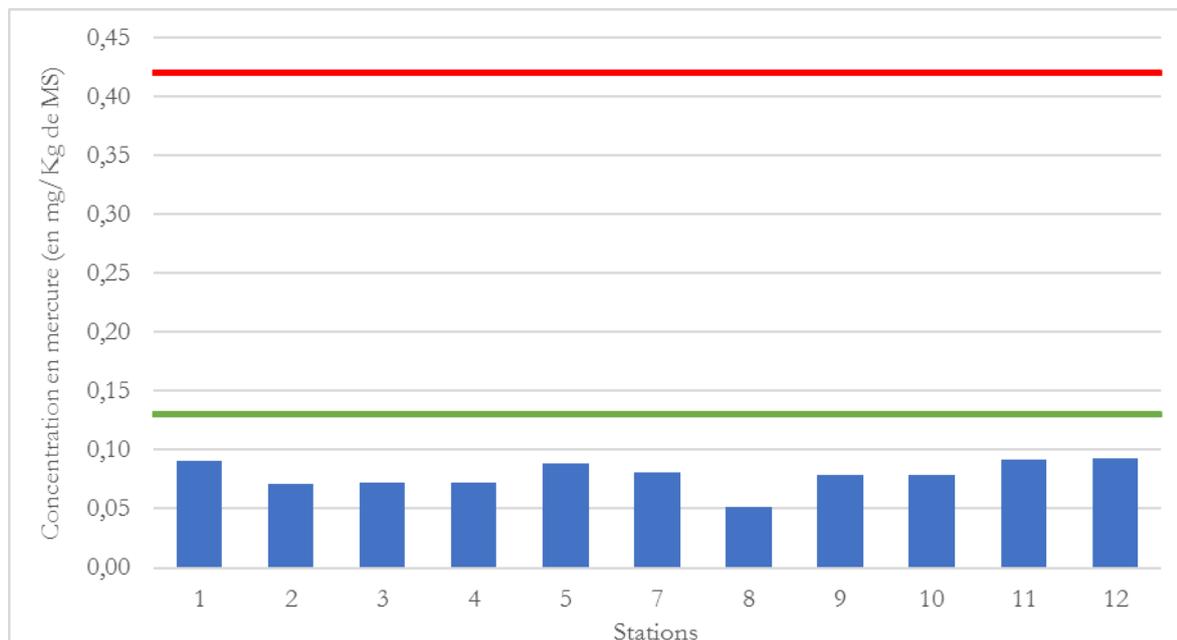
4.2.1.4. Le cuivre



6 stations sur 11 possèdent des concentrations en cuivre inférieures au seuil de *naturalité* (stations 3, 5, 7, 8, 9 et 11). Le minimum a été mesuré à la station témoin 11 (4,38 mg/kg de MS). Les stations 1, 2, 4 et 12 ont des valeurs supérieures à la « *middle naturality* » (10 mg/kg de MS) mais inférieures au seuil d'*altération* (34 mg/kg de MS).

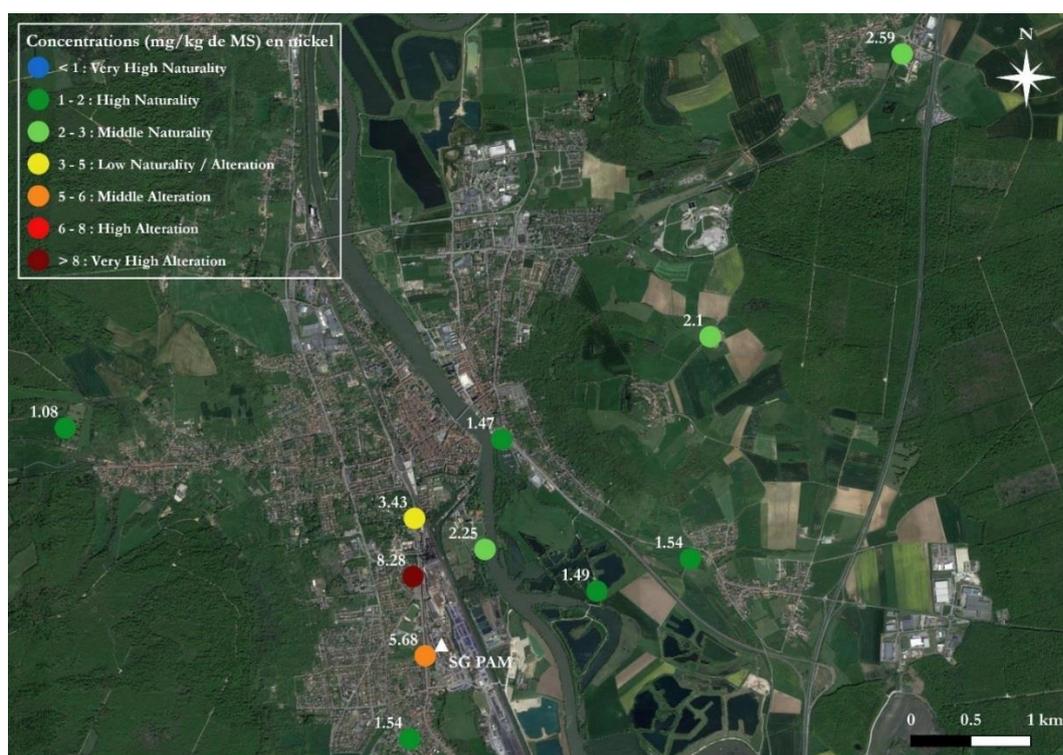
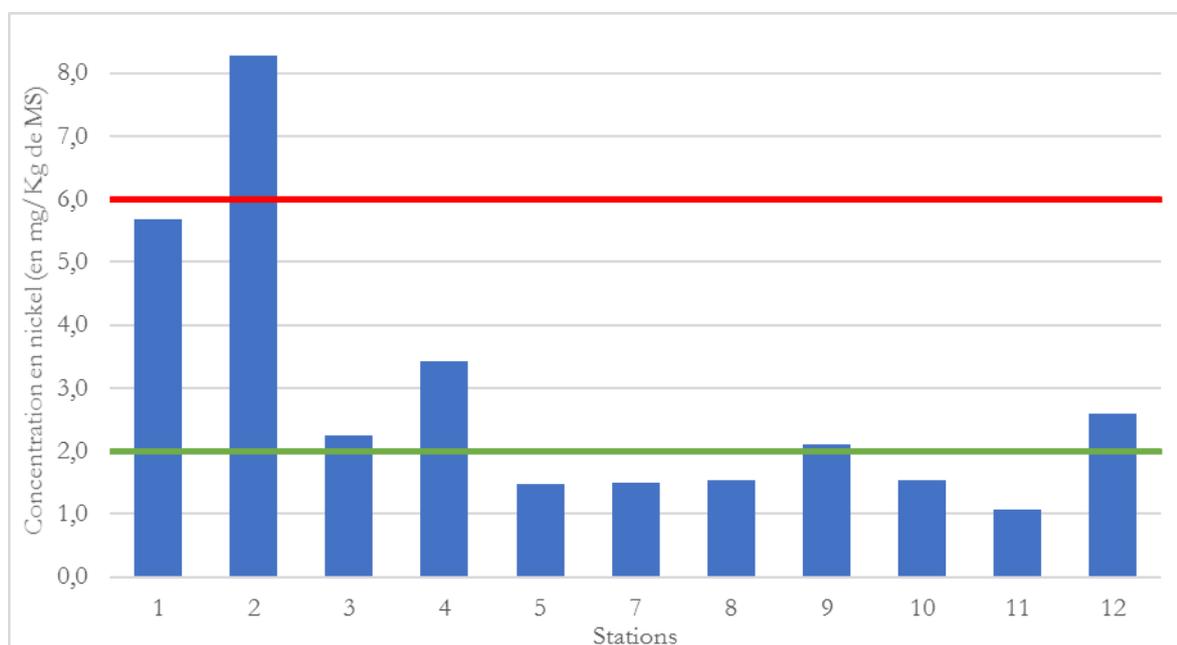
Une concentration particulièrement forte a été trouvée pour la station 10 (43,7 mg/kg de MS). Celle-ci dépasse la limite basse de la classe « *high alteration* » mais pas le percentile 95 établi par ATMO Normandie (187,9 mg/kg de MS).

4.2.1.5. Le mercure



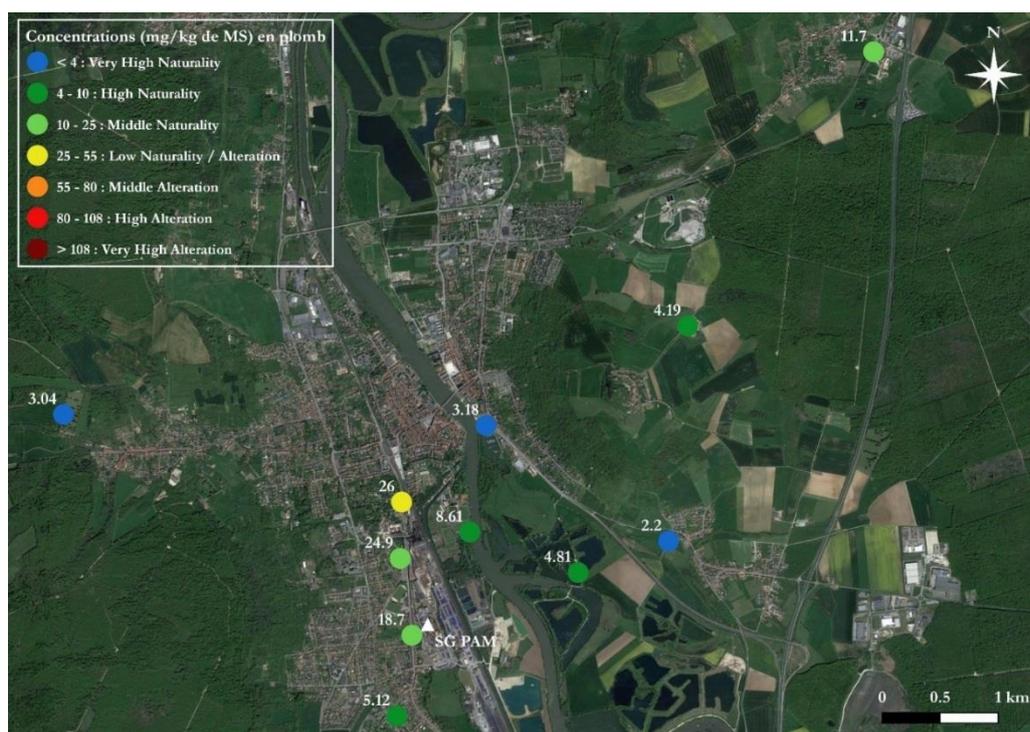
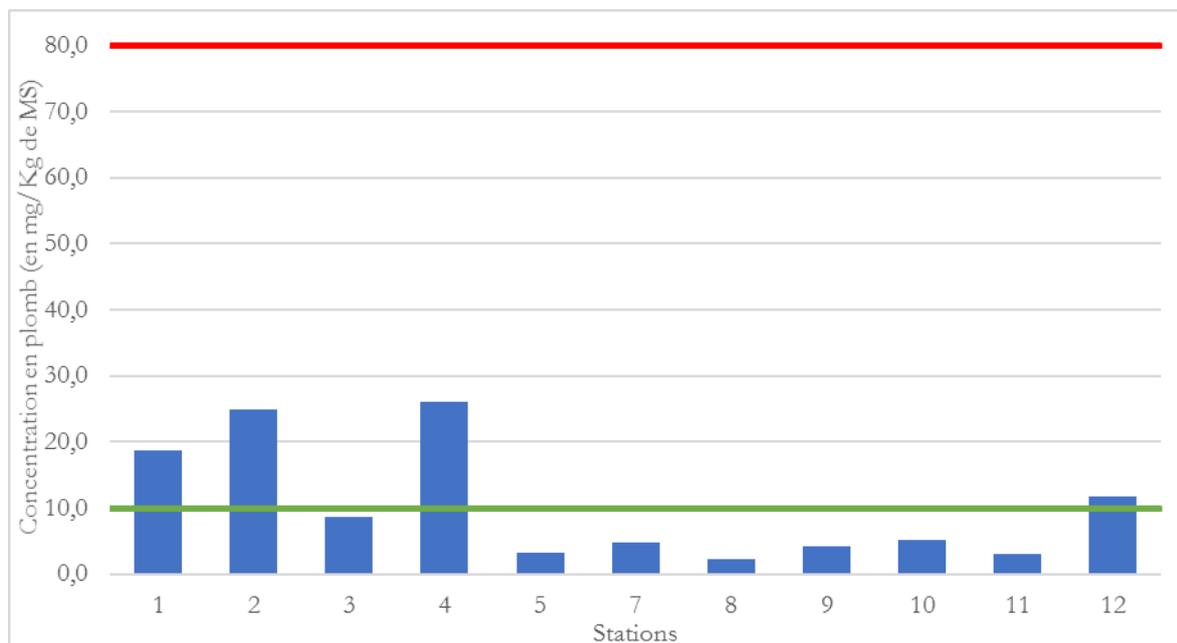
Les concentrations en mercure autour de Saint-Gobain PAM sont toutes en dessous de la limite de « *middle naturality* » (0,13 mg/kg de MS) et donc en dessous du seuil d'*altération* (0,42 mg/kg de MS). Le mercure est le seul ETM mesuré autour de l'usine à avoir ce comportement. Les concentrations sont toutes très proches avec un maximum à 0,093 mg/kg de MS (station 12) et un minimum à 0,052 mg/kg de MS (station 8). 7 concentrations en mercure (stations 1, 5, 6, 9, 10, 11 et 12) se tiennent en 0,020 mg/kg de MS (de 0,073 à 0,093 mg/kg de MS).

4.2.1.6. Le nickel



La concentration en nickel la plus élevée autour de Saint-Gobain PAM a été mesurée à la station 2 (8,28 mg/kg de MS). Cette station se trouve être la seule station au-dessus du seuil d'altération » (6 mg/kg de MS). 5 stations (5, 7, 8, 10 et 11) ont une concentration en dessous de la limite de « middle naturality » (2 mg/kg de MS), avec un minimum pour la station témoin 11 à 1,08 mg/kg de MS.

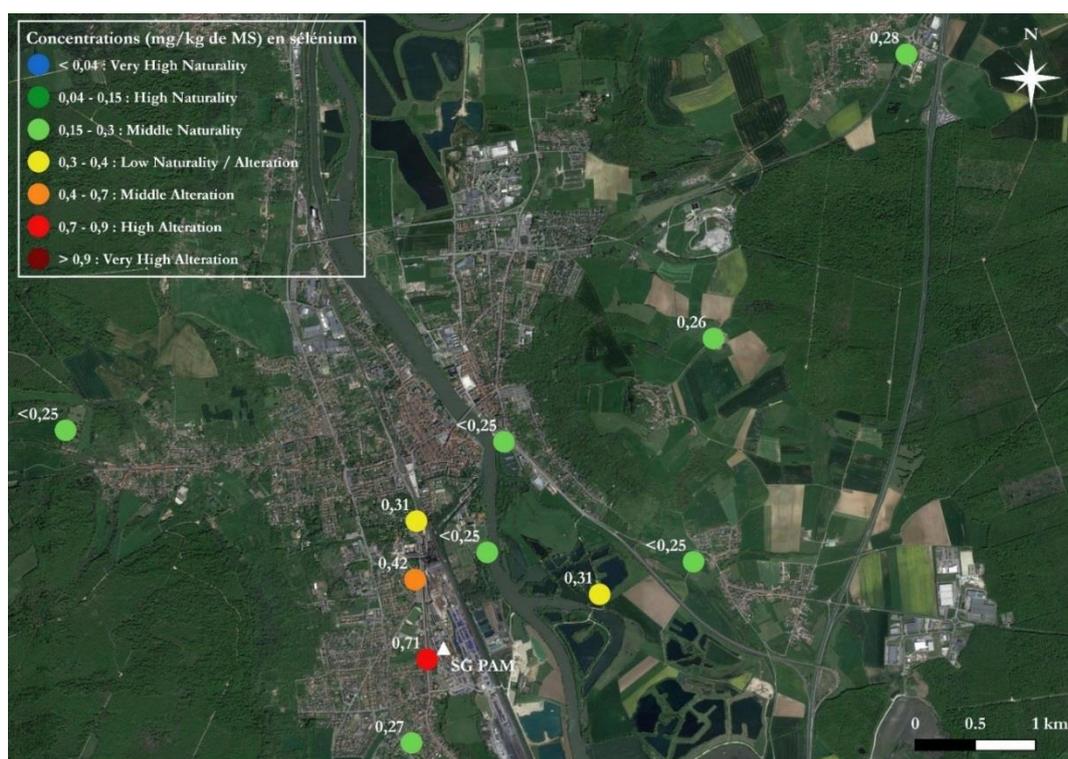
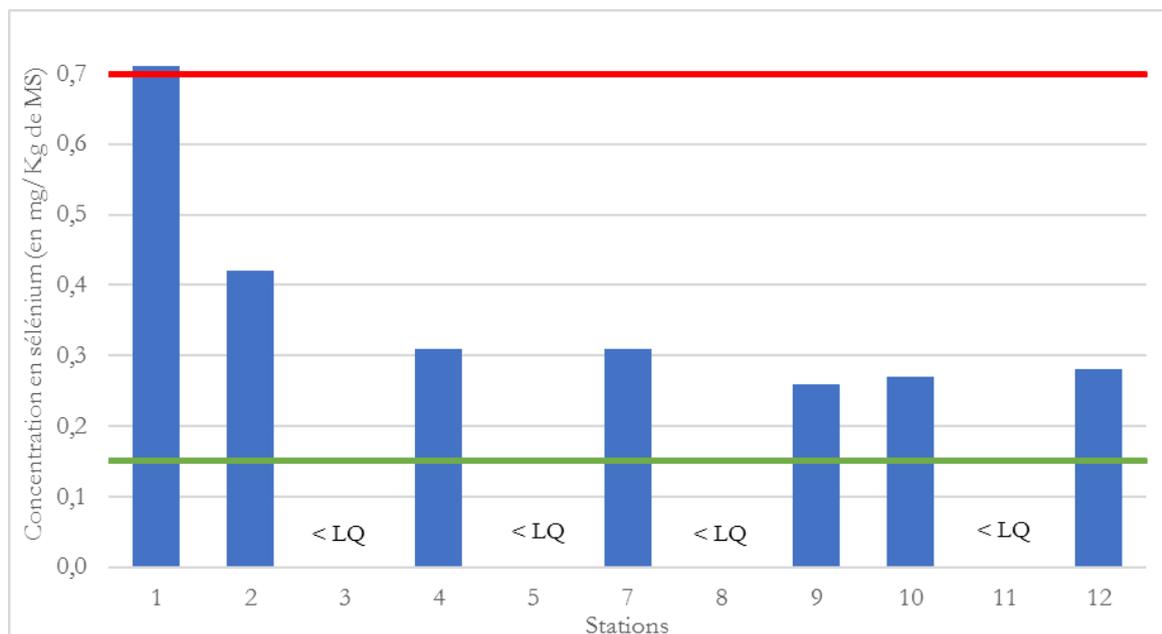
4.2.1.7. Le plomb



Toutes les concentrations en plomb des stations de Saint-Gobain PAM sont très inférieures au seuil d'altération (80 mg/kg de MS), avec un maximum pour la station 4 de 26 mg/kg de MS). 7 des 11 stations (3, 5, 7, 8, 9, 10 et 11) sont en dessous du seuil de *naturalité* (10 mg/kg de MS).

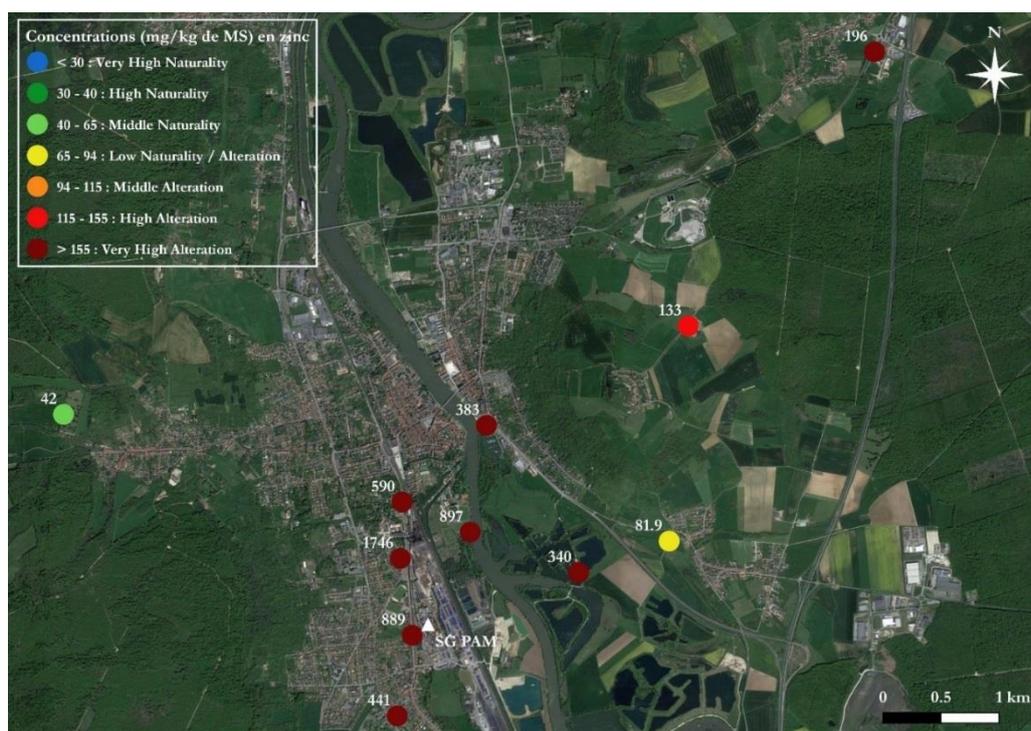
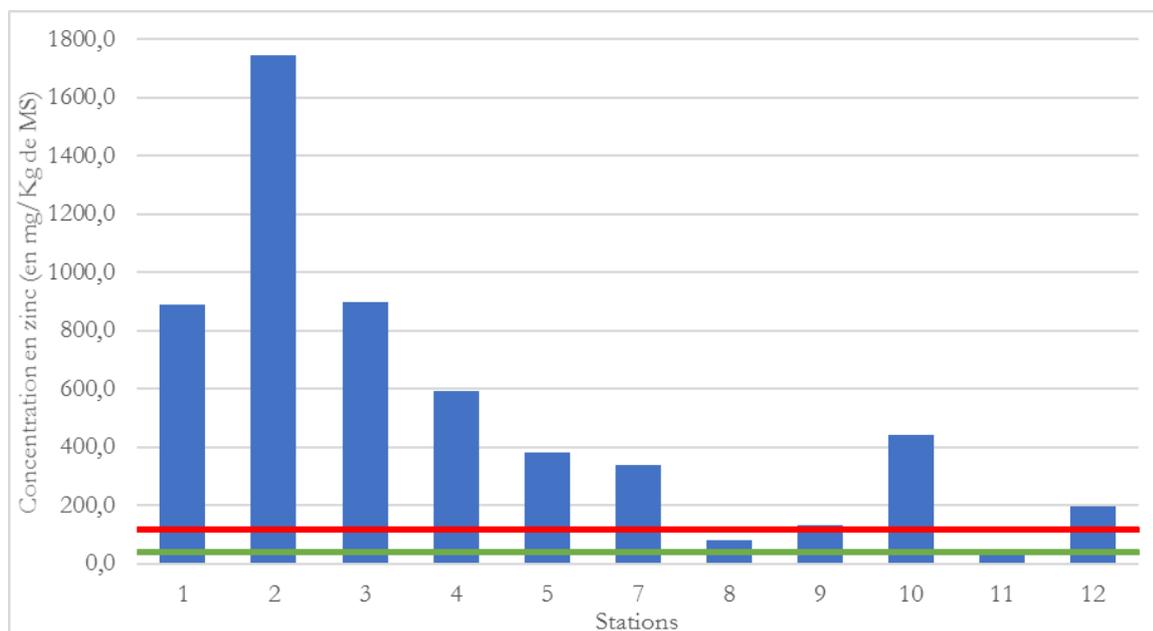
Le minimum des concentrations en plomb se trouve à la station 8 (2,2 mg/kg de MS). Avec une moyenne de 10,22 mg/kg de MS, les concentrations de Saint-Gobain PAM sont inférieures à celles mesurées dans le bassin industriel du Luxembourg (moyenne de 37,87 mg/kg de MS) (Hissler *et al.*, 2008).

4.2.1.8. Le sélénium



Le sélénium est le seul ETM où des mesures (stations 3, 5, 8 et 11) ont été inférieures à la limite de quantification (<0,25 mg/kg de MS). Toutes les autres stations ont une concentration supérieure au seuil de *naturalité*, qui est inférieure à la limite de quantification (0,15 mg/kg de MS). Ainsi, une station avec une concentration plus faible que le seuil de *naturalité* n'a pas pu être détectée. La station 1, qui a le maximum en sélénium dans les lichens (0,71 mg/kg de MS) possède une concentration supérieure au seuil d'*altération* (0,7 mg/kg de MS).

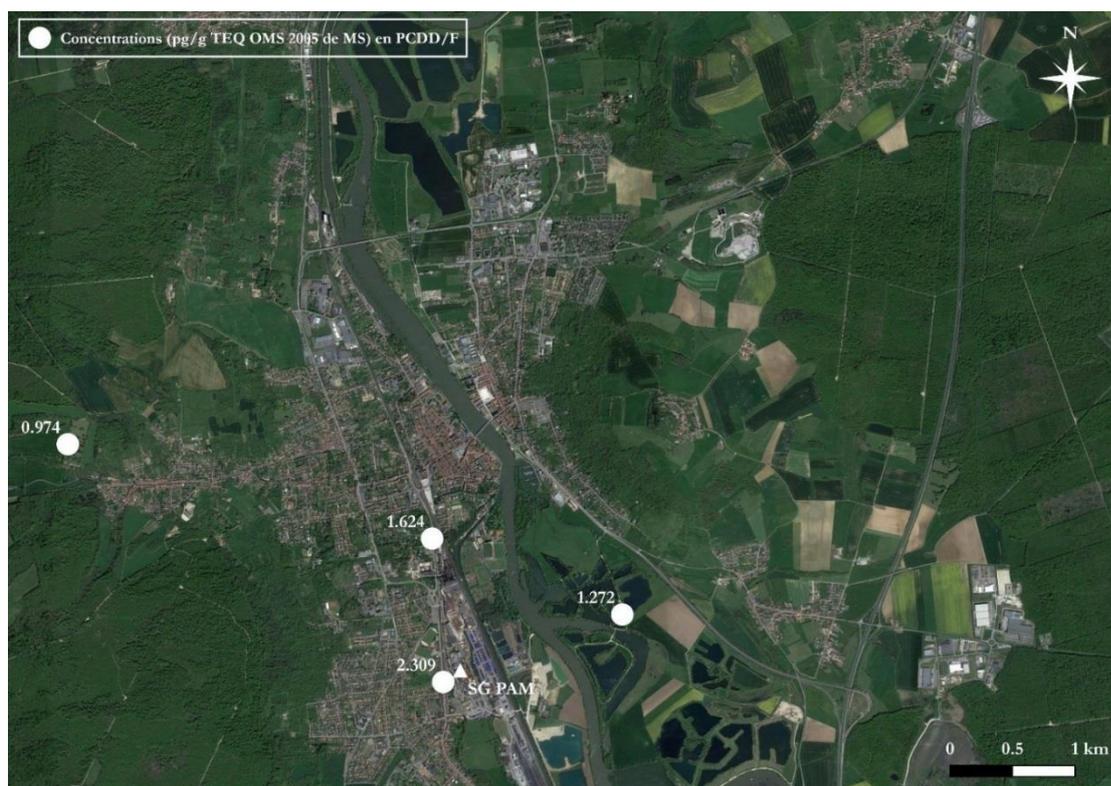
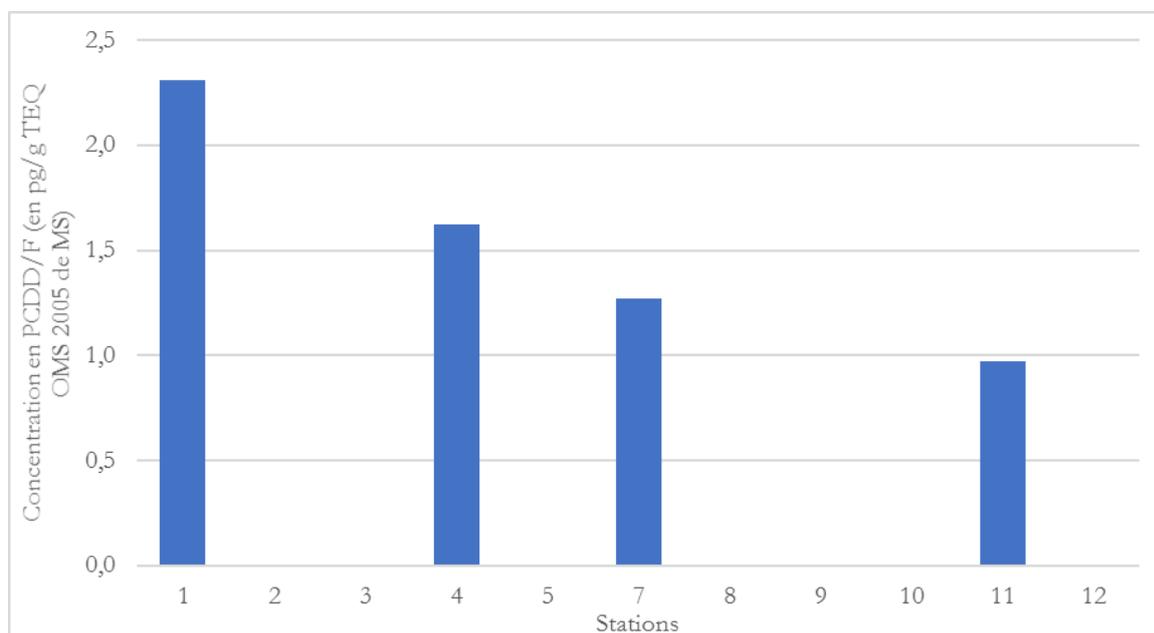
4.2.1.9. Le zinc



8 stations sur 11 (1, 2, 3, 4, 5, 7, 10 et 12) ont une concentration en zinc supérieure au seuil d'*altération* (115 mg/kg de MS) mais également à la classe « *very high alteration* » de l'échelle de Nimis & Bargagli (155 mg/kg de MS). Les stations 1, 2 et 3 ont également des valeurs supérieures au percentile 95 régional de Normandie (591, 2 mg/kg de MS).

Le maximum en zinc a été mesuré à la station 2 (1 746 mg/kg de MS). A contrario, le minimum est pour la station témoin 11 (42 mg/kg de MS). Cette dernière valeur est cependant supérieure au seuil de *naturalité* (40 mg/kg de MS).

4.2.2. Les dioxines et furanes



Seules 4 stations ont été analysées pour les PCDD/F (stations 1, 4, 7 et 11). Le maximum des concentrations (2,309 pg/g TEQ OMS 2005 de MS) a été mesuré à la station 1 et le minimum à la station témoin 11 (0,974 pg/g TEQ OMS 2005 de MS). L'ensemble des valeurs sont inférieures au percentile 95 de Normandie (13,1 pg/g TEQ OMS 2005 de MS).

4.2.3. Résumé

Hormis le zinc qui possède de nombreuses stations (stations 1, 2, 3, 4, 5, 7, 10 et 12) avec une concentration plus élevée que le seuil d'*altération*. 4 autres ETM (Cr, Cu, Ni et Se) ont une à deux valeurs supérieures à ce même seuil. Le mercure est le seul élément inventorié avec des concentrations toutes inférieures au seuil de *naturalité*. Enfin, des valeurs plus élevées à la station 12 par rapport aux autres stations éloignées de l'usine de Saint-Gobain ont été mesurées pour le chrome, le cuivre, le nickel, le plomb et le zinc.

4.3. CONCENTRATIONS PAR STATIONS

Le Tableau 13 classe les différentes stations selon leurs concentrations en ETM et PCDD/F. Il permet de distinguer les stations qui ont eu pour plusieurs polluants des teneurs élevées ou faibles dans les lichens.

Tableau 13 : Classement croissant des stations pour chaque polluant mesuré autour de l'usine de Saint-Gobain PAM.

ETM	Station avec la concentration la plus faible vers la plus forte										
	Min	→								Max	
As	5	3	8	11	7 - 10		12	4	9	2	1
Cd	8	9	11	7	3	10	5	12	2	4	1
Cr	11	10	8	5	7	3	9	4	12	2	1
Cu	11	3	8	7	9	5	4	2	12	1	10
Hg	8	2	3 - 4		9 - 10		7	5	1	11	12
Ni	11	5	7	8 - 10		9	3	12	4	1	2
Pb	8	11	5	9	7	10	3	12	1	2	4
Se	3 - 5 - 8 - 11			9	10	12	4	7	2	1	
Zn	11	8	9	12	7	5	10	4	1	3	2
PCDD/F	Min	→								Max	
	11	7				4			1		

Ainsi, on observe que 4 stations (station 1, 2, 4 et 12) possèdent les concentrations en ETM les plus fortes dans les lichens autour de Saint-Gobain PAM (sauf pour le mercure). Pour aller plus loin, 6 éléments (As, Cd, Cr, Ni, Se et Zn) présentent un maximum de concentration mesuré à la station 1 ou 2, situées au plus près du site industriel.

A contrario, les stations 8 et 11 se retrouvent pour la plupart des ETM dans les stations avec les plus faibles concentrations dans les lichens. Le mercure a un comportement particulier car la station 11 (station témoin) a la seconde plus forte valeur alors que la station 2 a quant à elle la deuxième plus basse concentration. Ce résultat peut être à nuancer par le fait que les concentrations en mercure autour de Saint-Gobain PAM ne varient pas beaucoup (coefficient de variation de 15,41%).

Pour les PCDD/F, on constate une diminution des concentrations dans les lichens en fonction de l'éloignement de la station avec l'usine de Saint-Gobain PAM. Le minimum se retrouve à la station témoin 11 alors que le maximum a été mesuré à la station 1, localisée aux abords de l'usine.

En résumé, les concentrations les plus élevées en ETM et PCDD/F (sauf pour le mercure) ont été mesurées aux stations les plus proches de Saint-Gobain PAM ou à la station 12 (station trafic). A l'opposé, les stations 8 et 11 présentent les concentrations les plus faibles mesurées dans les lichens.

4.4. COMPARAISON AVEC L'ÉTUDE RÉALISÉE AUTOUR DE LA CENTRALE THERMIQUE DE BLÉNOD-LÈS-PONT-A-MOUSSON EN 2014

En 2014, une étude de bioaccumulation a eu lieu autour de la centrale thermique de Blénod-lès-Pont-à-Mousson, située à environ 2,7km au sud-est de Saint-Gobain PAM. Les mesures ont été réalisées sur des mousses terrestres ; il est donc impossible de comparer les valeurs obtenues lors de cette étude avec celles mesurées autour de Saint-Gobain PAM. Cependant, les résultats obtenus sur certaines stations peuvent être confrontés aux données de l'étude 2019 sur les lichens (Varin, 2014).

Les stations 2, 3 et 12 de l'étude de 2014 se situent à proximité de l'usine de Saint-Gobain ou dans le sens des vents dominants (Figure5).



Figure 15 : Localisation des stations de prélèvements des mousses de l'étude réalisée en 2014 autour de la centrale thermique de Blénod-lès-Pont-à-Mousson (Varin, 2014).

Ces trois stations sont les seules parmi les 18 points de prélèvements autour de la centrale thermique à avoir eu une concentration en zinc, dans les mousses, supérieure au seuil atypique⁵ pour cet élément défini dans le programme BRAMM. La teneur en zinc à la station 12 a été de 370,1 mg/kg de MS de mousse alors que le seuil atypique était de 54,85 mg/kg de MS.

Les concentrations pour les stations 17 et 18, localisées à proximité de l'orientation des vents dominants, étaient au-dessus de la valeur médiane et proches du seuil atypique. Dans cette étude, l'auteur exclut la

⁵ Lorsqu'une concentration dans une mousse dépasse le seuil atypique, on considère alors que la station est influencée par des retombées atmosphériques en métaux. La valeur du seuil utilisée dans l'étude autour de la centrale thermique provient de la campagne nationale BRAMM (Meyer et al., 2018).

centrale thermique comme origine de ces concentrations élevées, et suggère la présence d'une ou d'autre(s) source(s) d'émissions de zinc.

En résumé, l'impact des émissions en zinc de Saint-Gobain PAM a potentiellement pu être perceptible, en 2014, autour de la centrale thermique de Blénod-lès-Pont-à-Mousson. De plus, ces valeurs élevées mesurées dans les mousses terrestres sont cohérentes avec les résultats de l'étude de 2019 dans les lichens.

4.5. GRADIENT DE CONCENTRATION

Un des objectifs de l'étude a été de voir si un gradient de concentration existe entre l'usine de Saint-Gobain PAM et les zones plus éloignées du site industriel. Le postulat de départ a été de supposer que plus on s'éloigne de l'usine, moins les retombées atmosphériques en provenance de l'industrie sont importantes et plus les concentrations en ETM et PCDD/F dans les lichens, potentiellement associées à Saint Gobain, sont faibles.

Afin de tester la relation entre les concentrations dans les lichens en polluants et la distance depuis Saint-Gobain PAM, des tests de corrélation de Spearman (ρ) ont été effectués car la normalité des valeurs n'était pas remplie (test de Shapiro-Wilk) (cf. Annexe 5).

4.5.1. Les éléments traces métalliques

Lorsque l'on prend l'ensemble de la zone d'étude, une corrélation linéaire apparaît uniquement pour le zinc ($\rho = -0,86$, $p\text{-value} = 0,0013$). Ainsi, plus on se rapproche de l'usine de Saint-Gobain PAM, plus les lichens vont avoir des concentrations en zinc élevées. Pour tous les autres éléments, les tests de corrélation n'ont pas été significatifs ($p\text{-value}$ supérieure à 0,05).

Cependant, la station 12 (station trafic, à 6,3 km de l'usine) située à une distance importante de Saint-Gobain PA et donc hors de l'influence de l'usine présente des valeurs en cuivre, plomb et zinc (témoins des émissions du trafic routier) plus élevées.

Ainsi, lorsque l'on retire cette station, **6 des 9 ETM mesurés (Cd, Cu, Ni, Pb, Se et Zn) obtiennent des p-values significatives pour les tests de corrélation** (Tableau 14). Le coefficient de corrélation linéaire pour ces éléments est supérieur à -0,72, avec un coefficient de corrélation proche de -0,9 pour le zinc (Figure 16).

Tableau 14 : Résultats des tests de corrélation entre les concentrations dans les lichens et la distance de Saint-Gobain PAM (sans la station 12).

Les coefficients en gras sont ceux avec une $p\text{-value}$ significative ($< 0,05$).

ETM	ρ	p-value
As	-0,47	0,166
Cd	-0,78	0,012
Cr	-0,6	0,073
Cu	-0,72	0,024
Hg	0,17	0,637
Ni	-0,73	0,017
Pb	-0,79	0,01
Se	-0,81	0,05
Zn	-0,89	0,001

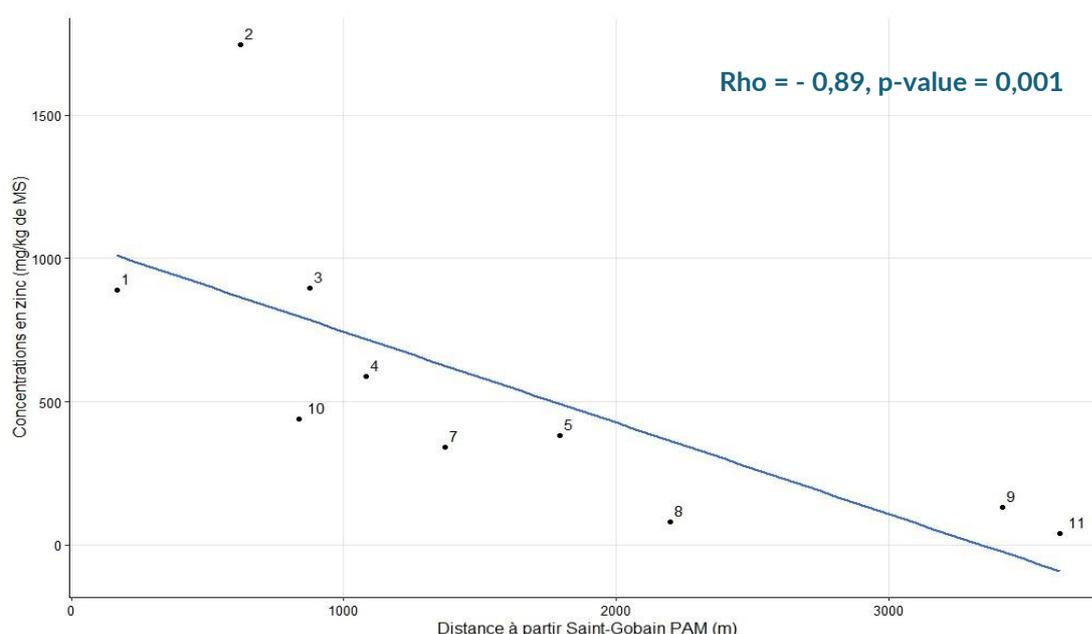


Figure 16 : Concentrations en zinc dans les lichens (mg/kg de MS) en fonction de la distance des stations (m) depuis Saint-Gobain PAM.

Les trois ETM à ne pas avoir une p-value significative, sont l'arsenic, le chrome et le mercure. Les deux premiers malgré des concentrations qui diminuent dans les stations éloignées de Saint-Gobain PAM, ont une valeur importante pour la station 9 (à 3,4km de l'usine).

Le coefficient de corrélation du mercure est faible, indiquant des valeurs presque similaires sur l'ensemble de la zone d'étude et proche de celle relevée sur le site témoin (station 11). Il est à noter que cet élément est le seul ETM gazeux.

4.5.2. Les dioxines et furanes

Avec un coefficient de corrélation de Spearman égal à -1 et une p-value proche de 0,05 (0,08), les concentrations en PCDD/F ont tendance à diminuer à mesure que l'on s'éloigne de l'usine de Saint-Gobain PAM (Figure 17).

Un impact des émissions de la zone urbaine (secteur résidentiel) est cependant probable au regard de la contribution relative de Saint-Gobain PAM aux émissions de dioxines et furanes de la zone d'étude (17%). Les stations 1 et 4 sont situées dans les communes de Blénod-lès-Pont-à-Mousson et Pont-à-Mousson alors que les stations 7 et 11 présentent des environnements ruraux.

Un nombre de stations plus important sur la zone d'étude aurait peut-être permis de constater des différences qui ne transparaissent pas dans les résultats de l'étude.

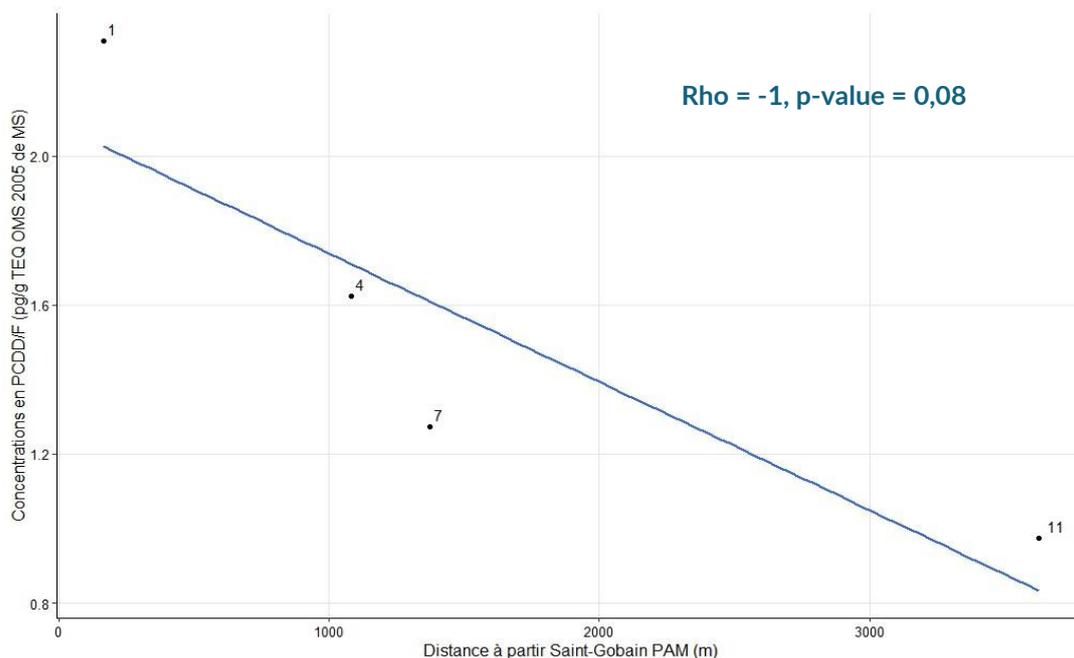


Figure 17 : Concentrations en PCDD/F (pg/g TEQ OMS 2005) en fonction de la distance (m) depuis Saint-Gobain PAM.

4.5.3. Résumé

Un gradient de concentration existe autour de l'usine de Saint-Gobain PAM pour le zinc et dans une moindre mesure plusieurs autres ETM (Cd, Cu, Ni, Pb, Se et Zn) et pour les dioxines et furanes.

Il est à noter, cependant, que seule la distance depuis le site industriel a été étudiée, des paramètres plus complexes tels que le vent ou le relief par exemple ont un rôle lors de phénomènes aériens de dispersion des polluants.

4.6. RELATIONS ENTRE LES CONCENTRATIONS EN ÉLÉMENTS TRACES MÉTALLIQUES

La matrice de corrélation suivante présente les coefficients de corrélation de Spearman entre les concentrations en ETM dans les lichens, inventoriés autour de l'usine de Saint-Gobain PAM (Tableau 15). La station 12, sous influence trafic, a été retirée des données traitées.

Tableau 15 : Matrice de corrélation des concentrations en ETM dans les lichens. Les coefficients en gras sont ceux avec une p-value significative (< 0,05).

	As	Cd	Cr	Cu	Hg	Ni	Pb	Se	Zn
As	1,00								
Cd	0,43	1,00							
Cr	0,71	0,62	1,00						
Cu	0,59	0,71	0,44	1,00					
Hg	0,01	0,14	-0,20	-0,03	1,00				
Ni	0,69	0,57	0,88	0,51	-0,49	1,00			
Pb	0,60	0,81	0,76	0,59	-0,22	0,81	1,00		
Se	0,60	0,81	0,78	0,26	0,15	0,64	0,61	1,00	
Zn	0,35	0,77	0,70	0,54	-0,30	0,80	0,87	0,84	1,00

Des relations fortes ont été trouvées : Cr-Ni (0,88), Pb-Zn (0,87), Se-Zn (0,84) ou Ni-Pb (0,81), Cd-Pb (0,81) et Cd-Se (0,81). Le zinc est corrélé fortement avec de nombreux ETM tel que le cadmium, le chrome, le nickel, le plomb et le sélénium. Ces différentes corrélations positives indiquent une augmentation proportionnelle des concentrations dans les lichens de ces polluants, provenant vraisemblablement de ou de (s) même (s) source(s) d'émissions.

Au contraire, le mercure n'est corrélé avec aucun autre ETM.

Le cuivre qui est un témoin du trafic routier, n'est corrélé significativement qu'avec le cadmium (0,71), qui est un ETM émis faiblement également dans ce secteur (Branchu *et al.*, 2013). La part des émissions de cuivre de l'usine de Saint-Gobain PAM dans celles de Blénod-lès-Pont-à-Mousson et Pont-à-Mousson représente 76,7%. Le cuivre est le seul ETM sur ces deux communes à être émis à plus de 20% par d'autres secteurs d'activités, notamment le transport routier (6,8%) et les autres modes de transport (16,2%).

Une valeur en cuivre de 43,7 mg/kg de MS a été mesurée à la station 10, située au sud-ouest de l'usine de Saint-Gobain PAM. Celle-ci se trouve être élevée par rapport à la médiane des concentrations (7,75 mg/kg de MS) mais aussi par l'ensemble des valeurs trouvées pour les autres ETM. Il n'y a pas d'explication plausible pour justifier cette valeur forte.

4.7. ANALYSE FACTORIELLE (ACP)

Une analyse factorielle en composantes principales (ACP) a été réalisée avec l'ensemble des données de la zone d'étude afin de confirmer certaines relations entre ETM et éventuellement de discriminer les stations (Annexe 5). Suggérée par Reimann *et al.* (2008), et utilisée par exemple par Ayari *et al.* (2016), les données ont subi une transformation « *centred log ratio transformation* » (fonction « *clr* » du package « *rgr* » sur Rstudio), pour permettre de plus facilement visualiser les associations de polluants. Le pourcentage d'informations représenté par cette analyse est de 66,8% (Figure 18)⁶.

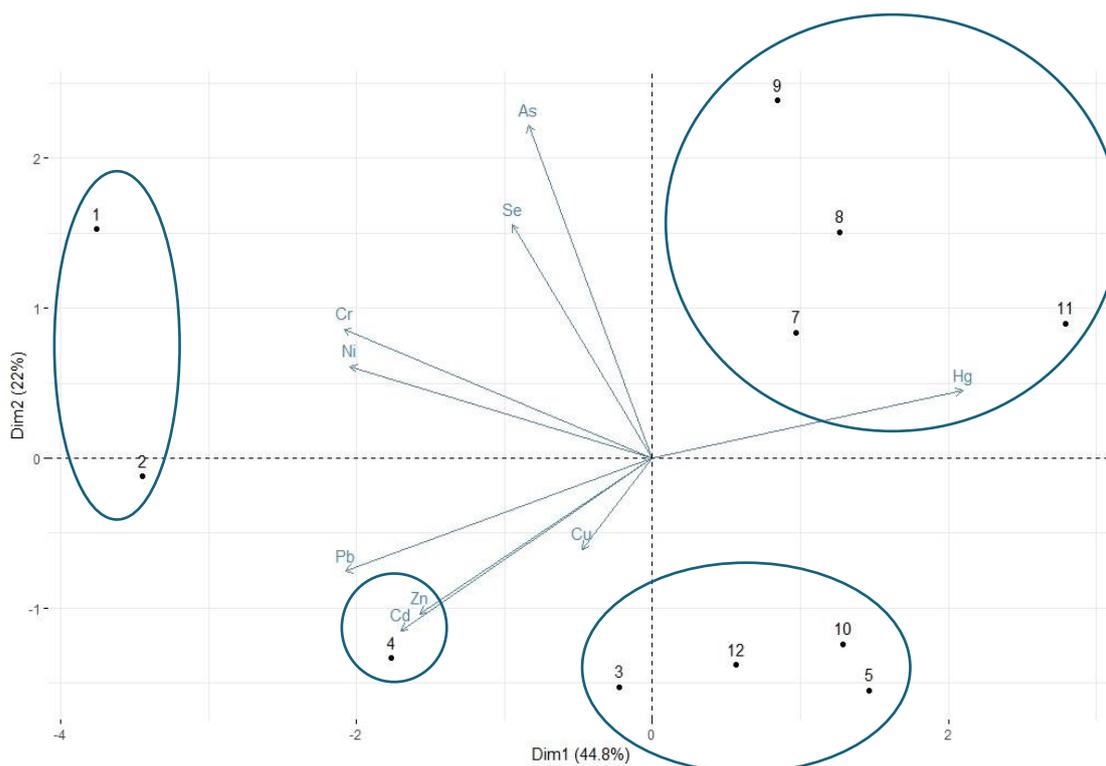


Figure 18 : Résultats de l'analyse en composantes principales autour de Saint-Gobain PAM.

On peut observer des corrélations entre plusieurs ETM : Cr-Ni, Cd-Pb-Zn et As-Se.

L'axe 1 des abscisses se sépare entre la grande majorité des ETM (à gauche) et le mercure (à droite). Lorsque l'on regarde le positionnement des stations par rapport à cet axe, on retrouve à chacune des extrémités, les stations à proximité de l'usine (stations 1 et 2) et la station témoin 11. Ainsi, la distribution des stations selon l'axe 1 se fait par rapport à l'impact des émissions de Saint-Gobain PAM sur les concentrations dans les lichens des différentes stations.

L'axe 2 des ordonnées semble quant à lui être lié au trafic routier et non-routier (ferroviaire notamment) avec l'association du plomb, zinc, cadmium et dans une moindre mesure le cuivre. Une répartition verticalement des stations selon l'axe 2 peut être visible en fonction de l'influence du trafic routier et ferroviaire sur les stations.

⁶ Les valeurs en sélénium en-dessous de la limite de quantification ont été remplacées par la valeur de limite de quantification divisée par 2, soit 0,125.

A partir de cette analyse factorielle, il est possible de répartir l'ensemble des stations selon plusieurs groupes (Ratier, 2015). Autour de Saint-Gobain PAM, on peut observer 4 groupes :

- **Les stations 7, 8, 9 et 11 sont peu impactées par les émissions de Saint-Gobain PAM** et par le trafic routier et ferroviaire. Ces stations font parties des points de prélèvements les plus éloignés et sont situées dans des zones rurales ;
- **Les stations 3, 5, 10 et 12 sont des sites influencés fortement par le trafic routier et ferroviaire**, avec la présence à proximité des stations d'une route avec un trafic important et/ou d'une ligne de chemin de fer ;
- **Le station 4 est, à l'inverse des premières stations citées, impactée par les émissions de Saint-Gobain PAM et par le trafic routier et/ou ferroviaire ;**
- **Les stations 1 et 2 sont deux stations fortement influencées par les rejets atmosphériques de l'usine.** Un impact du trafic routier est cependant possible pour ces deux stations car les sites sont localisés à proximité d'une avenue au trafic routier soutenu. Celui-ci peut être masqué par les retombées atmosphériques élevées près de l'usine.

Les résultats de l'ACP suggèrent à nouveau la présence d'une source d'émissions commune pour la grande majorité des ETM. Les concentrations de cuivre, de plomb et de cadmium dans les lichens semble être liées en partie au trafic routier présent sur la zone d'étude.

Les valeurs en mercure sont singulières sur la zone d'étude, pouvant être éventuellement liées à des phénomènes de dispersion particuliers, une source d'émissions différente des autres polluants et constante sur toute la zone d'étude, des processus de bioaccumulation dans les lichens distincts des autres métaux lourds, etc.

5. CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Cette étude avait pour but d'évaluer la faisabilité d'évaluer les retombées atmosphériques en ETM et PCDD/F autour de Saint-Gobain PAM et d'identifier l'influence de l'usine sur son environnement à l'aide de la bioaccumulation.

5.1. LES ÉLÉMENTS TRACES MÉTALLIQUES

5.1.1. Comparaison avec l'échelle de Nimis & Bargagli (1999)

Le même profil a été obtenu avec 6 éléments traces métalliques (l'arsenic, le cadmium, le chrome, le nickel, le plomb et le sélénium). La majorité des concentrations dans les lichens sont inférieures aussi bien au seuil d'altération de l'échelle de Nimis & Bargagli (1999) qu'aux valeurs pouvant être trouvées dans des zones industrialo-portuaires (Dron *et al.*, 2016 et Occelli *et al.*, 2013). Cependant, les concentrations sont globalement supérieures au seuil de *naturalité*. Ces résultats suggèrent ainsi la présence d'un environnement pollué autour de l'usine de Saint-Gobain PAM.

Les concentrations dans les lichens en mercure sont faibles. Elles sont toutes inférieures au seuil de *naturalité* de l'échelle italienne.

En revanche, 75% concentrations de zinc mesurées dans les lichens sont supérieures au seuil d'altération haut.

5.1.2. Gradient de concentrations

Pour la majorité des ETM, les stations avec les plus fortes concentrations se trouvent aux abords de l'usine de Saint-Gobain PAM (stations 1, 2 ou 4). Dans le même sens, un gradient de concentration a été mis en évidence, montrant qu'à mesure que l'on s'éloigne du site industriel, les concentrations d'ETM dans les lichens ont tendance à diminuer.

Les différentes corrélations entre ETM suggèrent la présence d'une origine commune pour ces polluants, qui s'avère, aux vues des résultats et des analyses effectuées, être manifestement l'usine de Saint-Gobain PAM.

Les résultats de l'ACP ont également mis en avant une influence notable du trafic routier sur la zone d'étude. Les concentrations de cuivre, de plomb et de cadmium dans les lichens semble être liées en partie au trafic routier présent sur la zone d'étude.

- La présence de la station 12 dans l'étude avait pour idée d'évaluer l'influence du trafic routier sur la zone d'étude. Ce point de prélèvement s'est retrouvé régulièrement dans les stations avec les concentrations en polluants les plus fortes notamment pour le cuivre, le plomb et le zinc, indiquant la présence d'une source de pollution conséquente à proximité de la station.
- Le cuivre, polluant émis par le transport routier et le trafic ferroviaire, est peu corrélé avec les autres polluants. Ainsi, sur la zone d'étude, le trafic routier et ferroviaire semble avoir une influence sur les concentrations en polluants dans les lichens.

Cas du zinc

Le zinc, ETM le plus émis dans l'air par le site industriel, a été mesuré avec des teneurs extrêmement élevées dans les lichens, largement supérieures aux niveaux de concentrations mesurées dans différentes études réalisées en France et en Europe. L'étude réalisée en 2014 sur des mousses terrestres autour de la centrale thermique de Blénod-lès-Pont-à-Mousson avait mesuré également des valeurs importantes en zinc autour de Saint-Gobain PAM et sur les stations situées dans le sens des vents dominants depuis l'usine (Varin, 2014).

L'ensemble des concentrations élevées pour cet ETM viennent corroborer le fait que l'usine de Saint-Gobain PAM a une influence notoire sur la zone d'étude. Dans cette optique, le zinc peut être considéré comme un bon indicateur de l'impact de l'industrie sur son environnement proche.

Cas du mercure

Ce polluant a un comportement particulier car il n'est corrélé à aucun polluant et possède des concentrations très proches sur l'ensemble de la zone d'étude. Les concentrations mesurées dans les lichens autour de l'usine sont équivalentes aux niveaux de fond rural.

5.2. LES DIOXINES ET FURANES

Les dioxines et furanes ont eu dans les lichens des concentrations inférieures aux valeurs de toutes les études auxquelles elles ont été comparées. L'origine des PCDD/F de la zone d'étude peut être liée à Saint-Gobain PAM et/ou au secteur résidentiel.

5.3. PERSPECTIVES

Concernant la faisabilité de mesurer les teneurs en polluants accumulées par certains organismes (bioaccumulation) pour évaluer les retombées atmosphériques, la mise en œuvre de la norme NF X43-904 a permis de d'intégrer le protocole d'échantillonnage et de prélèvement de lichens épiphytes et d'atteindre les concentrations en contaminants.

Concernant l'évaluation des retombées autour de Saint Gobain à Pont à Mousson, des résultats sur le long terme permettraient d'observer les éventuelles évolutions en polluants dans les lichens. Cette étude pourra être renouvelée en conservant les mêmes sites de collecte utilisés en 2019. Une période de 5 ans entre deux études semble être un bon compromis afin de percevoir des changements mais aussi de laisser le temps aux lichens de recoloniser les écorces des arbres.

Concernant l'évaluation à d'autres sites d'études

Afin d'étudier l'imprégnation de l'environnement par les polluants et d'en suivre l'évolution spatiale et temporelle, l'utilisation de la norme NF X43 904 pourrait-être envisagée à d'autres sources d'émissions d'ETM et PCDD/F (Usines d'incinération des déchets, carrières, centrales thermiques et/ou nucléaires, zones agricoles intensives, complexes industriels, etc.)

6. RÉFÉRENCES

- AFNOR. (2013). *NF X43-904 – Biosurveillance de l'air – Biosurveillance passive de la qualité de l'air à l'aide de lichens autochtones : de la récolte à la préparation des échantillons*, 19 pp.
- AFL. (s.d.). *Xanthoria parietina*. En ligne sur le site : http://www.afl-lichenologie.fr/Photos_AFL/Photos_AFL_X/Xanthoria_parietina.htm
- Agnan Y. (2013). *Bioaccumulation et bioindication par les lichens de la pollution atmosphérique actuelle et passée en métaux et en azote en France : sources, mécanismes et facteurs d'influence*. (Thèse de doctorat). Université de Toulouse, Toulouse.
- Armstrong R. A. & Bradwell T. (2011). *Growth of foliose lichens: a review*. Symbiosis, n°53, 1-16.
- Arrêté préfectoral n°2010/341 actualisant les conditions d'autorisation applicables à l'usine de fabrication de tuyaux et pièces de voirie en fonte exploitée par la société Saint-Gobain à Pont-à-Mousson et Blénod-lès-Pont-à-Mousson (2010). Préfet de Meurthe-et-Moselle, 110 pp.
- ATMO Normandie. (2018). *Mesure des retombées atmosphériques autour des incinérateurs de la ZI de Rouen (2016-2017)*, 45 pp.
- ATMO Nouvelle-Aquitaine. (2017). *UVE d'Echillais – Etude de l'impact des rejets atmosphériques de l'UVE*, 41 pp.
- ATMO Occitanie. (2018). *Surveillance de la qualité de l'air – Environnement de l'Unité de Valorisation Énergétique des Déchets (UVED) de Lunel-Viel (34) – Synthèse annuel 2017*, 14 pp.
- Augusto S., Pinho P., Branquinho C., Pereira M.J., Soares A. & Catarino F. (2004). *Atmospheric dioxin and furan deposition in relation to land-use and other pollutants: A survey with lichens*. Journal of Atmospheric Chemistry, n°49, 53-65.
- Augusto S., Pinho P., Santos A., Botelho A. J., Palma-Oliveira J. & Branquinho C. (2015). *Declining trends of PCDD/Fs in lichens over a decade in a Mediterranean area with multiple pollution sources*. Science of the Total Environment, n°508, 95-100.
- Ayari J., Agnan Y. & Charef A. (2016). *Spatial assessment and source identification of trace metal pollution in stream sediments of Oued El Maadene basin, northern Tunisia*. Environmental Monitoring and Assessment, volume 188, n°7, article 397.
- Baumgarten G. (2015). *Suivi des dépôts atmosphériques en métaux lourds et HAP dans l'environnement du Centre de Production Thermique EDF La Maxe par biosurveillance*. 88 pp.
- Branchu P., Badin A-L., Bechet B., Eisenlohr L., Le Priol T., Marseille F. & Trielli E. (2013). *Pollution d'origine routière et environnement de proximité*. Pollutions atmosphériques, transport et agriculture, hors-série n°15. En ligne sur le site : <https://journals.openedition.org/vertigo/12775?lang=en>
- Brunialti G. & Frati L. (2007). *Biomonitoring of nine elements by lichen Xanthoria parietina in Adriatic Italy: A retrospective study over a 7-year time span*. Science of the Total Environment, n°387, 289-300.
- CITEPA. (2017). *Métaux lourds*. En ligne sur le site : <https://www.citepa.org/fr/air-et-climat/polluants/metaux-lourds>
- Daillant O. (2003). *Lichen et accumulation des métaux lourds – Le point après 10 ans de suivi en Bourgogne ... et ailleurs*. Bulletin de l'Association Française de Lichénologie, 13 pp.
- Demiray A. D., Yolcubal I., Akyol N. H. & Çobanoğlu G. (2012). *Biomonitoring of airborne metals using the lichen Xanthoria parietina in Kocaeli Province, Turkey*. Ecological Indicators, n°18, 632-643.
- Dron J., Austruy A., Agnan Y., Ratier A. & Chamaret P. (2016). *Utilisation de la biosurveillance lichénique sur la zone industrialo-portuaire de Fos-sur-Mer : retour sur trois ans de suivi à l'échelle d'un territoire intercommunal*. Pollution atmosphérique, n°228.

- Feurerer T. & Hawksworth D. L. (2007). *Biodiversity of lichens, including a world-wide analysis of checklist data based on Takhtajan's floristic regions*. Biodiversity and Conservation, n°16, 85-98.
- Garrec J-P. & Van Haluwyn C. (2002). *Biosurveillance végétale de la qualité de l'air – Concepts, méthodes et applications*. Editions Tec & Doc, 117 pp.
- Gür F. & Yaprak G. (2011). *Biomonitoring of metals in the vicinity of Soma coal-fired power plant in western Anatolia, Turkey using the epiphytic lichen, Xanthoria parietina*. Journal of Environment Science and Health, n°46, 1503-1511.
- Hissler C., Stille P., Krein A., Geagea M. L., Perrone T., Probst J-L. & Hoffmann L. (2008). *Identifying the origins of local atmospheric deposition in the steel industry basin of Luxembourg using the chemical and isotopic composition of the lichen Xanthoria parietina*. Science of The Total Environment, n°405, 338-344.
- INERIS. (2016). Guide – Surveillance dans l'air autour des installations classées – Retombées des émissions atmosphériques – Impact des activités humaines sur les milieux et la santé, 146 pp.
- INERIS. (s.d.). Portail des substances chimiques. En ligne sur le site : <https://substances.ineris.fr/fr/page/14>
- Kularatne K.I.A & de Freitas C.R. (2013). *Epiphytic lichens as biomonitors of airborne heavy metal pollution*. Environmental and Experimental Botany, n°88, 24-32.
- Meyer C., Soule P., Masson P. & Leblond S. (2018). *Surveillance des retombées atmosphériques par analyse de mousses en France – Campagne 2016 du dispositif BRAMM*, 106 pp.
- Nannoni F., Santolini R & Protano G. (2015). *Heavy element accumulation in Evernia prunastri lichen transplants around a municipal solid waste landfill in central Italy*. Waste Management, volume 43, 353-362.
- Nimis P. L. & Bargagli R. (1999). *Linee-guida per l'utilizzo del licheni epifiti come bioaccumulatori di metallic in traccia*. Conférence, 279-289, Piccini C., Salvati S.
- Ocelli F., Cuny M-A., Devred I., Deram A., Quarré S. & Cuny D. (2013). *Etude de l'imprégnation de l'environnement de trois bassins de vie de la région Nord-Pas-de-Calais par les éléments traces métalliques – Vers une nouvelle utilisation des données de biosurveillance lichénique*. Pollution atmosphérique, n°220.
- OMS. (2016). Les dioxines et leurs effets sur la santé. En ligne sur le site : <https://www.who.int/fr/news-room/fact-sheets/detail/dioxins-and-their-effects-on-human-health>
- Paoli L., Corsini A., Bigagli V., Vannini J., Bruscoli C. & Loppi S. (2012). *Long-term biological monitoring of environmental quality around a solid waste landfill assessed with lichens*. Environmental Pollution, n°161, 70-75.
- Paoli L., Guttová A., Grassi A., Lackovičová A., Senko D. & Loppi S. (2014). *Biological effects of airborne pollutants released during cement production assessed with lichens (SW Slovakia)*. Ecological Indicators, n°40, 127-135.
- Paoli L., Grassi A., Vannini A., Maslaňáková I., Bil'ová I., Bačkor M., Corsini A. & Loppi S. (2015a). *Epiphytic lichens as indicators of environmental quality around a municipal solid waste landfill (C Italy)*. Waste Management, volume 42, 67-73.
- Paoli L., Munzi S., Guttová A., Senko D., Sardella G. & Loppi S. (2015b). *Lichens as suitable indicators of biological effects of atmospheric pollutants around a municipal solid waste incinerator (S Italy)*. Ecological Indicators, n°52, 362-370.
- Protano C., Guidotti M., Owczarek M., Fantozzi L., Blasi G. & Vitali M. (2013). *Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and Metals in Transplanted Lichen (Pseudovernia furfuracea) at sites adjacent to a solid-waste landfill in Central Italy*. Archives of Environmental Contamination and Toxicology, volume 66, n°4, 471-481.
- Ratier A. (2015). *Biosurveillance de la zone industrialo-portuaire de Fos-sur-Mer par les lichens*, 93 pp.
- Rausch de Traubenberg C., Galsomiès L. & Martinet Y. (2013). *Pollution atmosphérique par les métaux en France – Dix ans de biosurveillance des retombées*. ADEME. Editions EDP Sciences, 170 pp.

- Reimann C., Filzmoser P., Garrett R.G. & Dutter R. (2008). *Statistical Data Analysis Explained Environmental Statistics with R*. Editions John Wiley & Sons. 359 pp.
- Roux C. et coll. (2017). *Catalogue des lichens et champignons lichénicoles de France métropolitaine*. 2^e édition revue et augmentée. Association Française de Lichénologie. 1581 pp.
- Scerbo R., Possenti L., Lampugnani L., Ristori T., Barale R. & Barghigiani C. (1999). *Lichen (Xanthoria parietina) biomonitoring of trace element contamination and air quality assessment in Livorno Province (Tuscany, Italy)*. The Science of the Total Environment, n°241, 91-106.
- Scerbo R., Ristori T., Possenti L., Lampugnani L., Barale R. & Barghigiani C. (2002). *Lichen (Xanthoria parietina) biomonitoring of trace element contamination and air quality assessment in Pisa Province (Tuscany, Italy)*. The Science of the Total Environment, n°286, 27-40.
- Souza Pereira M. (2004). *Polychlorinated dibenzo-p-dioxins (PCDD), dibenzofurans (PCDF) and polychlorinated biphenyls (PCB): Main sources, environmental behavior and risk to man and biota*. Química Nova, volume 27, n°6, 934-943.
- Sujetovienė G., Smilgaitis P., Dagiliūtė R. & Žaltauskaitė J. (2019). *Metal accumulation and physiological response of the lichens transplanted near a landfill in central Lithuania*. Waste Management, volume 85, 60-65.
- Van Haluwyn C. & Lerond M. (1986). *Les lichens de la qualité de l'air, évolution méthodologique et limites*. Ministère de l'Environnement, Paris.
- Van Haluwyn C. (2009). *Quelle place et quelles perspectives pour la biosurveillance végétale dans les études de la qualité de l'air en France ?* Air Pur, n°77, 5-10.
- Varin K. (2014). *Suivi des teneurs en éléments traces métalliques dans l'environnement de la centrale thermique de Blénod-lès-Pont-à-Mousson par biosurveillance*, 105 pp.
- Walther D. A., Ramelow G. J., Beck J. N., Young J. C., Callahan J. D. & Marcon M. F. (1990). *Temporal changes in metal levels of the lichens Parmotrema Praesorediosum and Ramalina Stenospora, Southwest Louisiana*. Water, Air, and Soil Pollution, n°53, 189-200.
- Wirth V. (2010). *Ökologische Zeigerwerte von Flechten – Erweiterte und Aktualisierte Fassung*. Herzogia, volume 23, n°2, 299-248.

ANNEXE 1 : ORGANES SPECIFIQUES DES LICHENS

Les apothécies sont des organes en forme de bouton à la surface du thalle et renferment les asques qui sont les cellules abritant les spores du champignon. Elles ont généralement des formes de coupelle (concave) mais peuvent aussi être planes voire convexes, surtout sur les lichens crustacés. Le rebord peut être thallin (il remonte alors jusqu'au disque de l'apothécie, apothécie lecanorine) ou propre (apothécie lecidéine).

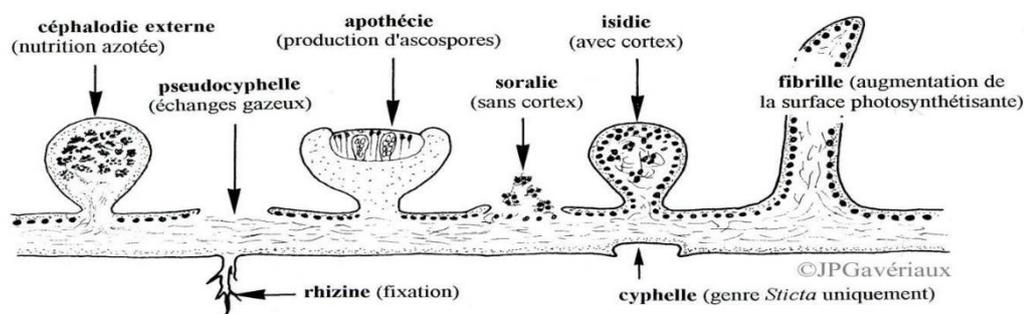
Les isidies sont des excroissances cortiquées qui ont aussi un rôle reproducteur. Effectivement, en se détachant elles emportent l'algue et le champignon à l'origine de la symbiose des lichens. Les isidies peuvent avoir des formes (cylindrique, en forme de spatule), des tailles (parfois à peine visibles à l'œil nu) et des couleurs différentes ainsi qu'une disposition (au centre du thalle ou sur les extrémités) spécifique à chaque espèce.

Les sorédies sont semblables aux isidies dans le sens où elles permettent la reproduction des lichens en se dispersant avec l'algue et le champignon. La différence est que les sorédies sont non-cortiquées et ont donc plus l'aspect de minuscules granules. Les sorédies se regroupent en amas sous le nom de soralies. Il s'agit d'éléments de détermination car les soralies peuvent être disposées différemment et les sorédies peuvent être de diamètres différents selon les espèces.

D'autres « organes » peuvent caractériser certaines espèces de lichens par leurs différences, par exemple les rhizines qui permettent aux lichens d'être plus ou moins ancrés au tronc. Ces rhizines peuvent être plus ou moins denses, elles peuvent dépasser du thalle inférieur sur certains lichens (*Phaeophyscia orbicularis* (Neck.) Moberg, 1977).

Les fibrilles sont de courtes ramifications filamenteuses simples jusqu'à 1 cm de long, possédant un cordon axial, concolore au thalle contenant des hyphes et des algues, augmentant de façon significative la surface photosynthétique, uniquement sur les *Usnea* et quelques *Alectoria*.

Les cyphelles et pseudocyphelles sont de fines ouvertures dans le cortex des lichens apparaissant en blanc car laissant apparaître la médulle.



Shéma des organes portés par le thalle des lichens

(J.P GRAVERIAUX, Les lichens et la bioindication de la qualité de l'air)

ANNEXE 2 : FACTEUR D'ÉQUIVALENCE DE TOXICITÉ DES PCDD/F

Afin de calculer la concentration totale en PCDD/F dans un lichen, les concentrations individuelles des 17 congénères sont pondérées par un facteur d'équivalence de toxicité (TEF). Celui-ci est calculé par rapport à la substance la plus toxique (2,3,7,8 TCDD) et varie en fonction du système d'équivalence toxique choisi (OTAN, OMS 1998 ou OMS 2005) :

$$\text{TEF} = \text{potentialité toxique du composé individuel} / \text{potentialité toxique de la 2,3,7,8 TCDD}$$

La quantité équivalente toxique (TEQ) d'un échantillon est égal à :

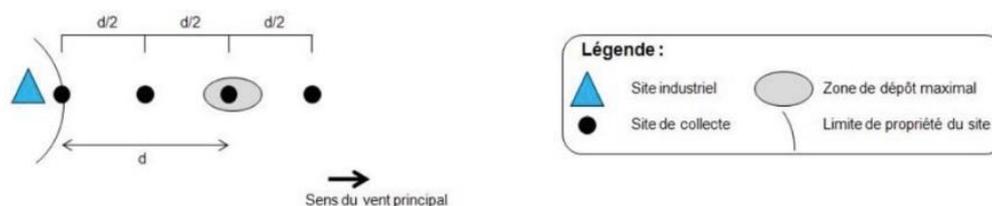
$$\text{TEQ} = \sum (\text{TEF} * \text{Concentration du congénère dans les lichens})$$

Facteur d'équivalence de toxicité des 17 congénères.

	Congénère	TEF OMS 1998	TEF OMS 2005	TEF OTAN
Dioxines	2,3,7,8 TCDD	1	1	1
	1,2,3,7,8 PeCDD	1	1	0,5
	1,2,3,4,7,8 HxCDD	0,1	0,1	0,1
	1,2,3,6,7,8 HxCDD	0,1	0,1	0,1
	1,2,3,7,8,9 HxCDD	0,1	0,1	0,1
	1,2,3,4,6,7,8 HpCDD	0,01	0,01	0,01
	OCDD	0,0001	0,0003	0,001
Furanes	2,3,7,8 TCDF	0,1	0,1	0,1
	1,2,3,7,8 PeCDF	0,05	0,03	0,05
	2,3,4,7,8 PeCDF	0,5	0,3	0,5
	1,2,3,4,7,8 HxCDF	0,1	0,1	0,1
	1,2,3,6,7,8 HxCDF	0,1	0,1	0,1
	2,3,4,6,7,8 HxCDF	0,1	0,1	0,1
	1,2,3,7,8,9 HxCDF	0,1	0,1	0,1
	1,2,3,4,6,7,8 HpCDF	0,01	0,01	0,01
	1,2,3,4,7,8,9 HpCDF	0,01	0,01	0,01
	OCDF	0,0001	0,0003	0,001

ANNEXE 3 : NORME NF X436904 - PLAN D'ÉCHANTILLONNAGE

Lorsqu'une étude de modélisation des retombées atmosphériques est disponible et fiable (Figure ci-dessous), pour chaque direction de dispersion étudiée :

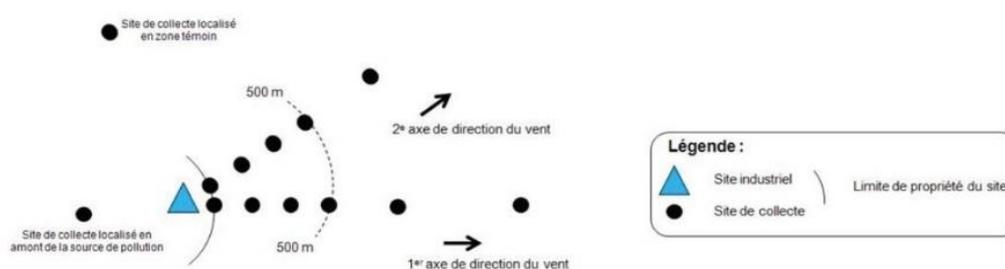


Lorsqu'une étude de modélisation des émissions atmosphériques de la source de pollution est disponible et adaptée, il est recommandé d'échantillonner au minimum les sites suivants :

- 1 site de collecte situé au niveau de la zone de dépôt maximal déterminée par la modélisation. La distance entre cette zone et le point d'émission est appelé d ;
- 2 sites de collecte localisés respectivement à des distances de $d/2$ et $3/2d$;
- dans le cas d'émissions fugitives, un site de collecte peut être localisé en limite de propriété du site ;
- 1 ou plusieurs sites de collecte localisé(s) en zone témoin, hors du domaine d'influence de la source suivie : en amont de la source de pollution par rapport à la direction des vents principaux ou à une distance suffisamment grande pour que son impact soit négligeable.

Plan d'échantillonnage lorsqu'une étude de modélisation est disponible et fiable.

Lorsqu'aucune étude de modélisation des retombées atmosphériques n'est disponible (Figure ci-dessous) :



Lorsqu'aucune étude de modélisation des retombées atmosphériques n'a été réalisée ou lorsque ce type d'outil n'est pas adapté au site d'étude, le nombre de sites de collecte situés sous le vent de la source de pollution doit être augmenté. Il est recommandé d'échantillonner dans plusieurs sites de collecte (2 à 5) positionnés sur des transects définis en fonction des axes principaux de direction de vents. Afin d'identifier la zone de dépôt maximal, les 500 premiers mètres seront particulièrement investigués avec une densité des sites de collecte plus importante. Ces sites de collecte doivent être complétés par :

- 1 site de collecte localisé en limite de propriété du site en cas d'émissions fugitives ;
- 1 ou plusieurs sites de collecte localisé(s) en zone témoin, hors du domaine d'influence de la source suivie : en amont de la source de pollution par rapport à la direction des vents principaux ou à une distance suffisamment grande pour que son impact soit négligeable.

Plan d'échantillonnage lorsqu'une étude de modélisation n'est pas disponible.

ANNEXE 4 : PRÉSENTATION DES STATIONS DE PRÉLÈVEMENTS

Les 11 stations de prélèvements de l'étude sont présentées dans cette annexe. Les caractéristiques de chaque point de prélèvement sont détaillées et une description de la station est faite. La latitude et la longitude sont renseignées pour chaque station selon le système de coordonnées WGS 84. Chaque rond rouge entoure les arbres qui ont servi de phorophytes pendant l'étude.

Il est à noter qu'aucune station 6 n'est présentée dans cette annexe, car celle-ci a finalement été abandonnée au cours de l'étude (conditions de prélèvement non remplies). Elle était initialement placée sur le bord de la Moselle (latitude : 48.88725 et longitude : 6.06888), à 1,017km, à l'est de l'usine de Saint-Gobain PAM.



Localisation des stations de prélèvements autour de Saint-Gobain PAM.

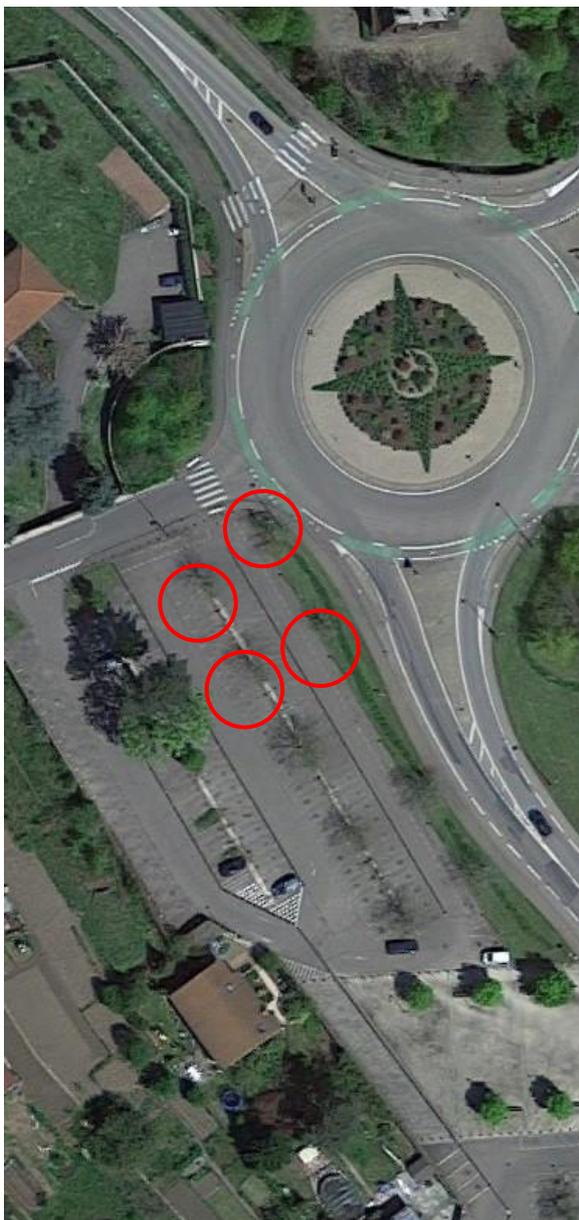
Station 1			
Lieu	Av. Victor Claude	Date de prélèvement	06/05/2019
Commune	Blénod-lès-PAM	Longitude	6.05316
Code INSEE	54079	Latitude	48.88605
Phorophytes	<i>Prunus sp.</i>	Altitude (m)	184



Description de la station :

La station 1 correspond au point de prélèvement le plus proche de Saint-Gobain PAM. Située sur l'avenue principale de Blénod-lès-PAM, cette station est distante de 166m, vers le sud-ouest de l'usine. Elle se trouve entre une piste cyclable et l'avenue Victor Claude, aux abords de places de parking. 3 cerisiers ont servi de phorophytes pour le prélèvement des lichens. Les ETM et les PCDD/F ont été tous les deux analysés.

Station 2			
Lieu	Av. Victor Claude	Date de prélèvement	06/05/2019
Commune	Blénod-lès-PAM	Longitude	6.05177
Code INSEE	54079	Latitude	48.89203
Phorophytes	<i>Sorbus</i> sp.	Altitude (m)	182



Description de la station :

Le point de prélèvement 2 est localisé aux abords de l'usine de Saint-Gobain PAM, à la limite entre les communes de Blénod-lès-PAM et Pont-à-Mousson, près de l'avenue Victor Claude. 4 sorbiers ont été utilisés pour réaliser les prélèvements de *X. parietina*. Ils sont placés sur le parking qui longe l'avenue. Cette station est située au nord-ouest, à 620m de l'usine. Les ETM uniquement ont été analysés pour ce point.

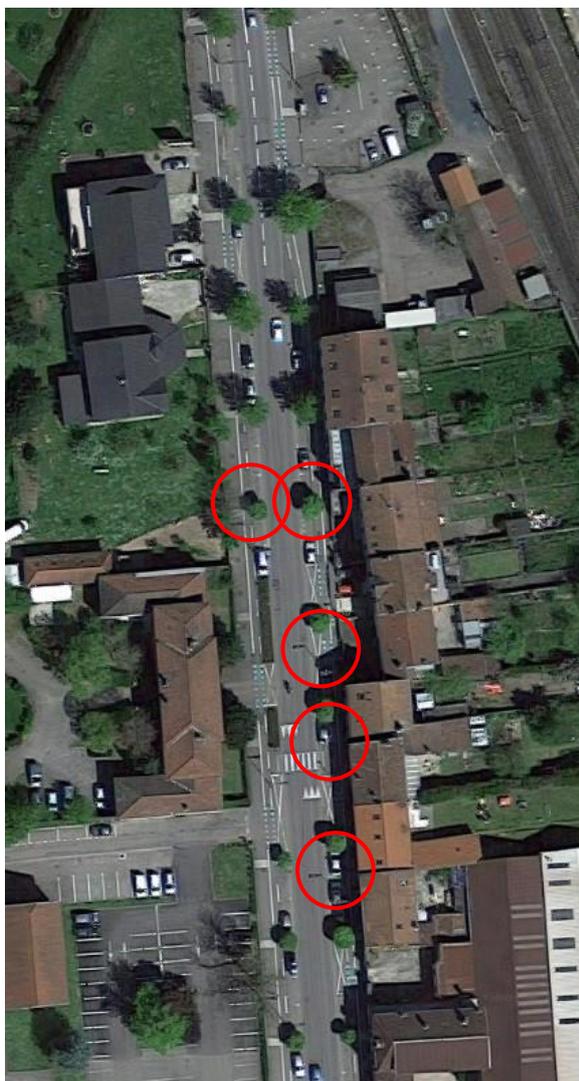
Station 3			
Lieu	Ile d'Esch	Date de prélèvement	06/05/2019
Commune	Pont-à-Mousson	Longitude	6.05997
Code INSEE	54431	Latitude	48.89408
Phorophytes	<i>Tilia sp.</i>	Altitude (m)	179



Description de la station :

La troisième station se trouve sur l'île d'Esch, dans la commune de Pont-à-Mousson. Cette île est située entre la Moselle et un canal latéral de cette rivière. Le point de prélèvement est constitué de 6 tilleuls, parmi un alignement d'environ 20 arbres, le long d'une piste cyclable, du ruisseau de Esch et à côté d'un terrain de sport. Cette station est localisée à 877m, vers le nord-nord-est de Saint-Gobain PAM. Seules les analyses en ETM ont été réalisées.

Station 4			
Lieu	Av. Camille Cavallier	Date de prélèvement	06 et 07/05/2019
Commune	Pont-à-Mousson	Longitude	6.05195
Code INSEE	54431	Latitude	48.89642
Phorophytes	<i>Acer sp.</i>	Altitude (m)	182



Description de la station :

La station 4 est située au nord-nord-ouest, à 1,082km de Saint-Gobain PAM. Elle est localisée au niveau d'arbres présents pour séparer les différentes places de parking de l'avenue principale Camille Cavallier, à Pont-à-Mousson. Une piste cyclable passe également le long des 5 érables utilisés comme phorophytes. L'échantillon de base et le duplicata prélevés sur cette station ont été tous les deux analysés en ETM et en PCDD/F.

Station 5			
Lieu	Bd. M. de Lattre de T.	Date de prélèvement	06/05/2019
Commune	Pont-à-Mousson	Longitude	6.06187
Code INSEE	54431	Latitude	48.90238
Phorophytes	Acer sp.	Altitude (m)	182



Description de la station :

La cinquième station se trouve du côté est de la Moselle, au niveau du port de Pont-à-Mousson et aux abords du boulevard du Maréchal de Lattre de Tassigny. Ce point de prélèvement de *X. parietina* est composé de 5 érables, situés entre le boulevard et le parking pour camping-car de Pont-à-Mousson. La station est localisée à 1,793km, vers le nord-nord-est de l'usine de Saint-Gobain PAM. Les lichens prélevés sur les

phorophytes ont permis de déterminer les retombées atmosphériques uniquement en ETM.

Station 7			
Lieu	Etang du Saussi	Date de prélèvement	06/05/2019
Commune	Atton	Longitude	6.07270
Code INSEE	54027	Latitude	48.89093
Phorophytes	<i>Fraxinus</i> sp.	Altitude (m)	178



Description de la station :

La station 7 se trouve à l'est-nord-est de Saint-Gobain PAM, à une distance de 1,372km. Localisée dans une zone composée de nombreux étangs de la commune d'Atton, ce point de prélèvement est situé entre l'étang de Saussi et un petit chemin en terre peu fréquenté. 6 frênes ont servi de phorophytes pour les analyses en ETM et en PCDD/F.



Station 8			
Lieu	Espace loisirs du P.	Date de prélèvement	07/05/2019
Commune	Atton	Longitude	6.08334
Code INSEE	54027	Latitude	48.89338
Phorophytes	<i>Robinia sp.</i>	Altitude (m)	180



Description de la station :

La station 8 est située à l'ouest de la commune d'Atton, sur le parking de l'espace de loisirs du Paquis. Celui-ci est accolé à la rue du stade et est composé d'un grand et d'un petit terrain de football. 4 robiniers ont permis de prélever *X. parietina*, sur leurs écorces. Seuls les ETM ont été mesurés pour cette station. Elle se trouve à 2,198km, vers l'est-nord-est de l'usine de Saint-Gobain PAM.

Station 9			
Lieu	Ferme de la chapelle	Date de prélèvement	07/05/2019
Commune	Mousson	Longitude	6.08560
Code INSEE	54390	Latitude	48.91013
Phorophytes	Acer sp.	Altitude (m)	272



Description de la station :

La station est située aux abords de la route départementale 43, près de la ferme de la chapelle sur la commune de Mousson, à 3,420km, au nord-est de Saint-Gobain PAM. Les prélèvements de *X. parietina* ont été effectués sur 8 érables, présents entre le fossé et la route, afin de réaliser les analyses en ETM de cette station.

Station 10			
Lieu	Rue de la Carrière	Date de prélèvement	06/05/2019
Commune	Blénod-lès-PAM	Longitude	6.05139
Code INSEE	54079	Latitude	48.87977
Phorophytes	<i>Acer sp.</i>	Altitude (m)	185



Description de la station :

La station 10 est localisée au sud-sud-ouest de l'usine de Saint-Gobain PAM, à 836m. Elle est située dans un petit parc, à côté d'un gymnase et de la rue de la Carrière, à Blénod-lès-PAM. Les prélèvements de *X. parietina* ont été effectués sur 16 érables et seuls les ETM ont été analysés pour cette station.

Station 11			
Lieu	Cimetière militaire	Date de prélèvement	06/05/2019
Commune	Montauville	Longitude	6.01219
Code INSEE	54375	Latitude	48.90324
Phorophytes	<i>Fagus sp.</i>	Altitude (m)	247



Description de la station :

La station 11 est située à l'ouest-nord-ouest, à 3,628km de Saint-Gobain PAM. Ce point de prélèvement est considéré comme une station témoin. Cette station se trouve au cimetière militaire de Pétant de la commune de Montauville. La richesse lichénique existante sur le site, couplée avec la présence de nombreux lichens fruticuleux de taille conséquente, suppose une qualité de l'air plutôt bonne. 4 hêtres ont été utilisés pour prélever *X. parietina*, afin de réaliser un échantillon de base et un duplicat ; tous les deux analysés en ETM et en PCDD/F.

Station 12			
Lieu	Rue de la Louvrière	Date de prélèvement	07/05/2019
Commune	Lesménils	Longitude	6.10747
Code INSEE	54312	Latitude	48.93146
Phorophytes	<i>Populus sp.</i>	Altitude (m)	200



Description de la station :

La station 12 correspond à la station de proximité de trafic routier. Elle n'a pas de lien direct avec l'usine de Saint-Gobain PAM, distante de 6,272km vers le nord-est. Elle permet de voir qu'elles sont les retombées atmosphériques issues du trafic routier. Située à Lesménils, la station jouxte la route départementale 910, très fréquentée par les véhicules entre Pont-à-Mousson et l'autoroute A31, qui est à une distance de 300m de la station 12. 7 peupliers ont servi de phorophytes pour les prélèvements et seuls les ETM ont été mesurés

pour cette station.

ANNEXE 5 : TEST DE SPEARMAN ET ACP

Test de corrélation de Spearman :

Le test de corrélation de Spearman permet le calcul d'un coefficient de corrélation qui évalue la relation (dépendance) entre deux variables.

Son résultat est compris entre -1 et 1. Un coefficient de -1 indique une relation négative entre les deux variables, si l'une des deux augmentent, les valeurs de la seconde ont tendance à diminuer. Un coefficient de 0 suggère que les deux variables n'ont aucune relation entre elles. À contrario, un coefficient de 1 indique une relation positive. Si les valeurs d'une des variables augmentent, celles de la seconde auront tendance à augmenter aussi.

Le test de corrélation de Spearman est un test non-paramétrique ; son calcul se fait sur les rangs des valeurs et non directement sur ces dernières. L'utilisation du test de Spearman est recommandée lorsque les valeurs étudiées ne suivent pas une distribution normale. A l'inverse, il est possible d'utiliser le test de corrélation de Pearson (test paramétrique) lorsque la normalité des valeurs est avérée. La normalité des valeurs est testée grâce au test de Shapiro-Wilk.

Analyse factorielle en composantes principales (ACP) :

L'analyse en composantes principales fait partie des analyses statistiques multivariées. Elle permet de traiter et d'interpréter une importante quantité de données avec des variables quantitatives.

L'analyse factorielle va transformer les variables du jeu de données en quelques composantes principales (ou axes). Ces composantes correspondent à une combinaison linéaire de variables du jeu de données. Cela permet de réduire le nombre de variables et donc de rendre plus facile l'interprétation.

Les premiers axes sont ceux qui vont contenir le plus d'information (variance) et sont à analyser en priorité. L'ACP peut être mise en forme par différents graphiques : graphique des variables, graphique des individus ou graphique des variables et des individus.

En résumé, l'ACP permet de réduire les nombreuses variables quantitatives d'un jeu de données à seulement quelques composantes principales (2 ou 3) qui peuvent être visualisées graphiquement, en perdant le moins d'information possible.



Air • Climat • Energie • Santé

Espace Européen de l'Entreprise - 5 rue de Madrid - 67300 Schiltigheim
Tél : 03 88 19 26 66 - Fax : 03 88 19 26 67 - contact@atmo-grandest.eu
Siret 822 734 307 000 17 - APE 7120 B
Association agréée de surveillance de la qualité de l'air