



# Amélioration de la connaissance des retombées atmosphériques de polychlorobiphényles (PCB) sur les secteurs du Havre et de Rouen

Année 2014



## Avertissement

Air Normand est l'association agréée de surveillance de la qualité de l'air en Haute-Normandie. Elle diffuse des informations sur les problématiques liées à la qualité de l'air dans le respect du cadre légal et réglementaire en vigueur et selon les règles suivantes :

La diffusion des informations vers le grand public est gratuite. Air Normand est libre de leur diffusion selon les modalités de son choix : document papier, communiqué, résumé dans ses publications, mise en ligne sur son site internet ([www.airnormand.fr](http://www.airnormand.fr)), ... Les documents ne sont pas systématiquement rediffusés en cas de modification ultérieure.

Lorsque des informations sous quelque forme que ce soit (éléments rédactionnels, graphiques, cartes, illustrations, photographies...) sont susceptibles de relever du droit d'auteur elles demeurent la propriété intellectuelle exclusive de l'association. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle de ces informations faite sans l'autorisation écrite d'Air Normand est illicite et constituerait un acte de contrefaçon sanctionné par les articles L.335-2 et suivants du Code de la Propriété Intellectuelle.

Pour le cas où le présent document aurait été établi pour partie sur la base de données et d'informations fournies à Air Normand par des tiers, l'utilisation de ces données et informations ne saurait valoir validation par Air Normand de leur exactitude. La responsabilité d'Air Normand ne pourra donc être engagée si les données et informations qui lui ont été communiquées sont incomplètes ou erronées, quelles qu'en soient les répercussions.

Air Normand ne peut en aucune façon être tenue responsable des interprétations, travaux intellectuels et publications diverses de toutes natures, quels qu'en soient les supports, résultant directement ou indirectement de ses travaux et publications.

Les recommandations éventuellement produites par Air Normand conservent en toute circonstance un caractère indicatif et non exhaustif. De ce fait, pour le cas où ces recommandations seraient utilisées pour prendre une décision, la responsabilité d'Air Normand ne pourrait en aucun cas se substituer à celle du décideur.

Toute utilisation totale ou partielle de ce document, avec l'autorisation contractualisée d'Air Normand, doit indiquer les références du document et l'endroit où ce document peut être consulté.

Rapport n° 1202-018

Le 15 juillet 2015,

Le rédacteur,

Anati ABDUL KARIM

Le Responsable du pôle « Campagnes de mesure  
et exploitation des données »,

Sébastien LE MEUR

*Air Normand – 3, Place de la Pomme d'Or - 76000 ROUEN*

*Tél. : 02 35 07 94 30 - mail : [contact@airnormand.fr](mailto:contact@airnormand.fr)*

*[www.airnormand.fr](http://www.airnormand.fr)*

## Résumé

Dans le cadre de son programme de surveillance de la qualité de l'air (PSQA) 2010-2015, Air Normand s'emploie à mutualiser la surveillance des retombées atmosphériques autour des installations d'incinération de déchets présentes sur un même territoire (qui sont par ailleurs tenues par arrêtés ministériels à une surveillance de l'impact de leurs rejets sur l'environnement).

Historiquement, les polluants concernés par cette surveillance sont les dioxines/furanes et les métaux. Plus récemment, dans le cadre du groupe de travail « incinérateurs » du S3PI, s'est posée la question d'élargir la surveillance aux polychlorobiphényles (PCB) dans une optique d'amélioration des connaissances.

Suite à une convention passée avec la DREAL de Haute Normandie, des campagnes de mesures exploratoires des retombées de PCB dioxine-like (PCB-DL) et indicateurs (PCBi) ont été réalisées en zones industrielles du Havre et de Rouen pendant l'année 2014. A cette occasion, trois méthodes de prélèvement ont été testées (jauges de dépôts, lichens et bryophytes terrestres). Les objectifs sont de mieux connaître les teneurs et le comportement de ces polluants dans la région et de comparer plusieurs méthodes de prélèvement ainsi que la cohérence de leurs résultats.

Les résultats obtenus en 2014 dans les jauges, les lichens et les bryophytes s'accordent sur les faits les plus marquants, à savoir :

- La présence plus marquée de PCB sur la zone de Rouen à certaines périodes et sur certains sites avec probablement plusieurs sources d'émission qui restent pour certaines à déterminer,
- La présence de PCB sur un site en zone industrielle du Havre sur lequel existe déjà un historique de pollution,
- Des résultats entre jauges, lichen et bryophytes parfois concordants et parfois différents, et donc une certaine complémentarité des méthodes déployées.

## SOMMAIRE

<b>1.</b>	<b>SIGLES, SYMBOLES ET ABREVIATIONS .....</b>	<b>6</b>
<b>2.</b>	<b>INTRODUCTION.....</b>	<b>7</b>
<b>3.</b>	<b>ELEMENTS NECESSAIRES A LA COMPREHENSION DU DOCUMENT .....</b>	<b>7</b>
3.1	DEFINITIONS.....	7
3.2	CONTEXTE .....	8
3.3	INDUSTRIELS SUSCEPTIBLES D'EMETTRE DES PCB ET AYANT PARTICIPE A CETTE ETUDE EXPLORATOIRE .....	9
3.4	APPROCHE CHOISIE .....	10
3.4.1.	ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE.....	10
3.4.2.	CAMPAGNE DE MESURE EXPLORATOIRE.....	10
3.5	MATERIEL.....	11
3.5.1.	ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE.....	11
3.5.2.	CAMPAGNES DES MESURES EXPLORATOIRES.....	11
3.6	METHODE.....	12
3.6.1.	POUR L'ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE .....	12
3.6.2.	POUR LA CAMPAGNE DE MESURES .....	12
3.7	REFERENCES UTILISEES POUR L'INTERPRETATION DES RESULTATS .....	14
3.8	ORIGINE DES DONNEES.....	15
3.9	LIMITES .....	15
<b>4.</b>	<b>DEROULEMENT .....</b>	<b>16</b>
4.1	PERIODE.....	16
4.2	SITES DE MESURE .....	16
<b>5.</b>	<b>ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE.....</b>	<b>19</b>
5.1	GENERALITES.....	19
5.1.1.	DEFINITION ET CARACTERISTIQUES CHIMIQUES .....	19
5.1.2.	REGLEMENTATIONS .....	22
5.1.3.	FACTEUR D'EQUIVALENCE DE TOXICITE DE L'OMS.....	22
5.2	PRODUCTION ET UTILISATIONS DES PCB.....	24
5.3	REJET DANS L'ENVIRONNEMENT .....	25
5.3.1.	SOURCES DE REJET DANS L'ATMOSPHERE.....	25
5.3.2.	VALEURS STATISTIQUES D'EMISSION DES PCB PAR SECTEUR DANS LE MILIEU ATMOSPHERIQUE EN FRANCE.....	27
5.4	PRESENCE & DEVENIR DANS L'ENVIRONNEMENT.....	28
5.4.1.	COMPORTEMENT DANS L'ENVIRONNEMENT.....	28
5.4.2.	PRESENCE DES PCB DANS L'ATMOSPHERE ET LES RETOMBEES ATMOSPHERIQUES .....	28
5.4.3.	INFLUENCE DE LA TEMPERATURE SUR LE COMPORTEMENT DES PCB DANS L'ATMOSPHERE.....	30
5.4.4.	DISPERSION GLOBALE DES PCB DANS L'ATMOSPHERE .....	30
5.4.5.	MECANISMES D'ELIMINATION DES PCB DE L'ATMOSPHERE.....	32
5.5	MESURE DES TENEURS DE PCB DANS L'ENVIRONNEMENT.....	32
5.5.1.	MESURE DANS L'ATMOSPHERE OU L'AIR AMBIANT .....	33
5.5.2.	MESURE DIRECTE DANS LES RETOMBEES ATMOSPHERIQUES .....	34
5.5.3.	MESURE INDIRECTE DES RETOMBEES : BIOSURVEILLANCE.....	34
5.5.4.	RECHERCHE DES VALEURS REPERES.....	36
5.5.5.	CORRELATION ENTRE LES DIFFERENTES METHODES DE MESURE .....	36
5.5.6.	RECHERCHE DES VALEURS TYPIQUES POUR CHAQUE TYPE DE SITES DE MESURE .....	38
5.6	SYNTHESE DE L'ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE .....	42
<b>6.</b>	<b>RESULTATS.....</b>	<b>43</b>
6.1	RESULTATS BRUTS .....	43
6.2	RESULTATS TRANSFORMES .....	43
6.2.1.	RESULTATS DETAILLES DES MESURES.....	43
6.2.2.	VOLUME PRELEVE DANS LES JAUGES DE DEPOT .....	43
6.2.3.	CONDITIONS METEOROLOGIQUES .....	43

6.2.4. CONFRONTATION AUX VALEURS BIBLIOGRAPHIQUES .....	46
6.2.5. CONFRONTATION AUX VALEURS DE RETOMBÉES SIGNIFICATIVES.....	47
6.2.6. CONFRONTATION DES 3 TYPES DE RESULTATS (JAUGES, LICHENS ET BRYOPHYTES).....	47
6.2.7. CONFRONTATION DES DEUX TYPES DE PCB (PCB-DL ET DES PCBI EN SOMME) .....	50
6.2.8. ETUDE DES PROFILS DES CONGENERES .....	52
6.2.9. RESULTATS SAISONNIERS DES PCB POUR LA METHODE DES JAUGES .....	57
<b>7. INTERPRETATION DES RESULTATS ET DISCUSSION.....</b>	<b>57</b>
7.1 IMPORTANCE DES VALEURS REPERES.....	57
7.2 COMPARAISON DES RESULTATS DANS LES JAUGES, LES LICHENS ET LES BRYOPHYTES : EXPLICATION DES RETOMBÉES LES PLUS IMPORTANTES .....	58
7.3 RESULTATS SAISONNIERS DES PCB POUR LA METHODE DES JAUGES .....	61
7.4 CONFRONTATION DES ETUDES DES PCB-DL ET DES PCBI .....	61
7.5 ETUDE DES PROFILS DES CONGENERES.....	62
<b>8. CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS.....</b>	<b>62</b>
<b>9. PAGES COMPLEMENTAIRES .....</b>	<b>63</b>
9.1 ANNEXES .....	63
9.1.1. ANNEXE 1 : QUANTITE D'EAU RECUEILLIE DANS LES JAUGES .....	63
9.1.2. ANNEXE 2 : RESULTATS DES PCB-DL DANS LES JAUGES .....	64
9.1.3. ANNEXE 3 : RESULTATS DES PCBI DANS LES JAUGES .....	65
9.1.4. ANNEXE 4 : RESULTATS DES LICHENS .....	67
9.1.5. ANNEXE 5 : RESULTATS DES BRYOPHYTES.....	68
9.1.6. ANNEXE 6 : DESCRIPTION DES SITES DE MESURE .....	69
9.1.7. ANNEXE 7 : EMISSIONS DANS L'AIR EN FRANCE METROPOLITAINE PAR TYPE DE COMBUSTIBLES .....	73
9.2 APPENDICES .....	74
9.2.1. APPENDICE 1 : BASE DES DONNEES DES RESULTATS DE CAMPAGNE.....	74
9.2.2. APPENDICE 2 : DETAILS CONCERNANT <i>TILLANDSIA USNEOIDES (L.)</i> .....	76
9.3 BIBLIOGRAPHIE .....	77

## 1. Sigles, symboles et abréviations

---

Unités utilisées pour les retombées atmosphériques (dans les jauges) :

$\mu\text{g}/\text{m}^2/\text{jour} = 10^{-6}\text{g}/\text{m}^2/\text{jour}$  : microgrammes par mètre carré et par jour

$\text{pg}/\text{m}^2/\text{jour} = 10^{-12}\text{g}/\text{m}^2/\text{jour}$  : picogrammes par mètre carré et par jour

Unités utilisées pour les retombées atmosphériques (dans les lichens et les bryophytes) :

$\text{mg}/\text{kg MS} = 10^{-3}\text{g}/\text{kg MS}$  : milligrammes par kilogramme de matière sèche

$\text{ng}/\text{kg MS} = 10^{-9}\text{g}/\text{kg MS}$  : nanogrammes par kilogramme de matière sèche

Symboles chimiques :

PCB : Polychlorobiphényles. Les PCB représentent une famille de molécules de biphényles chlorés constituée de 209 composés différents appelés « congénères ». Ils sont répartis en deux types de congénères : les PCB-DL et les PCBi.

PCB-DL : Polychlorobiphényles « type dioxine » (dioxine-like).

Ces composés ont une structure chimique et une toxicité proche des dioxines. De ce fait, comme pour les dioxines, les résultats sont exprimés en équivalent toxique c'est-à-dire que chacun des 12 congénères de PCB-DL est pondéré par un facteur d'équivalence de toxicité (TEF) selon son degré de toxicité. Ce TEF est proposé par l'OMS. Une révision des facteurs OMS 1998 a été faite en 2005. La somme des 12 congénères de PCB-DL est exprimée en équivalent toxique de TEQ-OMS 2005 (voir plus de détails dans la partie 5.1.2.)

PCBi : PCB indicateurs (PCB 28, PCB 52, PCB 101, PCB 138, PCB 153, PCB 180). Il n'existe pas de facteur d'équivalent toxique pour ce type de PCB.

PCDD : Polychlorodibenzo-p-dioxine

PCDF : Polychlorodibenzofurane

Abréviations :

AFNOR : Association Française de Normalisation

AASQA : Association Agréée de Surveillance de la Qualité de l'air

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

DREAL : Direction Régionale de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement (dans le cadre de ce document, DREAL de la Haute-Normandie)

EMEP: European Monitoring and Evaluation Program

INERIS : Institut National de l'Environnement Industriel et des Risques

IREP : Registre Français des Emissions Polluantes

OMS : Organisation Mondiale de la Santé

PSQA : Programme de Surveillance de la Qualité de l'Air

SEDIBEX : Usine d'incinération et de valorisation de déchets industriels au Havre

S3PI Basse Seine : Secrétariat Permanent pour la Prévention des Pollutions Industrielles en Basse Seine.

TEF : Facteur d'équivalence de toxicité de l'OMS

TEQ : Equivalence de toxicité de l'OMS

TRIADIS Service : Usine de traitement thermique et incinération à Rouen

$\text{m}^{-3}$  : par mètre cube

$\text{pg}/\text{m}^3$  : picogramme par mètre cube

## 2. Introduction

---

Ce rapport présente une étude sur l'amélioration des connaissances sur les polychlorobiphényles (PCB) dans les retombées atmosphériques. Cette étude a été élaborée en collaboration avec la DREAL de Haute Normandie. Elle est scindée en deux parties principales :

- Une étude bibliographique sur les mesures des PCB dans d'autres régions françaises et dans d'autres pays.
- Des campagnes des mesures exploratoires réalisées sur le secteur du Havre et de Rouen durant l'année 2014.

Cette étude a plusieurs objectifs :

- Disposer de premiers résultats de PCB dans les retombées atmosphériques sur la région ;
- Disposer de valeurs de référence ou de résultats sur d'autres secteurs afin de pouvoir situer les valeurs obtenues en Haute Normandie ;
- Comparer plusieurs méthodes d'évaluation des PCB dans les retombées atmosphériques (à l'aide de jauges de dépôt, et de bioindicateurs) ;
- Étudier l'intérêt de mesurer soit les PCB dioxines-like seuls, soit les PCB indicateurs seuls, soit les deux ;
- Etudier l'intérêt d'élargir les émetteurs surveillés à d'autres activités susceptibles d'émettre des PCB.

Ce rapport présente l'approche choisie pour l'étude bibliographique et les campagnes de mesure sur la zone du Havre et de Rouen durant l'année 2014. Il expose la méthodologie, le déroulement de l'étude puis les résultats des campagnes. Ces résultats sont ensuite confrontés aux résultats sur d'autres sites en France et au niveau international trouvés dans l'étude bibliographique.

Le rapport est destiné à la DREAL de la Haute Normandie, et est ensuite disponible sur le site [www.airnormand.fr](http://www.airnormand.fr) pour tout public intéressé.

## 3. Eléments nécessaires à la compréhension du document

---

### 3.1 Définitions

**Bioindication** (au sens de la bioaccumulation) : " c'est une méthode qui permet de quantifier la part des contaminants atmosphériques qui s'accumulent (bioaccumulation) dans des végétaux particuliers (lichen ou bryophyte) prélevés directement dans l'environnement et présents naturellement dans l'environnement du site.

Pour les lichens, les prélèvements sont réalisés sur des arbres ou arbustes. Des supports artificiels peuvent également être utilisés (poteaux électriques, ...). Les bryophytes sont prélevées sur le sol.

Ces espèces ont été choisies, car leur faible biomasse et leur morphologie les rendent particulièrement sensibles à la bioaccumulation de polluants. Après prélèvements et préparation des échantillons, les concentrations des dioxines / furanes et des métaux sont dosées dans leurs tissus."

(Source : INERIS, 2014<sup>45</sup>)

**Lichen** : association symbiotique d'un hôte fongique (champignon) et d'un hôte photosynthétique (algue et/ou cyanobactérie) qui résulte en un organisme végétatif ayant une structure spécifique. La liste des espèces fréquemment utilisées pour la bioaccumulation comprend 12 espèces de lichens.

(Source : norme NF X 43-904)

Bryophyte (terrestre) : mousse terrestre utilisée comme indicateur biologique d'accumulation vis-à-vis des retombées atmosphériques d'aérocontaminants. Plusieurs espèces sont fréquemment utilisées<sup>17</sup> : *Pseudoscleropodium purum*, *Hypnum cupressiforme*, *Thuidium tamariscinum*, *Hylocomium splendens*, *Pleurozium schreberi*, parmi une liste d'au moins 34 espèces possibles à prélever pour la bioindication.

(Source : norme NF X 43-902)

Concentration ubiquitaire : c'est la teneur en substance observée dans les différents milieux, généralement éloignés de toute source de pollution et représentant le bruit de fond environnemental.

Dose Journalière Tolérable (DJT) : Elle constitue une estimation de la quantité d'un contaminant chimique auquel nous pouvons être exposés par le biais d'une contamination environnementale et qui, s'il se retrouve dans des aliments, peut être ingéré quotidiennement pendant toute la durée de la vie sans présenter un risque significatif pour la santé.

Rose des vents : Elle donne la direction d'où vient le vent, répartie ici sur 360°. Ainsi, le Nord est par convention indiqué en haut du diagramme (360°), l'Ouest est à 270°, le Sud à 180° et l'Est à 90°.

La dimension du cercle central est proportionnelle à la fréquence moyenne (en %) des vents calmes (vitesse inférieure à 2 m/s), toutes directions confondues. Sur les demi-droites correspondant à chacune des directions d'une rose de 18 secteurs, on a porté des points à une distance du centre proportionnelle à la fréquence moyenne (en %) des vents de 6 groupes de vitesses en m/s : couleur moins foncée correspondant à la vitesse la plus faible.

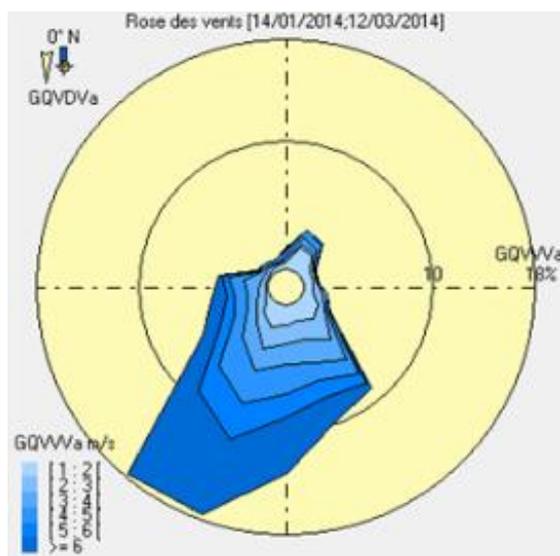


Figure 1 : Exemple d'une rose de vent

### 3.2 Contexte

Air Normand participe depuis 2009 au suivi des retombées atmosphériques autour des incinérateurs de la région Haute Normandie dans le cadre de son Programme de Surveillance de la Qualité de l'Air. La surveillance des retombées a par ailleurs été étendue au cours de ces dernières années aux émetteurs autres que les incinérateurs présents sur la zone industrielle du Havre.

Historiquement, les polluants concernés par cette surveillance sont les dioxines/furanes et les métaux. Plus récemment, la DREAL de la Haute Normandie s'est posée la question d'élargir la surveillance aux PCB dans le cadre de l'amélioration des connaissances sur l'impact des PCB sur l'environnement et de façon plus générale dans le cadre de l'action REISTA (PNSE2).

L'action REISTA a été cadrée au niveau national par la circulaire du 21 mai 2010. Cette circulaire visait à faire baisser les niveaux de rejet à l'atmosphère en arsenic, mercure, HAP, solvants chlorés, HAP, dioxines et PCB. Les industriels de Haute-Normandie ayant fait valoir des réductions déjà substantielles pour plusieurs polluants, la décision a été prise en région de ne pas appliquer l'objectif de réduction fixé au plan national (- 30 % par rapport au niveau de 2007) à chaque émetteur industriel via des arrêtés préfectoraux visant individuellement chaque exploitant. Il a plutôt été retenu de favoriser l'amélioration des connaissances de ces émissions en fonction des branches d'activités les plus émissives<sup>2</sup>. Des mesures de retombées atmosphériques de PCB dans l'environnement ont également été commandées de façon à constituer un point « zéro » en termes de connaissances sur la région.

Dans cette première étude exploratoire, seule l'incinération des déchets dangereux (l'un des secteurs potentiellement émetteur de PCB<sup>3</sup>) est regardée, sachant que les deux incinérateurs de déchets dangereux de Haute-Normandie avaient préalablement accepté de réaliser des mesures à l'émission.

Ainsi, le but est de disposer d'un premier ordre de grandeur des teneurs en PCB dans certaines zones industrielles de la région et ensuite de situer ces teneurs par rapport aux résultats disponibles dans d'autres régions françaises ou d'autres pays.

Du fait des intérêts convergents d'Air Normand et de la DREAL de la Haute Normandie pour réaliser ce type d'étude exploratoire, une campagne de mesure régionale exploratoire et une étude bibliographique sur les PCB dans les retombées atmosphériques en France et à l'international a été lancée dans le cadre du groupe de travail « incinérateurs » du S3PI.

### 3.3 Industriels susceptibles d'émettre des PCB et ayant participé à cette étude exploratoire

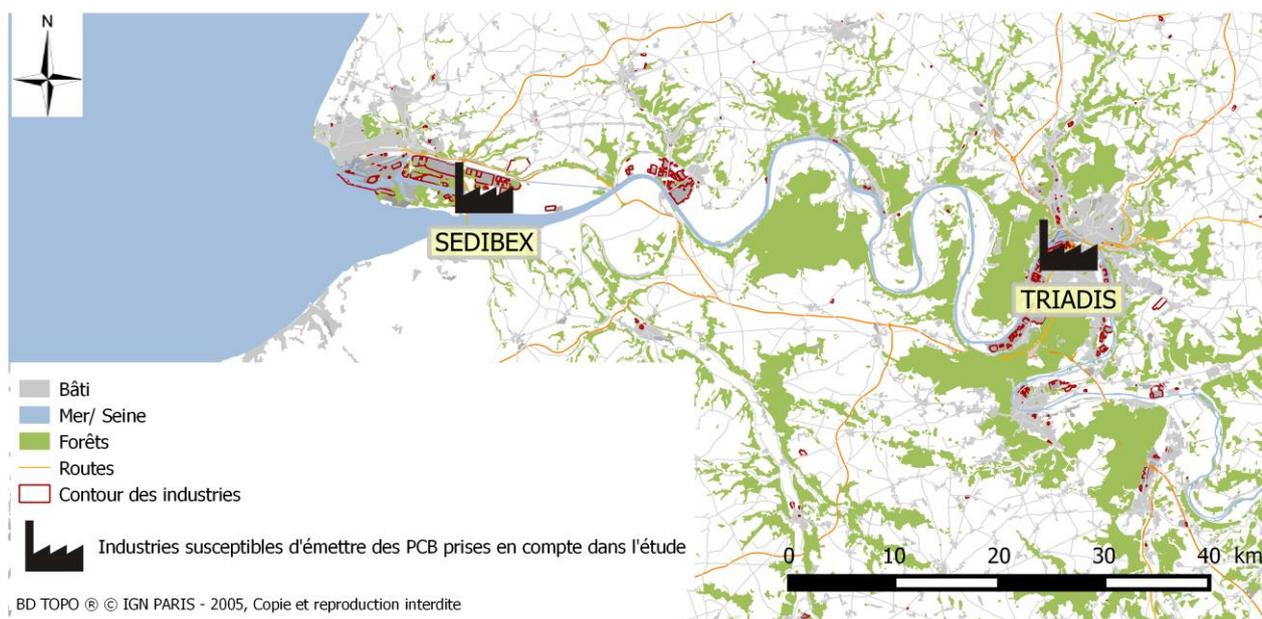


Figure 2 : Localisation de de TRIADIS Services et de SEDIBEX

<sup>2</sup> cf. compte-rendus des réunions de la commission Santé – Environnement du S3PI des 3 juillet 2012 et 19 juin 2014

<sup>3</sup> Dans la circulaire du 21/05/10 relative au programme pluriannuel de réduction des émissions de substances toxiques dans l'environnement – Volet ICPE, l'incinération des déchets dangereux est citée comme une des activités potentiellement émettrice de PCB

En accord avec la DREAL Haute-Normandie, cette étude exploratoire s'est intéressée aux environnements directs de deux incinérateurs de déchets dangereux situés en zone industrielle, au milieu d'autres émetteurs potentiels de PCB (incinérateurs d'ordures ménagères, de boues de station d'épuration, cimenteries...<sup>3</sup>). Ces incinérateurs font déjà l'objet d'une surveillance des retombées dans l'environnement en métaux et en PCDD/PCDF par jauges de dépôt et par bio indicateurs (lichens).

Les activités de ces deux sociétés sont :

Sociétés	Activités
<b>TRIADIS Services, Rouen</b>	Incinération de déchets dangereux, avec valorisation énergétique  Plateforme de regroupement, de transit, de tri et de prétraitement de déchets dangereux diffus.
<b>SEDIBEX, Le Havre</b>	Incinération et valorisation des déchets dangereux.

**Tableau 1 : Activités des 2 industriels ayant participé à cette étude exploratoire**

Par ailleurs, d'autres sources d'émission des PCB existent. Elles sont détaillées dans la partie bibliographique.

### **3.4 Approche choisie**

Dans le cadre de cette étude, Air Normand réalise d'une part, une recherche bibliographique et d'autre part des campagnes de mesures et leur interprétation.

#### **3.4.1. Etude bibliographique**

Cette étude bibliographique cible les PCB dans l'air et dans les retombées atmosphériques. L'objectif principal est de pouvoir situer les teneurs en PCB en Haute Normandie par rapport aux autres régions ou aux autres pays. Mais ce travail doit également permettre de :

- Savoir s'il y a un intérêt de suivre les PCB indicateurs en plus de PCB-DL, voire de mesurer d'autres congénères
- De savoir s'il y aurait un intérêt à mesurer les PCB dans les retombées atmosphériques ou dans l'air autour d'autres émetteurs potentiels de PCB.

L'étude bibliographique s'est intéressée aux comportements chimiques et physiques des PCB, aux réglementations existantes, aux méthodologies de mesure utilisées, aux sources de pollution possibles ainsi qu'aux résultats couramment mesurés par type de sites de mesures dans l'atmosphère et dans les retombées atmosphériques. D'autres éléments susceptibles d'aider à mieux comprendre l'impact des PCB sur l'environnement et les voies d'exposition pour l'être humain ont également été pris en compte.

#### **3.4.2. Campagne de mesure exploratoire**

Une des activités courantes d'Air Normand est la surveillance des polluants dans l'air ambiant. L'exposition aux polluants dans l'air ambiant se fait par inhalation.

Cette campagne s'intéresse ici aux polluants dans un autre compartiment que l'air ambiant : les retombées atmosphériques sur le sol. Les polluants s'accumulent le long de la chaîne alimentaire via les végétaux sur lesquels ont lieu les dépôts, puis les animaux et au final l'être humain. Dans ce cas, l'exposition se fait essentiellement par ingestion.

La campagne de 2014 est organisée en 3 volets :

- Des mesures à l'aide de jauges de dépôts : Les mesures ont lieu durant 2 mois environ, deux fois par an (entre janvier et mars pour l'hiver et entre juillet et septembre pour l'été). Les sites investigués sont repartis autour des deux émetteurs de PCB de la région Haute Normandie, à la fois en milieu industriel et en milieu habité, sur la zone du Havre et de Rouen,
- Une étude 'lichénique' : L'étude est confiée à la société Aair Lichens (17 rue des Chevrettes, 44470 Carquefou). Le prélèvement se fait une fois dans l'année : en juillet sur les sites de Rouen et en octobre sur les sites du Havre.
- Une étude à l'aide de bryophytes terrestres : L'étude est confiée à la société Biomonitor (25 rue Anatole France, 54530 Pagny-sur-Moselle). Le prélèvement se fait une fois dans l'année : en août sur les sites de Rouen et en novembre sur les sites du Havre.

La finalité est d'observer la complémentarité et la cohérence des 3 méthodes.

Cette campagne de mesures s'est déroulée durant l'année 2014. Les polluants qui ont été mesurés autour des deux incinérateurs sont :

- Les PCB-DL : PCB 77, PCB 81, PCB 105, PCB 114, PCB 118, PCB 123, PCB 126, PCB 156, PCB 157, PCB 167, PCB 169, PCB 189 ;
- Les PCBi : PCB 28, PCB 52, PCB 101, PCB 138, PCB 153, PCB 180.

Compte tenu de la voie d'exposition ciblée par les mesures de retombées (ingestion), le choix des PCB mesurés est motivé par la réglementation existante sur les denrées alimentaires (en l'absence de réglementation sur les retombées) et en particulier le Règlement (UE) n° 1259/2011 de la Commission du 2 décembre 2011 (modifiant le règlement (CE) n° 1881/2006) en ce qui concerne les teneurs maximales en dioxines, en PCB de type dioxine et en PCB autres que ceux de type dioxine des denrées alimentaires.

### 3.5 Matériel

#### 3.5.1. Etude bibliographique

Concernant l'étude bibliographique, les recherches ont été faites en utilisant principalement les bases de données bibliographiques contenant des articles de revues et des rapports de recherche :

- Sciencedirect
- Technique de l'ingénieur
- Royal Society of Chemistry (RCS)
- Springer Link
- ACS

Par ailleurs, les données concernant les teneurs des PCB sont recherchées sur les sites des associations de surveillance de la qualité de l'air : [GMP-DWH](#) & [CITEPA](#).

#### 3.5.2. Campagnes des mesures exploratoires

Les prélèvements des retombées de PCB sont effectués au moyen de 3 méthodes différentes :

- La première méthode consiste à recueillir les retombées sèches et humides dans une jauge OWEN. C'est un récipient en verre d'une capacité d'échantillonnage de 20 litres surmonté d'un entonnoir.

- Les 2 autres méthodes font appel aux bioindicateurs (lichens et bryophytes terrestres). Ceux-ci ont la capacité à accumuler les PCB sur une longue période (typiquement entre 6 mois et un an). Ils sont prélevés in situ pour être analysés en laboratoire.

Plus de détails dans la partie « Méthode de prélèvement et d'analyse » dans 3.6.2.

## 3.6 Méthode

### 3.6.1. Pour l'étude bibliographique

Afin de faciliter la recherche bibliographique pour cette étude de surveillance des PCB dans les retombées atmosphériques, la méthode utilisée s'articule autour des 5 étapes suivantes :

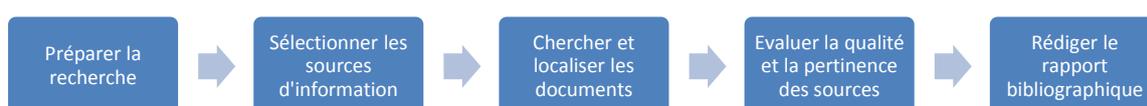


Figure 3 : Méthode de l'étude bibliographique (Source : Université d'Avignon, 2013)

Les mots clés utilisés pour la recherche sont :

- PCB, polychlorobiphényle, atmosphère, retombées, dépôts, bioindicateurs, biosurveillance, incinération.
- Polychlorobiphenyl, atmosphere, deposition, bioindicators, biomonitoring, incineration.

La recherche est exécutée en français et en anglais.

Les études trouvées pendant la recherche bibliographique sont jugées pertinentes (au vu de l'objectif de comparaison des valeurs obtenues) lorsqu'elles considèrent la même liste de PCB DL et des PCB<sub>i</sub> que notre campagne de mesure.

### 3.6.2. Pour la campagne de mesures

#### *Méthode pour l'implantation des sites de mesures*

Le choix des sites de retombées de PCB s'inspire de la méthode décrite dans les rapports de l'INERIS intitulés :

- "Méthode de surveillance des retombées des dioxines et furanes autour d'une UIOM" DURIF 2001<sup>43</sup>. En effet, l'objectif d'échantillonnage est identique, même s'il s'agit ici des retombées de PCB autour des émetteurs industriels potentiels.
- « Guide de surveillance de l'impact sur l'environnement des émissions atmosphériques des installations d'incinération et de co-incinération de déchets non-dangereux et de déchets d'activités de soin à risques infectieux » INERIS 2013<sup>45</sup>

Cette méthode consiste à entourer les établissements industriels par des points de mesures. Ceux-ci sont disposés à la fois dans la direction des vents dominants à différentes distances des émetteurs industriels potentiels mais également perpendiculairement à cette direction.

Cet échantillonnage spatial permet de déterminer si l'impact d'un émetteur est visible du fait :

- d'une augmentation des retombées sous les vents d'un émetteur (par comparaison avec les sites qui ne sont pas sous les vents),

- d'une décroissance des retombées lorsque l'on s'éloigne d'un émetteur.

Un point témoin de bruit de fond (rural et/ou urbain) est choisi en dehors de la zone d'étude.

### *Méthodes de prélèvement et d'analyse*

- **La mesure des retombées atmosphériques dans les jauges de dépôt** s'appuie sur la norme NF X 43014: Retombées atmosphériques totales (précipitations + particules)

Les analyses sont confiées au laboratoire de Rouen Alpa Chimies (groupe Alpa<sup>4</sup>), 49 rue Mustel, BP 4063, 76022 Rouen Cedex 3. La méthode d'analyse utilisée par le laboratoire de Rouen est l'analyse par chromatographie en phase gazeuse couplée à la spectrométrie de masse haute résolution combinée à une méthode de dilution isotopique (norme EPA 1668).

- **La méthode de mesure des retombées atmosphériques dans les lichens** est décrite dans le rapport A15-820 «Programme de recherche portant sur les PCB-DL, PCDD/F + PCB-DL, PCB-NDL et PCB Indicateurs dans les Lichens – ROUEN et LE HAVRE – 2104 »; Toute demande de ce rapport devra être adressée à Aair Lichens (17 rue des Chevrettes 44470 Carquefou).

On notera l'existence de la norme NF X 43-904 de janvier 2013 pour la préparation des échantillons de lichens en vue de réaliser des analyses : « 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 ». La méthode appliquée par Aair Lichens est en accord avec ce qui est décrit dans cette norme. Il était convenu de réaliser les prélèvements de lichens au plus près des sites accueillant les jauges OWEN, afin de faciliter le travail de comparaison des méthodes de prélèvements effectué ensuite pendant le traitement des résultats.

La photo ci-dessous montre l'étape de prélèvement des lichens in situ :



Figure 4 : Prélèvement de lichens - Photo Aair Lichens

- **La méthode de mesure des retombées atmosphériques dans les bryophytes** est décrite dans les rapports 14-RA-09-NC-11 et 15-RA-03-NC-06 (Toute demande de ces rapports devra être adressée à la société Biomonitor, 25 rue Anatole France, 54530 Parncy-sur-Moselle). La méthode est normalisée sous le numéro NF EN 16414 (2014).

---

<sup>4</sup> Un groupe de laboratoires majeur dans le domaine de l'hygiène et l'environnement, principalement en microbiologie et physico-chimie.



Figure 5 : *Brachythecium rutabulum* et *Pseudoscleropodium purum* - Photos Biomonitor

Les stations de mesures sont réparties au plus près des stations de mesures faisant l'objet d'une exposition de jauges installées par Air Normand.

### *Limites de quantification pour l'analyse des PCB dans les jauges*

La limite de quantification est la plus faible concentration d'un produit à analyser dans un échantillon qui puisse être quantifiée par le laboratoire d'analyse.

Les limites de quantification pour les analyses de PCB (dans les jauges) sont les suivantes :

- PCB-DL : 0,5 pg/jauge
- PCB<sub>i</sub> : 5,0 pg/jauge

On définit dans ce rapport une convention pour représenter les valeurs inférieures à la limite de quantification : Pour faciliter leur représentation graphique et les calculs, les valeurs non quantifiées sont considérées comme étant égales à la moitié de la limite de quantification.

### *Blancs terrains*

Les blancs terrains sont réalisés uniquement pour les jauges de dépôt. Il s'agit d'une jauge qui est transportée comme les autres jauges vers le site d'échantillonnage, mais n'est pas ouverte. Ainsi elle n'est pas exposée aux retombées atmosphériques. La jauge est retournée au laboratoire d'analyse et traitée de la même façon que les échantillons (jauges) exposés. Un blanc terrain est réalisé à chaque période d'échantillonnage. Il permet de contrôler si une éventuelle pollution a eu lieu lors des étapes de préparation, transport, manipulation, analyse. Dans cette étude, les valeurs des blancs terrains ne sont pas retranchées des résultats.

### **3.7 Références utilisées pour l'interprétation des résultats**

Actuellement, il n'existe pas de valeurs réglementaires permettant l'interprétation des résultats des PCB dans les retombées atmosphériques (collectées via des jauges de dépôts ou des bioindicateurs) en France ou à l'étranger. La recherche des valeurs repères est détaillée dans la partie 5.5.4.

**En l'absence de valeurs réglementaires**, les résultats de la campagne sont interprétés de la façon suivante :

- La comparaison entre Rouen et Le Havre est faite pour les 3 méthodes à la fois :
  - Sur les niveaux moyens sur chaque zone,
  - Sur les maxima.
- Pour les lichens :

Les résultats dans les lichens ne sont pas directement comparables avec les résultats dans les jauges. Ils sont interprétés d'après la grille proposée par Aair Lichens, calculée à partir de sa base de

données interne. Cette base de données s'enrichit en permanence. Pour les PCB-DL et les PCBi sont proposés respectivement une valeur de bruit de fond et une valeur de retombées significatives (valeurs qui s'écartent de plus de 40% du bruit de fond).

- Pour les bryophytes :

Les résultats dans les bryophytes ne sont pas directement comparables avec les résultats dans les lichens ou les jauges. L'interprétation des résultats d'analyses effectuées sur les bryophytes exposées consiste à comparer l'ensemble des résultats en utilisant ceux relevés sur la station témoin et en mettant en exergue les résultats marquants, en considérant notamment les conditions météorologiques et les influences exogènes de la zone d'étude.

Il n'existe pas de valeurs repères ou de références permettant l'interprétation des résultats (comme il peut en exister pour les dioxines / furanes et les métaux pour lesquels Biomonitor dispose d'un retour d'expérience plus grand que pour les PCB).

- Comparaisons aux autres régions ou autres pays (jauges, bioindicateurs) :

Selon la recherche bibliographique, la comparaison des différentes régions ou des autres pays n'est proposée que pour les jauges. En effet, il n'est pas possible de comparer les teneurs dans les bioindicateurs avec celles issues de la recherche bibliographique car il ne s'agit pas des mêmes bioindicateurs.

### 3.8 Origine des données

- Jauges : Les prélèvements sont effectués par Air Normand et le dosage des PCB est réalisé par le Laboratoire de Rouen Alpa Chimies (49 rue Mustel, BP 4063, 76022 Rouen Cedex 3),
- Lichens : Les prélèvements sont réalisés par la société AairLichens. Les dosages des PCB dans les lichens ont été réalisés par le Laboratoire CARSO à Lyon (69), agréé et certifié COFRAC.
- Bryophytes : Les prélèvements sont réalisés par la société Biomonitor. Les analyses ont été confiées au laboratoire Micropolluants Technologie, qui dispose de l'accréditation COFRAC selon la norme NF EN ISO/CEI 17025.

### 3.9 Limites

- La mesure des retombées dans les jauges n'est pas parfaitement répétable. Par exemple, une jauge exposée sur le terrain peut être légèrement penchée, souillée par un élément extérieur, etc., ce qui peut influencer la qualité du prélèvement. Lorsque cela est remarquable, cette information est notée par les techniciens d'Air Normand lors de la récupération des jauges sur le terrain et le cas échéant les résultats de la jauge incriminée sont invalidés. Néanmoins, ce type de problème ne peut pas toujours être identifié. C'est pourquoi on considère qu'un résultat de retombées sur un site ne peut être interprété de façon fiable que lorsqu'il est obtenu plusieurs fois, lors d'échantillonnages successifs ou effectués côte à côte. Par exemple, un résultat obtenu sur un site plusieurs années de suite témoigne d'un phénomène confirmé. Dans cette étude exploratoire, les résultats sont limités puisque la campagne n'est effectuée que deux fois dans l'année 2014. Cependant, il serait intéressant de la poursuivre sur quelques sites de mesure remarquables afin de confirmer les observations obtenues dans cette étude.
- Il n'existe pas de valeurs réglementaires ou sanitaires françaises sur les données de retombées atmosphériques des PCB. L'interprétation des résultats des campagnes de mesure s'appuie donc uniquement sur les valeurs de comparaison disponibles issues de l'étude

bibliographique ou sur le caractère significatif ou élevé d'une retombée. Cette comparaison aux données bibliographiques doit cependant être considérée avec prudence, car on ne connaît pas avec précision comment ont été réalisées les mesures issues de la bibliographie. Certains facteurs peuvent avoir une influence sur les résultats présentés, par exemple les limites de quantification des laboratoires d'analyse, le fait de retrancher ou non les blancs terrains des résultats, etc.

## 4. Déroulement

---

### 4.1 Période

La campagne de mesure par jauges réalisée en 2014 a eu lieu aux dates suivantes :

Sites	Dates des prélèvements	Durée
<b>Jauges</b>		
Sites de Rouen en continu	Du 14/01/2014 au 12/03/2014 (hiver)	57 jours
	Du 04/07/2014 au 02/09/2014 (été)	60 jours
Sites du Havre en continu	Du 14/01/2014 au 11/03/2014 (hiver)	56 jours
	Du 08/07/2014 au 04/09/2014 (été)	58 jours
<b>Lichens</b>		
Sites de Rouen	08/07/2014	
Sites du Havre	18-21/10/2014	
<b>Bryophytes</b>		
Sites de Rouen	07/08/2014	
Sites du Havre	18/11/2014	

Tableau 2 : Dates des prélèvements

L'étude bibliographique a quant à elle été conduite au cours du premier semestre 2015.

### 4.2 Sites de mesure

- Les sites de l'agglomération rouennaise sont répartis autour de l'incinérateur TRIADIS Service :
  - Dans les communes de Grand Quevilly, Petit Quevilly et Rouen,
  - Autour de TRIADIS (en zone industrielle de Rouen) surtout sur les axes des vents dominants (sud-ouest/nord-est),
  - En milieu urbain,
  - Un site urbain au centre-ville de Rouen (Préfecture), plus éloigné de l'incinérateur, pour représenter une zone témoin de bruit de fond « haut », c'est-à-dire en milieu urbain.
- Les sites du Havre sont repartis autour de l'incinérateur SEDIBEX :

- Dans les communes de Sandouville et Rogerville,
- Autour de SEDIBEX (en zone industrielle du Havre),
- Un site à Sandouville (Château d'eau), sur les plateaux nord, plus éloigné de l'incinérateur pour représenter une zone témoin de bruit de fond « haut », c'est-à-dire dans ce cas, en milieu rural habité.

Le tableau suivant récapitule les 10 sites retenus pour les agglomérations rouennaise et havraise :

N° de site	Nom du site	Commentaire
<b>Rouen</b>		
Site 1	SCI Jonques de la Seine	Z.I.
Site 2	Port Autonome GPMR	Z.I.
Site 3	Atelier PQV (Petit Quevilly) Terrasse	Urbain (arrêt du site en avril pour les jauges)
Site 4	Stade Mermoz	Urbain
Site 5	Ateliers PQV Sol	Urbain
Site 6	Préfecture	Bruit de fond urbain. (début des mesures en juillet pour les jauges <sup>5</sup> )
<b>Le Havre</b>		
Site 7	Restaurant Le Gabion d'Or Sandouville	Z.I.
Site 8	APAVE Sandouville	
Site 9	SDV Sandouville	
Site 10	France Liants Rogerville	
Site 11	Château d'Eau Sandouville	Bruit de fond rural habité.

**Tableau 3 : La répartition des 10 sites de mesure de PCB en 2014**

L'adresse du site 3 est identique à celle du site 5 sur Petit Quevilly, seule la hauteur du prélèvement diffère.

En accord avec Air Normand, les prélèvements des lichens et des bryophytes sont effectués le plus près possible des jauges.

<sup>5</sup> Des modifications ont lieu durant l'année :

- En raison d'une sous-estimation des concentrations des PCB lorsque les jauges sont mises à la hauteur de la terrasse au mois de janvier, le site est arrêté en avril. Seul le site 5 à hauteur du sol est conservé.
- Le site 6 urbain de la Préfecture est installé pour la deuxième série de mesure, c'est-à-dire au mois de juillet. (Des travaux avaient empêché son installation auparavant).

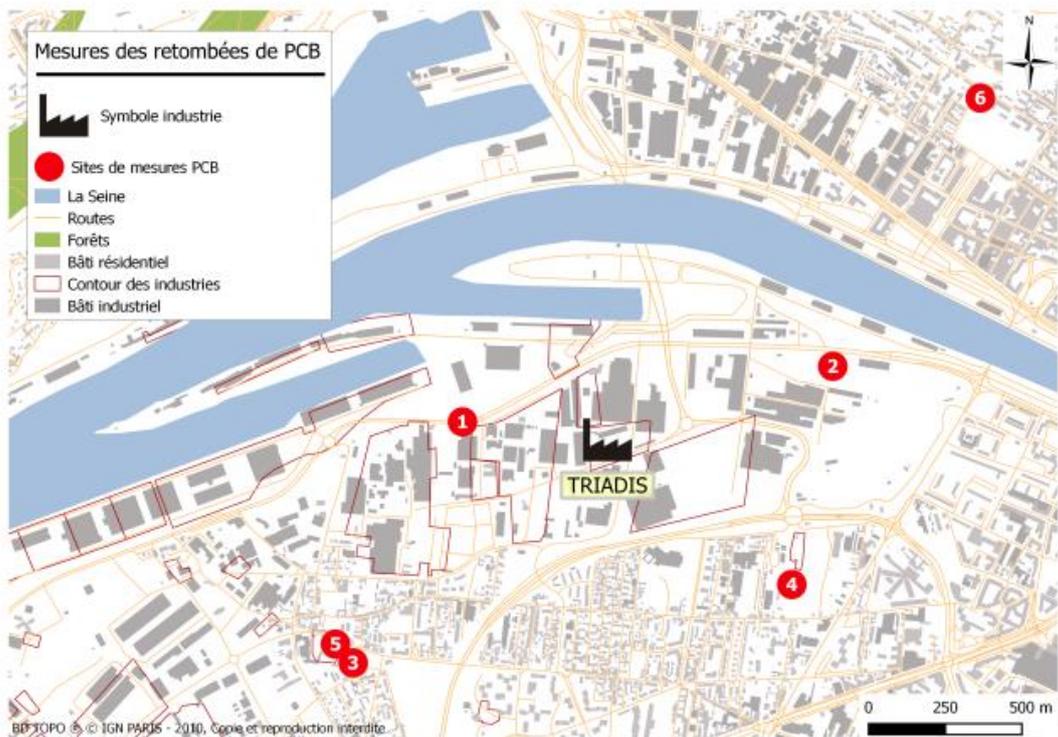


Figure 6 : Localisation des prélèvements à Rouen en 2014



Figure 7 : Localisation des prélèvements au Havre en 2014

## 5. Etude bibliographique

### 5.1 Généralités

#### 5.1.1 Définition et caractéristiques chimiques

Les PCB sont des composés aromatiques organochlorés dérivés du biphényle (2 noyaux phényle), dans lesquels des atomes de chlore remplacent les molécules d'hydrogène. Leur formule chimique est :  $C_{12}H_{(10-n)}Cl_n$  (avec  $1 \leq n \leq 10$ ). Chaque noyau peut comporter jusqu'à 5 atomes de chlore en substitution des atomes d'hydrogène, il existe donc 10 degrés de chloration (les « homologues ») allant du monochloro-biphényle au décachloro-biphényle.

La figure ci-dessous représente la structure chimique des PCB :

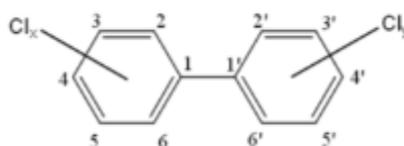


Figure 8 : Structure chimique des PCB avec le numéro des positions (source : U.S. Department of Health & Human Services, 2000<sup>54</sup>)

A partir de la structure précédente, un grand nombre de composés chlorés sont possibles. Ainsi, **il existe 209 combinaisons possibles, appelées « congénères »** selon le nombre et la position des atomes de chlore. Chaque PCB est ainsi usuellement défini par un numéro entre 1 et 209, selon la nomenclature IUPAC (International Union of Pure and Applied Chemistry).

Le système de nomenclature pour les positions des chlores est défini de la manière suivante :

Numéro des positions	Nom des positions
2, 2', 6 et 6'	Ortho
3, 3', 5, et 5'	Méta
4 et 4'	Para

Tableau 4 : Système de nomenclature des positions de chlore (Source: U.S. Department of Health & Human Services, 2000<sup>54</sup>)

Les noyaux benzéniques peuvent tourner autour de la liaison qui les relie. Il existe donc **2 configurations extrêmes** :

- **Coplanaires** : les deux noyaux benzéniques dans le même plan. Cette configuration est possible dans les deux cas suivants ;
  - **Les non-ortho substitués** : les noyaux sont substitués sur les autres positions (méta et/ou para) et **pas de substitution sur la position ortho**,
  - **Les mono-ortho substitués** : les noyaux sont substitués/non-substitués sur les autres positions (méta et/ou para) et **substitués par un atome de chlore sur la position ortho**.
- **Non-coplanaires** : les noyaux benzéniques sont à 90° l'un par rapport à l'autre. Cette configuration est possible pour ;
  - les mono-ortho substitués,
  - **les di-ortho substitués** : les noyaux sont substitués/non-substitués sur les autres positions (méta et/ou para) et **substitués par deux atomes de chlore sur la position ortho**.

Plus les positions ortho sont substituées par les chlores, plus les noyaux benzéniques tournent hors de la configuration coplanaire.

(Source: U.S. Department of Health & Human Services, 2000 – page 467<sup>54</sup>)

La figure ci-dessous montre la différence entre la structure non coplanaire et coplanaire.

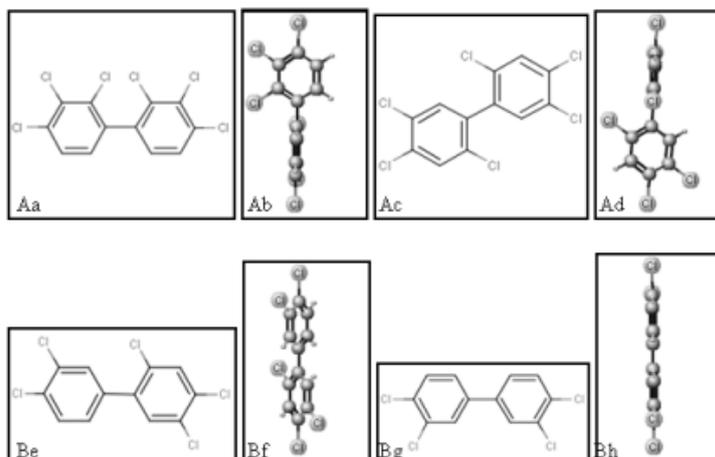


Figure 9 : A : PCB non coplanaires. Structures bi- (a, c) et tridimensionnelles (b, d) de PCB 128 (a, b) et de PCB 153 (c, d) ; B : PCB coplanaires (« dioxin-like »). Structure bi- (e, g) et tridimensionnelles (f, h) de PCB 118 (e, f) et de PCB 77 (g, h) (Campagna, 2008<sup>25</sup>)

Les 209 congénères sont repartis selon 2 catégories établies en prenant en compte les effets tératogènes<sup>6</sup> des PCB :

○ **PCB de type dioxine (PCB dioxine-like : PCB-DL)**

Les PCB-DL ont une configuration plane, très comparable aux dioxines. Les PCB-DL sont au nombre de 12 et sont considérés comme les plus toxiques pour la santé. Néanmoins, ils sont les moins abondants dans les mélanges industriels comme dans les matrices environnementales.

(Source : INERIS, 2011<sup>44</sup>)

Selon Van den Berg et al., 2006<sup>60</sup>, les PCB-DL sont constitués à la fois des non-ortho et des mono-ortho PCB et peuvent avoir une configuration coplanaire ou non-coplanaire. Par contre ces composés ont en commun les critères suivants :

- ❖ Une structure similaire aux PCDD et aux PCDF,
- ❖ Ils sont capables de se lier au même récepteur cellulaire que les dioxines (récepteur Ah<sup>7</sup>),
- ❖ Ils entraînent des réponses toxiques et biochimiques via le récepteur Ah,
- ❖ Ils sont persistants et s'accumulent dans la chaîne alimentaire.

<sup>6</sup> Le terme tératogène désigne une substance ou un procédé qui provoque des malformations fœtales lorsque la mère est exposée.

<sup>7</sup> Récepteur des hydrocarbures aromatiques : une protéine au sein de la cellule, qui s'attache aux hydrocarbures aromatiques, formant ainsi un complexe pénétrant le noyau de la cellule. Ce complexe contrôle, dans le noyau, la production de protéines, dont certaines sont associées à la croissance cellulaire et la différenciation (spécialisation). Les récepteurs Ah ont tendance à se lier aux hydrocarbures aromatiques halogénés, y compris les dioxines et les PCB, qui peuvent entraîner des changements dans l'expression génétique, ayant ainsi des répercussions sur la croissance, la forme et le fonctionnement des cellules. C'est pour cette raison que ces substances peuvent être cancérigènes ou tératogènes.

(Source : Greenfacts.org, 2015<sup>5</sup>)

- **Les autres PCB (PCB non dioxin-like : PCB-NDL)**

Les autres 197 congénères ne correspondant pas à l'ensemble des critères précédents. Ils sont désignés sous le nom de PCB-NDL. Certains peuvent entraîner des effets différents de ceux des PCB-DL (e.g. la perturbation endocrinienne, l'immunotoxicité, etc.), c'est-à-dire n'impliquant pas le récepteur Ah.

(Source : U.S. Environmental Protection Agency, 2003<sup>56</sup>)

En 1982, 7 PCB<sub>i</sub> (PCB indicateurs) parmi les 209 congénères ont été sélectionnés par le Bureau Communautaire de Référence de la Commission Européenne (Bruxelles) comme étant les composés à rechercher en priorité dans les analyses de matrices organiques (sédiment, sang, chair, graisse) du fait de leur persistance et de leur abondance dans l'environnement ainsi que de leurs propriétés toxicologiques (Dargnat et Fisson, 2010<sup>34</sup>). Tous ces PCB<sub>i</sub> sont des PCB-NDL, sauf le PCB 118, qui est à la fois indicateur et dioxine-like.

(Source : INERIS, 2011<sup>44</sup>)

Le Tableau 5 ci-après présente les 12 PCB-DL et les 6 PCB<sub>i</sub>.

Structure	Substance	Congénères
<b>PCB-DL</b>		
<b>PCB Non-ortho</b>	3,3',4,4'-tetraCB	PCB 77
	3,4,4',5-tetraCB	PCB 81
	3,3',4,4',5-pentaCB	PCB 126
	3,3',4,4',5,5'-hexaCB	PCB 169
<b>PCB Mono-ortho</b>	2,3,3',4,4'-pentaCB	PCB 105
	2,3,4,4',5-pentaCB	PCB 114
	2,3',4,4',5-pentaCB	PCB 118 <sup>8</sup>
	2',3,4,4',5-pentaCB	PCB 123
	2,3,3',4,4',5-hexaCB	PCB 156
	2,3,3',4,4',5'-hexaCB	PCB 157
	2,3',4,4',5,5'-hexaCB	PCB 167
	2,3,3',4,4',5,5'-heptaCB	PCB 189
<b>PCB<sub>i</sub></b>		
<b>PCB Mono-ortho</b>	2,4,4'-triCB	PCB 28
<b>PCB Di-ortho</b>	2,2',5,5'-tetraCB	PCB 52
	2,2',4,5,5'-pentaCB	PCB 101
	2,2',3,4,4',5-hexaCB	PCB 138
	2,2',4,4',5,5'-hexaCB	PCB 153
	2,2',3',4,4',5,5'-heptaCB	PCB 180

Tableau 5 : Les PCB-DL et les PCB<sub>i</sub> (source : INERIS 2011<sup>44</sup>)

Stables chimiquement et peu biodégradables, les PCB sont classés parmi les polluants organiques persistants (POP). Ils s'accumulent progressivement dans l'environnement, en particulier, dans les sédiments marins ou de rivières, puis tout au long de la chaîne alimentaire. Ils se concentrent particulièrement dans les tissus graisseux des animaux, la principale voie de contamination de la population est donc l'ingestion d'aliments contaminés riches en graisse.

Les formulations les plus courantes de PCB avaient pour nom commercial «Pyralène» ou «Aroclor».

(Source : INERIS, 2011<sup>44</sup>)

<sup>8</sup> Selon INERIS, 2011, le PCB 118 est aussi un PCB<sub>i</sub>.

### 5.1.2. Réglementations

Les réglementations appliquées en France concernant les PCB sont les suivantes :

<b>Arrêté du 20 sept 2002</b> <ul style="list-style-type: none"><li>• Arrêté du 18 décembre 2012 modifie cet arrêté de 2002 : concerne les installations d'incinération et de co-incinération de déchets non dangereux et aux installations incinérant des déchets d'activités de soins à risques infectieux</li><li>• Version consolidée au 01 janvier 2013 (Article 30) : la mise en oeuvre d'un programme de surveillance de l'impact de l'installation sur son environnement</li></ul>
<b>Commission du 19 décembre 2006</b> <ul style="list-style-type: none"><li>• Fixation de teneurs maximales pour certains contaminants dans les denrées alimentaires</li></ul>
<b>Conseil du 24 novembre 2010</b> <ul style="list-style-type: none"><li>• Relative aux émissions industrielles (prévention et réduction intégrées de la pollution)</li></ul>
<b>Commission du 23 août 2011</b> <ul style="list-style-type: none"><li>• Concerne la réduction de la présence de dioxines, de furanes et de PCB dans les aliments pour animaux et les denrées alimentaires</li></ul>
<b>Commission du 2 décembre 2011</b> <ul style="list-style-type: none"><li>• Nouvelle fixation des teneurs maximales en dioxines, en PCB de type dioxine et en PCB autres que ceux de type dioxine des denrées alimentaires (utilisation des TEF-OMS 2005)</li><li>• Recommandation sur la réduction de dioxines, de furanes et de PCB dans les aliments pour animaux et les denrées alimentaires</li></ul>
<b>Commission du 21 mars 2012</b> <ul style="list-style-type: none"><li>• Fixation des méthodes de prélèvement et d'analyse d'échantillons à utiliser pour le contrôle officiel des teneurs en dioxines, en PCB -DL et en PCB-NDL de certaines denrées alimentaires</li><li>• même fixation sur le nouveau règlement de la commission du 2 juin 2014</li></ul>
<b>Commission du 30 octobre 2013</b> <ul style="list-style-type: none"><li>• modifie un règlement concernant les teneurs maximales en dioxines, PCB-DL et PCB-NDL dans le foie des animaux terrestres.</li></ul>

Figure 10 : La réglementation appliquée en France (Source : Portail de l'Economie et des Finances, 2015<sup>11</sup> et Règlement (UE) N°1259/2011 de la commission du 2 décembre 2011<sup>16</sup>)

### 5.1.3. Facteur d'équivalence de toxicité de l'OMS

Selon Van den Berg et al., 2006<sup>60</sup>, les PCB font partie des polluants organiques persistants qui sont hydrophobes et lipophiles. La plupart des effets toxiques et biologiques de ces composés sont transmis par le récepteur Ah présent dans la plupart des tissus des vertébrés. L'exposition humaine, soit par la nourriture ou par l'environnement, conduit à l'assimilation d'un grand nombre de ces composés ainsi qu'à la rétention de dizaines de congénères de PCB dans les tissus, le sang et le lait.

Au cours des dernières décennies, un modèle additif est déduit à partir des données issues de nombreuses études expérimentales sur des mélanges de ces composés. Un effet additif se produit lorsque l'effet combiné de l'exposition d'un mélange chimique est égal à la somme des effets indépendants. En conséquence de cette additivité généralement acceptée, le concept d'équivalence toxique a été développé au milieu des années 80. Ce concept fonctionne sur l'hypothèse que les contaminants évalués ont des effets additifs dans les mélanges. Puisque les dioxines et les composés DL agissent de même façon sur le récepteur Ah, leurs quantités individuelles pondérées par un

facteur de toxicité spécifique à chaque congénère peuvent être ajoutées. Cette somme est exprimée en TEQ (équivalence de toxicité de l'OMS) et permet d'évaluer la toxicité totale.

Les résultats des tests de toxicité pour chaque congénère varient selon leur structure et leur comportement chimique. Ces tests ont permis de comparer chaque congénère entre eux et d'attribuer à chacun un facteur d'équivalent toxique. Ce facteur est connu sous le nom de TEF (Toxic Equivalent Factor)

Selon le rapport de U.S. Environmental Protection Agency, 2010<sup>58</sup>, les TEF sont des valeurs relatives qui caractérisent la toxicité d'une dioxine ou d'un composé DL par rapport à une substance chimique de référence à savoir la tétrachlorodibenzo-p-dioxine (TCDD). Cette dioxine émise durant l'accident de SEVESO est considérée comme le composé DL le plus toxique connu à ce jour. De ce fait on lui a attribué un TEF de 1,0. Tous les autres composés possèdent donc un TEF plus faible. Parfois, le PCB 126 est également utilisé comme produit chimique de référence avec 0,1 comme valeur de TEF.

$$TEQ = \sum [C_i] \times TEF_i$$

Équation 1: Calcul des TEQ (Source: Van den Berg et al., 2006)

Les équivalents toxiques (TEQ) expriment la toxicité globale des mélanges de PCDD, PCDF et les PCB. Cette valeur est plus significative pour les toxicologues que la concentration totale sans application du TEF. Pour obtenir les TEQ, la concentration  $C_i$  de chaque congénère dans un mélange est multipliée par son TEF et est ensuite additionnée pour tous les autres congénères afin d'exprimer la toxicité pondérée totale. Les TEQ sont ensuite utilisés pour la caractérisation et la gestion des risques (e.g. aide à la décision de dépollution dans certaines régions et à l'évaluation des risques posés par l'exposition des PCB sur la santé humaine).

Depuis le début des années 1990, l'OMS a organisé des réunions d'experts dans le but d'harmoniser les facteurs TEF pour les dioxines et composés DL sur le plan international, donnant ainsi des recommandations aux autorités réglementaires nationales. Avant 2005, deux réévaluations des TEF OMS ont été menées. La première évaluation en 1993 a abouti à la standardisation des facteurs TEF de l'homme et des mammifères pour tous les 2,3,7,8-PCDD et les PCDF, ainsi qu'à une valeur TEF recommandée pour plusieurs PCB. En 1997, une autre réévaluation a conduit à la révision de plusieurs valeurs TEF des congénères importants. En outre, les premières valeurs TEF pour les oiseaux et les poissons ont été proposées au cours de cette réunion.

**En Juin 2005, une troisième réunion OMS a eu lieu à Genève, en Suisse afin de réévaluer les valeurs des TEF 1998. Dans le cadre de cette étude, nous allons évoquer les facteurs TEF OMS-2005 qui sont utilisés pour les évaluations des risques sur l'être humain.** Le tableau suivant compare les TEF OMS-2005 par rapport à ceux de 1998.

(Source : Van den Berg et al., 2006<sup>60</sup>)

Compound	WHO 1998 TEF	WHO 2005 TEF
<b>PCB Non-ortho</b>		
3,3',4,4'-tetraCB (PCB 77)	0.0001	0.0001
3,4,4',5-tetraCB (PCB 81)	0.0001	<b>0.0003</b>
3,3',4,4',5-pentaCB (PCB 126)	0.1	0.1
3,3',4,4',5,5'-hexaCB (PCB 169)	0.01	<b>0.03</b>
<b>PCB Mono-ortho</b>		
2,3,3',4,4'-pentaCB (PCB 105)	0.0001	<b>0.00003</b>
2,3,4,4',5-pentaCB (PCB 114)	0.0005	<b>0.00003</b>
2,3',4,4',5-pentaCB (PCB 118)	0.0001	<b>0.00003</b>
2',3,4,4',5-pentaCB (PCB 123)	0.0001	<b>0.00003</b>
2,3,3',4,4',5-hexaCB (PCB 156)	0.0005	<b>0.00003</b>
2,3,3',4,4',5'-hexaCB (PCB 157)	0.0005	<b>0.00003</b>
2,3',4,4',5,5'-hexaCB (PCB 167)	0.00001	<b>0.00003</b>
2,3,3',4,4',5,5'-heptaCB (PCB 189)	0.0001	<b>0.00003</b>

Tableau 6: Tableau récapitulatif des valeurs de TEF de l'OMS 1998 et de l'OMS 2005 (source : Van den Berg et al., 2006)

\*Les valeurs en gras indiquent qu'il y a une modification dans les valeurs de TEF.

Dans le cadre de notre étude, les teneurs des PCB-DL sont exprimées en TEQ-OMS 2005.

## 5.2 Production et utilisations des PCB

La production des PCB a commencé aux Etats-Unis en 1929 et s'est étendue en Allemagne en 1930. Après la deuxième guerre mondiale, la production s'est développée dans d'autres pays européens incluant la France (développement par la société Prodelec). Entre 1955 et 1984, la production française a été estimée à près de 150 000 tonnes réparties sur deux sites de région grenobloise : Jarrie et Pont-de-Claix dont 60 000 pour le matériel électrique.

Les PCB à usage commercial étaient principalement utilisés dans les applications suivantes :

Matériels électriques	<ul style="list-style-type: none"> <li>•fluides isolants dans les transformateurs</li> <li>•fluides isolants dans les gros condensateurs</li> </ul>
Echangeurs thermiques et hydrauliques	<ul style="list-style-type: none"> <li>•fluide caloporteur dans des circuits à haute température à risque incendie (e.g. navires transportant des combustibles)</li> <li>•fluide hydraulique de sécurité dans des environnements à risque ou contrainte thermique (mines de charbon)</li> </ul>
Matières plastiques	<ul style="list-style-type: none"> <li>•additif ignifugeant</li> </ul>
Peintures, laques, vernis, colles, encres (reprographie par effet thermique)	<ul style="list-style-type: none"> <li>•agents plastifiants et adhésifs</li> </ul>
Fils, câbles, textiles synthétiques, joints d'isolation et mastics,	<ul style="list-style-type: none"> <li>•agents plastifiants et adhésifs</li> </ul>
Produits en PVC, caoutchouc, papier	<ul style="list-style-type: none"> <li>•agents plastifiants et adhésifs</li> </ul>
Revêtements	<ul style="list-style-type: none"> <li>•anti-corrosifs dans la formulation des peintures</li> <li>•et vernis puisqu'ils résistent bien aux agents oxydants</li> </ul>

Figure 11 : Les secteurs d'utilisation principaux des PCB avant l'interdiction (Source : INERIS, 2011)

Depuis 1987, la production et l'utilisation des PCB sont interdites en France.

(Source : INERIS, 2011<sup>44</sup>)

## 5.3 Rejet dans l'environnement

### 5.3.1. Sources de rejet dans l'atmosphère

Les PCB sont susceptibles d'apparaître dans l'atmosphère par :

- **Fabrication de l'acier**

L'acier est fabriqué principalement dans deux types d'usines :

- **Dans un haut fourneau** : à partir du minerai de fer

Le minerai de fer doit d'abord être traité dans **une usine d'agglomération**, une installation sidérurgique servant à fritter le minerai de fer pour le rendre compatible à l'utilisation dans le haut fourneau. Ensuite, le produit obtenu, appelé « aggloméré » est chargé dans le haut fourneau avec du coke (du carbone presque pur extrait du charbon) afin d'obtenir l'acier liquide, puis transformé finalement en acier.

L'étude de Aries et al., 2006<sup>21</sup> a montré que le profil des congénères des PCB-DL est identique pour toutes les usines d'agglomération au Royaume-Uni, ce qui indique que l'émission des PCB est caractéristique du procédé d'agglomération du minerai de fer.

- **Dans un four à arc électrique** : à partir d'acier de récupération (ou acier de recyclage)

Une des sources principales de l'acier de recyclage est la démolition navale. Avant l'interdiction, les PCB étaient largement utilisés sur les bateaux dans les années 1960-1980 comme agent anti-gel dans les huiles moteurs. Il est donc possible de retrouver des PCB dans l'air suite à sa volatilisation depuis les dépotoirs de ferraille issue de la démolition navale.

(Source : EU-India Action Plan Support Facility - Environment, 2008<sup>36</sup>)

Selon Aydin et al., 2014<sup>22</sup>, dans la région fortement industrialisée d'Aliaga en Turquie, **les sources majeures des émissions des PCB sont les usines de fabrication des aciers** et de la démolition navale. Ils ont déterminé que les congénères moins chlorés sont dominants dans cette source d'émission, par exemple le PCB<sub>i</sub> 28. Par ailleurs, l'étude de De Souza Pereira et al., 2007<sup>35</sup> a montré la dominance de PCB 118 dans des sites très influencés par la zone de l'industrie métallurgie.

En plus de la fabrication des aciers, l'aciérie électrique est aussi utilisée pour **le recyclage des poussières d'aciéries** par le procédé « Waelz ». C'est une des méthodes très utilisées pour recycler les poussières d'aciéries électriques afin de récupérer le zinc. Dans la plupart des cas, les matériaux d'alimentation sont très contaminés par les composés chlorés et les PCB. Ceci aboutit ainsi à une forte possibilité d'émission des PCB (Chi et al., 2007<sup>29</sup>).

- **La combustion réalisée dans les incinérateurs des déchets.**

Il a été suggéré que les PCB venant des incinérateurs sont formés par :

- Les congénères présents initialement dans les matériaux de combustion. (Van Gerven et al., 20020),
- « De novo synthesis » : formation des PCB par chloration et oxydation de carbones imbrulés présents dans les cendres (Van Caneghem et al., 2014<sup>59</sup>).

Dans l'étude de Castro-Jiménez et al., 2011<sup>27</sup>, il a été montré que le PCB 118 est dominant sur le site Etang de Thau en France. C'est un site rural mais très influencé par les incinérateurs des déchets et les centres urbains.

- **La combustion du bois et du charbon**

Selon l'étude de Aydin et al., 2014<sup>22</sup>, les émissions de PCB peuvent aussi être liées à la combustion du bois (chauffage résidentiel) et au feu des résidus de cultures sur les sols agricoles. Les émissions issues de la combustion du charbon sont quant à elles d'origine industrielle et résidentielle. Les PCB qui sont dominants dans ce type de sources sont les PCB-DL 105, 118, et 156.

- **La volatilisation depuis les bâtiments construits au début des années 70**

Dans ces bâtiments, les PCB étaient utilisés dans les matériaux de construction, dans les transformateurs et les condensateurs. (Gingrich et al., 2001<sup>37</sup>). Plusieurs études montrent la présence de PCB dans les bâtiments et monuments datant d'avant 1976 (joints de dilatation des bétons dans les villes, mastic élastique).

- **Le sol**

L'accumulation des PCB dans les boues d'épuration est d'origine domestique (e.g. l'élimination des résidus de PCB présentes dans les denrées alimentaires par l'excrétion humaine) et d'origine industrielle. L'utilisation de ces boues dans l'épandage agricole se traduit par l'augmentation des teneurs en PCB dans le sol agricole et donc par la volatilisation des PCB dans l'atmosphère. La volatilisation est plus importante pour les congénères les moins chlorés.

(Source: U.S. Department of Health & Human Services, 2000, page 509-510<sup>54</sup>)

Les apports au sol par les décharges non contrôlées et les sédiments fluviaux et portuaires sont aussi à considérer. Les températures élevées estivales peuvent favoriser la volatilisation de PCB.

(Source : Steinberg et al., 1989<sup>52</sup> ; Garban et al., 2001<sup>49</sup>)

- **La circulation automobile**

Selon l'étude de Brož et al., 2000<sup>24</sup>, l'émission du moteur à combustion interne contient des PCB à cause de la réaction « de novo synthesis ». Cette réaction est influencée par la présence du chlore dans l'essence au plomb (dont l'utilisation est interdite en France depuis 2000) et dans l'huile moteur. Une mesure expérimentale a montré que la teneur en chlore dans le carburant est déjà suffisamment élevée pour former les PCB pendant l'émission du moteur. L'étude a aussi montré que la teneur en PCB dans le gaz d'échappement est le double de celle de l'air en entrée du moteur. Les congénères de tétra- et hexachlorobiphényle sont plus présents dans les émissions du moteur à combustion interne qui utilise les huiles synthétiques.

Il est intéressant de mentionner qu'en hiver, dans la période qui suit la dispersion des chlorures inorganiques (sel gemme) sur les routes<sup>9</sup>, il semble très probable que des PCB soient produits lors du processus de combustion des moteurs du fait de l'aspiration des aérosols riches en halogène (chlore notamment).

---

<sup>9</sup> Pour l'instant, le produit chimique le plus utilisé sur la route pendant l'hiver est le sel gemme (chlorure de sodium) en raison de sa rentabilité et de sa facilité de manipulation. Les conséquences de l'utilisation du sel de voirie sont visibles sur la qualité de l'eau et la corrosion du véhicule (source : Margaret Chase Smith Policy Center, 2010<sup>46</sup>).

### 5.3.2. Valeurs statistiques d'émission des PCB par secteur dans le milieu atmosphérique en France

En 2012, les émissions atmosphériques de PCB en France tous secteurs confondus (industriels et autres) représentaient 58 kg, soit une diminution de 68 % depuis le maximum enregistré en 1993 (183 kg).

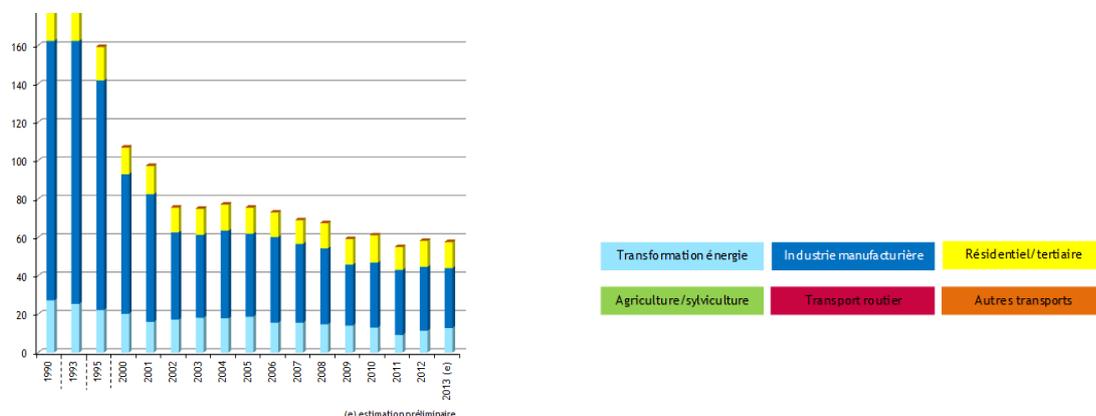


Figure 12: Emissions atmosphériques de PCB par secteur en France métropolitaine en kg (source : CITEPA/Format SECTEN -Avril 2014)

Cette baisse est observée sur l'ensemble des principaux secteurs émetteurs mais plus particulièrement dans le secteur de l'industrie manufacturière.

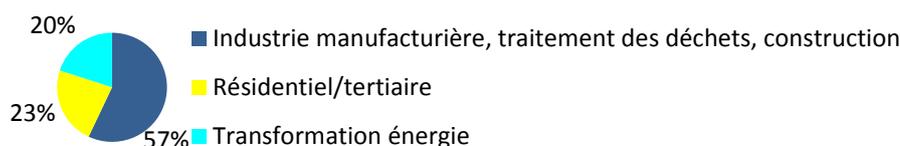


Figure 13 : Distribution des émissions atmosphériques des PCB en 2012 (source : CITEPA/Format SECTEN, Avril 2014)

Il est à noter que certaines sources d'émission vers l'atmosphère ne sont pas prises en compte dans ces inventaires, en particulier les émissions directes par volatilisation à partir des équipements contenant des PCB. Dans le secteur de l'industrie manufacturière, les émissions sont dues aux installations de traitement des déchets industriels dangereux et des déchets non dangereux, ainsi qu'à l'émission des aciéries électriques. En outre, concernant le secteur résidentiel (et dans une moindre mesure tertiaire), la consommation du charbon est en baisse entre 1990 et 2012. Quant au secteur de la transformation d'énergie, les émissions proviennent majoritairement de la production d'électricité (charbon, récupération d'énergie à partir des incinérateurs, ...). Les autres secteurs : autres transport et agriculture/sylviculture contribuent pour 0.3% et 0.2% respectivement (en 2012). Le CITEPA considère l'impact du transport routier comme négligeable. Cependant, en 2014, COPERT a introduit les facteurs des émissions pour calculer les PCB, mais il y a peu d'études sur le sujet. Les chiffres d'émissions dues à la combustion (tous secteurs confondus) sont consultables par type de combustible dans l'Annexe 7 : Emissions dans l'air en France métropolitaine par type de combustibles.

(Source : CITEPA/Format SECTEN, Avril 2014<sup>10</sup>)

## 5.4 Présence & devenir dans l'environnement

### 5.4.1. Comportement dans l'environnement

Les PCB sont des composés persistants dont les propriétés physico-chimiques varient selon le nombre et la position des atomes de carbone. De manière générale, ces propriétés évoluent avec le degré de chloration. Le schéma suivant montre le cycle des PCB dans l'environnement :

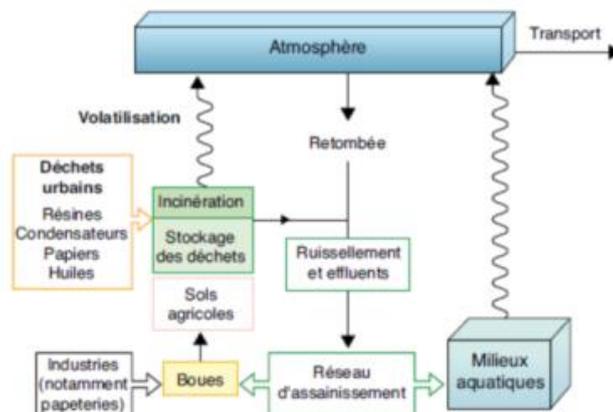


Figure 14 : Cycle des PCB dans l'environnement (source: INERIS, 2011)

Selon Hansen, 1999<sup>41</sup>, les PCB sont plutôt dispersés d'un type d'environnement à un autre type (e.g. du sol à l'eau, de l'eau à l'atmosphère, etc.).

Les congénères plus chlorés et moins ortho-substitués sont moins volatils, moins solubles dans l'eau et se fixent plus sur les particules des matières organiques. Donc, ils sont plus présents dans les sols et les sédiments, et ils ont des facteurs de bioaccumulation plus élevés.

Les congénères moins chlorés et plus ortho-substitués sont plus volatils, plus solubles dans l'eau et plus susceptibles d'être métabolisés par les mammifères. Par conséquent, ces congénères sont plus présents dans l'atmosphère, la surface de l'eau et dans les poissons des eaux plus froides<sup>10</sup> (vers les pôles de la terre).

Par leur stabilité dans l'atmosphère, les origines de ces composés peuvent être très éloignées, au niveau du continent ou au-delà. Ils se bioaccumulent dans l'environnement puisqu'ils sont transférés en continu entre l'air, l'eau et le sol par les produits chimiques naturels et les processus physiques comme la météorisation<sup>11</sup>, les précipitations, les retombées atmosphériques, et l'advection<sup>12</sup>.

Dans le cadre de l'étude, nous allons nous concentrer principalement sur les PCB se trouvant dans l'atmosphère et les retombées atmosphériques.

### 5.4.2. Présence des PCB dans l'atmosphère et les retombées atmosphériques

Les composants de notre atmosphère peuvent être schématisés ainsi :

<sup>10</sup> Ce sont des eaux dans les régions ayant des latitudes plus hautes que les latitudes tropicales. C'est-à-dire les régions entre le tropique du Cancer et le cercle polaire Arctique pour l'hémisphère du nord ainsi qu'entre le tropique du Capricorne et le cercle Antarctique pour l'hémisphère du sud.

<sup>11</sup> Les modifications d'ordre mécanique, physico-chimique ou biochimique, que subissent les roches au contact des agents atmosphériques.

<sup>12</sup> Le déplacement horizontal d'une masse d'air atmosphérique.

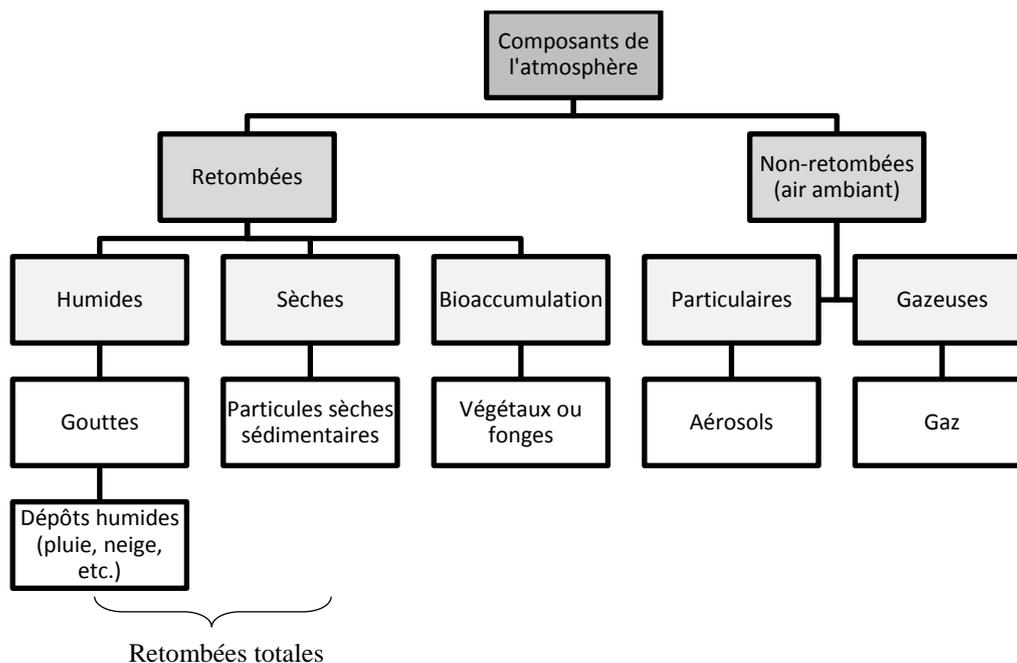


Figure 15 : La différence des composants dans l'atmosphère selon leurs propriétés de dépôts (taille particulaire, masse et état), (source : Grünhage et al., 1993<sup>38</sup>)

Les termes communs concernant les dépôts atmosphériques :

Termes	Définitions
<b>Dépôts directs</b>	Les dépôts des polluants de l'air directs sur un plan d'eau (par exemple un estuaire ou un grand lac).
<b>Dépôts indirects</b>	Les dépôts des polluants de l'air sur le reste du bassin versant : dans ce cas, une fois que les polluants sont déposés, une certaine proportion est transportée par le ruissellement, les rivières, les ruisseaux et les nappes phréatiques jusqu'au plan d'eau du bassin. Le reste est bioaccumulé dans des organismes vivants d'origine végétale ou fongique.
<b>Dépôts humides</b>	Les polluants qui sont déposés dans la pluie, la neige, les nuages ou le brouillard
<b>Dépôts secs</b>	Les polluants qui retombent pendant les périodes qui n'ont pas de précipitation. Les particules des retombées sèches peuvent être imaginées comme la collection des poussières sur une table.

Tableau 7 : Les définitions des termes communs concernant les dépôt atmosphériques (Source : U.S. Environmental Protection Agency, 2001<sup>55</sup>)

Les retombées atmosphériques sont importantes pour éliminer les PCB de l'atmosphère (mécanisme plus détaillé dans la partie 5.4.5).

Les PCB dans l'atmosphère sont en majorité sous forme gazeuse : seulement 7 à 32 % des congénères sont fixés sur les aérosols particulaires, cette fraction augmentant avec le nombre de chlore dans les molécules de PCB. Dans une étude de Blanchard et al. (2004)<sup>23</sup>, relative à une campagne de mesure des PCB dans l'atmosphère de Paris, les congénères moins chlorés sont susceptibles de rester dans la phase gazeuse alors que les congénères plus chlorés restent plutôt dans la phase particulaire.

Concernant les retombées atmosphériques, l'étude de Günindi & Tasdemir (2010)<sup>40</sup>, a montré que les congénères ayant 2, 3, et 4 atomes de chlores sont dominants dans les échantillons de retombées. En général, les flux des retombées diminuent, et ce dans les deux phases (phase dissoute/humide et phase particulaire/sèche), lorsque les masses moléculaires des PCB augmentent.

### 5.4.3. Influence de la température sur le comportement des PCB dans l'atmosphère

Comme indiqué précédemment, les PCB sont majoritairement sous forme gazeuse dans notre atmosphère. Le comportement des PCB gazeux est en corrélation avec la température atmosphérique selon l'équation de Clausius-Clapeyron (Hillery et al., 1997<sup>42</sup>):

$$\ln P = -\frac{a}{T} + b \text{ --- équation 1}$$

D'où P est la pression partielle d'un constituant en phase gazeuse en atm., T est la température en Kelvin, a et b sont des constantes.

A partir de l'équation des gaz parfaits, il est possible de déduire que :

$$PV = nRT$$
$$P = \frac{n}{V}RT \rightarrow P = \frac{m}{MV}RT$$

En mettant  $\frac{m}{V} = [PCB]_{gaz}$ , nous allons avoir :

$$P = \frac{[PCB]_{gaz}}{M}RT \text{ --- équation 2}$$

Selon les équations 1 et 2, pendant l'hiver, si la température T diminue alors la pression partielle gazeuse P et la concentration  $[PCB]_{gaz}$  diminuent. Dans ce cas, le coefficient de partage K entre la phase gazeuse et la phase particulaire augmente :

$$K = \frac{[PCB]_{particulaire}}{[PCB]_{gaz}}$$

N.B. :

*n*, nombre de mol ;

*m*, la masse du PCB mesuré ;

*V*, le volume total ;

*M*, la masse moléculaire du PCB mesuré ;

$[PCB]_{gaz}$  = concentration de PCB dans la phase gazeuse ;

$[PCB]_{particulaire}$  = concentration de PCB dans la phase particulaire.

C'est-à-dire que les PCB ont plus tendance à migrer vers la phase particulaire.

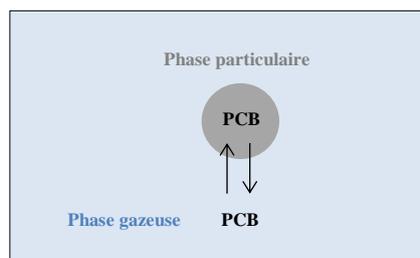


Figure 16 : L'échange des PCB entre la phase particulaire et la phase gazeuse

Au contraire, pendant l'été, une température plus élevée favorise le passage des PCB dans la phase gazeuse plutôt que dans la phase particulaire.

Par ailleurs, l'augmentation de la température en été peut provoquer l'augmentation de la volatilisation des PCB à partir des sources diffuses. En conséquence, les concentrations dans l'air augmentent fortement, notamment pour les PCB les plus volatils.

### 5.4.4. Dispersion globale des PCB dans l'atmosphère

Le transport atmosphérique est le mécanisme le plus important pour la dispersion globale des PCB faisant partie des polluants organiques persistants (POP).

Selon Wania & Mackay (1996)<sup>63</sup>, généralement, la plupart des POP est suffisamment volatils pour s'évaporer et se partager entre l'air, l'eau et le sol à température ambiante. Une température plus élevée favorise l'évaporation depuis la surface de la terre vers les régions tropicales et subtropicales alors que les basses températures dans les hautes latitudes favorisent le dépôt depuis l'atmosphère vers le sol et l'eau.

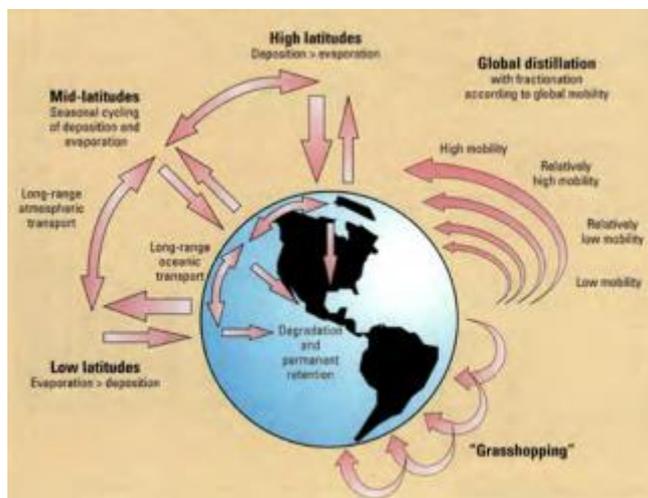


Figure 17: Le processus de migration des POP (Source : Wania & Mackay, 1996)

Les PCB migrent depuis les centres urbains et industriels vers les lacs à proximité ou vers les régions plus éloignées comme l'Arctique et ceci par effet « sauterelle » : des cycles de volatilisation-condensation itératifs entre la surface terrestre et l'atmosphère avec le changement des températures saisonnières. La rapidité de la migration à travers l'atmosphère augmente avec la volatilité des congénères.

La mobilité des PCB est classée de la façon suivante :

Mobilité	Faible	Relativement faible	Relativement élevée	Elevée
Comportement global du transport	Dépôt rapide et rétention près de la source	Dépôt favorisé et accumulation dans les latitudes moyennes	Dépôt favorisé et accumulation dans les latitudes polaires	Dispersion atmosphérique partout dans le monde, pas de dépôt
Logarithme du coefficient de partage octanol-air ( $\log K_{OA}$ ) <sup>13</sup>	← 10	8	6	→
Température de condensation ( $T_c$ )	← +30°C	-10°C	-50°C	→
Degré de chloration des PCB	8 à 9 Cl	4 à 8 Cl	1 à 4 Cl	0 à 1 Cl

Tableau 8: Mobilité des PCB selon certains caractères (Source : Wania and Mackay 1996)

<sup>13</sup> Le coefficient de partage octanol-air,  $K_{OA}$ , est le ratio des concentrations du composé entre l'octanol et l'air à l'équilibre. L'octanol est choisi parce qu'il est représentatif du comportement des lipides.

### 5.4.5. Mécanismes d'élimination des PCB de l'atmosphère

Les PCB sont éliminés de l'atmosphère par plusieurs mécanismes :

- **Dégradation de la phase gazeuse de PCB par la réaction radicalaire d'hydroxyle, HO<sup>•</sup>**

Les radicaux OH sont formés dans l'atmosphère par la réaction entre des atomes d'oxygène qui sont excités et les molécules d'eau. Ils sont aussi produits pendant la dissociation de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> par la lumière UV.

Anderson et Hites (1996)<sup>20</sup>, ont suggéré que les réactions avec les radicaux OH<sup>•</sup> représentent le mécanisme majeur de disparition de PCB depuis l'atmosphère en échelle globale. Ils ont montré que les PCB sont détruits via cette réaction radicalaire pendant le transport troposphérique dans les zones urbaines pendant l'été. L'étude de l'air ambiant de Chicago, USA par Totten et al. (2002)<sup>52</sup>, a mis en évidence que la réaction radicalaire HO<sup>•</sup> avec les PCB davantage chlorés est plus lente par rapport à ceux qui le sont moins. Pour chaque atome de chlore additionné comme substituant d'un congénère, la réduction de ce dernier est diminuée d'environ 10-20%. Les composés octa et nonachlorés semblent être non réactifs aux radicaux hydroxyles.

- **Enlèvement par les retombées**

Les mécanismes par les retombées incluent :

- Le dépôt des retombées sur la surface d'eau ou de sol,
- Le lessivage par les précipitations : les PCB gazeux peuvent se dissolvent dans les gouttes de pluie et dans les gouttelettes de nuages. De la même façon, les PCB particulaires peuvent s'incorporer dans les gouttes de pluie. Offenberg et Baker (2002)<sup>47</sup>, ont étudié ce phénomène aux alentours de la partie sud du Lac Michigan en Amérique du Nord.

Van Ry. Et al. (2002) confirment qu'en moyenne, 97% du lessivage atmosphérique total vient du lessivage particulaire sur les sites variés dans les états Mid-Atlantic.

(Source : U.S. Environmental Protection Agency, 2007<sup>57</sup>)

### 5.5 Mesure des teneurs de PCB dans l'environnement

Les PCB peuvent s'accumuler dans l'organisme des animaux avec le temps et tout au long de la chaîne alimentaire. Les hommes peuvent donc également accumuler des PCB provenant des aliments qu'ils mangent, de l'air qu'ils respirent et de l'eau potable.

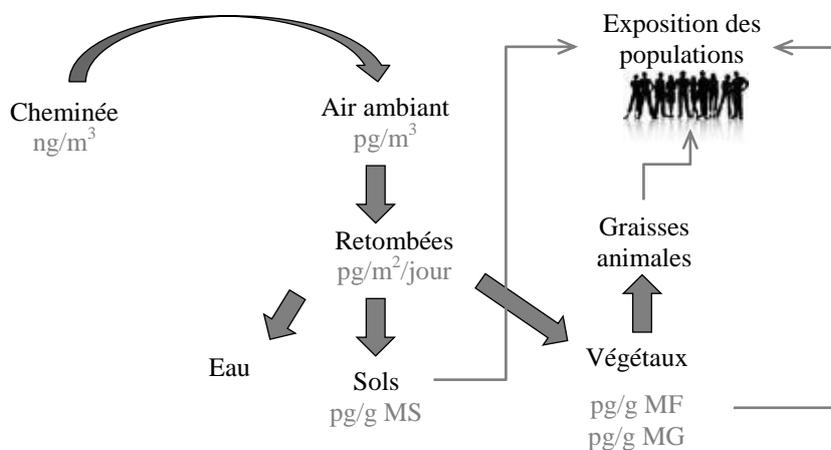


Figure 18 : Mécanismes de transfert dans l'environnement (Source : INERIS, 2011)

L'alimentation constitue la principale source d'exposition de la population générale aux PCB (plus de 90 % de l'exposition totale). Toute la population française est exposée aux PCB par l'alimentation générale. Les aliments les plus riches en PCB sont ceux d'origine animale, tels les poissons, le lait, les produits laitiers, les œufs et la viande.

(Source : Institut de Veille Sanitaire, 2009<sup>11</sup> et Association Santé Environnement France, 2014<sup>9</sup>)

Plusieurs études ont été conduites pour mesurer la concentration des PCB dans le sol, la surface d'échange eau/gaz (surface des lacs ou des rivières), dans les poissons des rivières, le lait maternel, le sang, l'air ambiant intérieur et extérieur, l'émission des industries, les retombées atmosphériques etc.

### 5.5.1. Mesure dans l'atmosphère ou l'air ambiant

Il est possible de mesurer les teneurs des PCB dans l'atmosphère directement et les résultats sont obtenus en concentration de la phase particulaire et de la phase gazeuse. L'unité est de  $\text{pg.m}^{-3}$ .

Plusieurs méthodes d'échantillonnage sont développées pour la mesure dans l'atmosphère :

- **Echantillonneur actif « Grande Volume » (HVS<sup>14</sup>)**

Du fait de la faiblesse des teneurs en PCB dans l'air ambiant, il est impératif de recueillir de gros volumes d'air, c'est-à-dire de l'ordre de 1000 à 2000  $\text{m}^3$  afin de pouvoir les quantifier. Le plus utilisé est un échantillonneur de grand volume (HVS) utilisant des pompes industrielles afin d'assurer des débits de l'ordre de 1,5 à 6  $\text{m}^3/\text{h}$ . Il est équipé d'un filtre en fibre de verre destiné à retenir les particules, ainsi que d'un adsorbant destiné à échantillonner les composés semi-volatils présents dans la phase gazeuse.

(Source : Commission OSPAR, 1997<sup>30</sup>)

Les adsorbants couramment utilisés sont en mousse de polyuréthane (PUF), le polymère amberlite XAD-2 et la résine Tenax GC. Cependant, le PUF est conseillé en raison d'un coût relativement modéré et de sa facilité à utiliser sur le terrain.

- **Echantillonneur actif « Faible Volume » (LVS<sup>15</sup>)**

La méthode consiste à prélever quelques  $\text{m}^3$  d'air sur une durée d'environ 24h, à des débits de l'ordre de 1 à quelques litres par minute. Elle est plutôt adaptée à l'étude des contaminants à proximité des sources d'émission ou au contrôle sanitaire de l'exposition en milieu professionnel (en atmosphère interne). Les limites de détection obtenues avec cette technique sont plus élevées, ce qui ne permet pas son utilisation pour l'étude des contaminations de fond en milieu ouvert, rural ou urbain (Guigon-Moreau et al., 2007<sup>39</sup>).

- **Echantillonneur passif**

Cette méthode repose sur le processus d'adsorption et le partage à l'équilibre du composé entre la phase gazeuse et la phase adsorbée sur un support solide, résine ou PUF. La période d'échantillonnage s'étend sur une période de l'ordre de quelques semaines. Cette méthode ne permet pas de caractériser des pics de pollution et donc des risques d'exposition sur des courtes durées. Par contre, elle a l'avantage de caractériser l'évolution d'une pollution à de grandes échelles spatio-temporelles.

---

<sup>14</sup> High volume sampler

<sup>15</sup> Low volume sampler

Les filtres et les adsorbants des échantillonneurs passifs et actifs sont ensuite extraits au Soxhlet puis analysés par des méthodes d'analyse telles que la chromatographie gazeuse couplée avec le spectromètre de masse (GC/MS) ou le détecteur à capture d'électrons (GC/ECD).

### 5.5.2. Mesure directe dans les retombées atmosphériques

Le suivi direct des polluants dans les retombées atmosphériques peut s'effectuer **par une mesure directe des retombées atmosphériques totales** dans des collecteurs de précipitation, c'est-à-dire les jauges de dépôt. La surface d'exposition des jauges est parfaitement connue, ce qui permet d'évaluer le flux des retombées atmosphériques totales des PCB en  $\text{pg TEQ-OMS 2005.m}^{-2}.\text{jour}^{-1}$ . Parfois les retombées humides sont évaluées en  $\text{ng.L}^{-1}$ .

Les jauges recueillent ce qui se dépose au sol sous forme liquide (précipitations) et solide (sédimentation des particules). La durée de prélèvement est relativement longue (environ 2 mois pour les PCB) pour que les concentrations mesurées soient supérieures au seuil de détection analytique. Le matériel installé pour cette technique doit être normalisé sous la norme NF X 43014. Afin d'éviter les interférences analytiques lors de la mesure, les jauges sont en verre. Enfin pour empêcher la prolifération d'algues sous l'action de la lumière, les jauges opaques sont recommandées.

Le collecteur le plus utilisé en France est le collecteur de type Owen. Il existe d'autres types de jauges : Hibernia, Bergerhoff, etc.



Figure 19 : jauge de type Owen (Source : Air Normand, 2009)

### 5.5.3. Mesure indirecte des retombées : biosurveillance

Le suivi indirect des polluants dans les retombées atmosphériques se fait via l'exposition d'organismes vivants d'origine végétale ou fongique connu sous le nom de **biosurveillance**. Cette méthode permet d'indiquer avec certitude un effet toxique associé à des valeurs numériques et leurs effets de synergie.

- **La biosurveillance** rassemble différents concepts, correspondant à différents types d'utilisation des végétaux, selon les objectifs recherchés :
- **Le biomarqueur** se situe au niveau infra-individuel : altérations moléculaires, biochimiques, cellulaires ou physiologiques non visibles,
- **Le bioindicateur** se place au niveau individuel : altérations physiologiques, tissulaires ou morphologiques visibles,
- **Le biointégrateur** se situe au niveau de la population et/ou communauté : disparition ou apparition d'espèces, variation densitaire,
- **Le bioaccumulateur** sert de matrice pour le dosage de différents polluants suite à des mécanismes de transfert et d'accumulation.

**Dans le cadre de notre étude, la méthode s'articule autour de la mesure des bioaccumulateurs** d'où chaque matrice possède son propre comportement par rapport aux points suivants :

- Piégeage et accumulation des éléments dans les tissus,
- Temps d'accumulation,
- Equilibre avec l'air ambiant,
- Perte par lessivage
- Apport par dépôt humide,
- Dilution des éléments due à la croissance de la plante, ...

Dans l'étude de biosurveillance, deux types d'approche sont possibles :

Type d'approche	Passive	Active
<b>Méthode</b>	Utilisation des végétaux en place, prélèvement in situ.	Mise en place sur un site défini pendant une période donnée de végétaux génétiquement sélectionnés et cultivés dans des conditions standardisées.
<b>Avantages</b>	Niveaux d'accumulations généralement supérieures aux seuils de détection car temps d'exposition plus long, Faible coût du transport et des analyses,	Haute densité des sites d'échantillonnage, nombreux choix d'espèces utilisées selon l'investigateur, Taux de déposition calculé à partir du temps d'exposition, Environnement non-contaminé, Concentration en polluants reliés directement à la pollution atmosphérique.
<b>Inconvénients</b>	Manque éventuel d'échantillons indigènes, Taux de déposition difficile à estimer, Végétaux pouvant subir des changements affectant au final l'accumulation des polluants, Concentrations reflétant l'influence d'autres facteurs (âge des végétaux, teneurs en polluants du substrat/contamination locale)	Concentrations et niveaux d'accumulation indétectables sur une courte période d'échantillonnage, Coûts supplémentaires pour le matériel, le transport et la préparation des transplants,

**Tableau 9 : Types d'approche de la biosurveillance (source : Air Normand, 2009)**

Les points suivants doivent être pris en compte pour la réalisation de la biosurveillance :

- Choisir une espèce qui s'identifie clairement et facile à manipuler,
- Récolter une espèce apportant suffisamment de biomasse pour les dosages analytiques,
- Récolter une espèce abondante dont le prélèvement ne met pas en danger sa population sur le site de prélèvement,
- Prendre une espèce dont on connaît bien la tolérance à la dessiccation ainsi que son écologie et son écophysologie,
- Avoir une espèce dont la distribution est large.

**La campagne de mesure de notre étude est effectuée par approche passive.** Ce type d'approche nous permet de mettre en évidence la pollution des années antérieures à l'étude, ce qui permet d'évaluer l'exposition à la contamination atmosphérique à long terme. Cette méthode est aussi simple et rapide à mettre en place. Les mesures sont faites :

- Dans les lichens,
- Dans les bryophytes

#### **5.5.4. Recherche des valeurs repères**

Il est difficile de trouver des valeurs repères dans la recherche bibliographique. Cependant, une valeur standard de l'air ambiant a été proposée au Canada.

- **Absence de valeur guide de l'OMS**

Aucune valeur guide concernant la qualité de l'air pour les PCB n'est proposée par l'OMS parce que l'exposition par inhalation directe ne constitue qu'une faible proportion de l'exposition totale (c'est-à-dire de l'ordre de 1-2% de l'exposition totale par ingestion via l'apport quotidien de la nourriture). L'OMS n'a pas développé une dose journalière tolérable (DJT) de l'exposition totale aux PCB. En raison de la multiplicité des mécanismes sous-jacents des effets sanitaires de PCB, il est difficile d'avoir une justification scientifique pour définir une telle DJT.

(Source: OMS-World Health Organization, 2000, p. 99<sup>64</sup>)

Les concentrations moyennes de l'atmosphère ambiante sont estimées à **3 ng/m<sup>3</sup>** dans les zones urbaines. Bien que cette concentration dans l'air soit une contribution mineure dans l'exposition humaine directe, elle représente une contribution majeure via la contamination de la chaîne alimentaire.

(Source: OMS-World Health Organization, 2000, p. 97<sup>64</sup>)

- **Valeur standard de l'air ambiant proposée par le ministère de l'environnement (MOE) de l'Ontario, Canada**

MOE de l'Ontario au Canada a développé un critère de la qualité de l'air ambiant pour les polluants normalement utilisés dans les évaluations environnementales de l'air. Il a été proposé en 2009 une valeur standard de 0,1 TEQ-OMS 2005 pg.m<sup>-3</sup> en se basant sur les effets de développement associés avec l'exposition aux dioxines, furanes et les PCB-DL.

(Source : Site du Registre Environnementale, Ontario<sup>15</sup>)

#### **5.5.5. Corrélation entre les différentes méthodes de mesure**

- **Comparaison entre la méthode des jauges et des bioindicateurs**

Nous avons trouvé une seule étude dans la littérature qui traite de cette comparaison entre jauges et bioindicateurs : l'étude de De Souza Pereira et al., 2007<sup>35</sup>. Les mesures sont réalisées dans les jauges et dans le bioindicateur de type *Tillandsia Usneoides* (L.) à Rio de Janeiro (voir l'Appendice 9.2.2 pour plus de détails concernant cette plante).

4 sites d'échantillonnage sont installés à Volta Redonda (V.R.), une zone de l'industrie métallurgie. Ce dernier est une source importante de l'émission des PCB surtout dans la fabrication des aciers (plus d'explication dans la partie 5.3.1). En plus, 2 sites sont installés au Parc National d'Itatiaia, une réserve naturelle située environ 65 km de l'ouest de V.R. afin d'avoir une mesure de bruit de fond de la région.

Concernant la méthode de bioindicateur, les dispositifs pièges contenant *T. Usneoides (L.)* sont pendus à côté des jauges d'où les plantes sont obtenues du jardin botanique de Rio de Janeiro. Seules les parties jeunes des plantes (l'âge de 4 mois) sont utilisées pour cette étude.

Les résultats sont indiqués dans le tableau suivant :

Méthode de mesure	Jauges (méthode Bergerhoff)						Bioindicateur ( <i>Tillandsia Usneoides (L.)</i> )					
	V.R. 1	V.R. 2	V.R. 4	V.R. 3	PNI 5	PNI 6	V.R. 1	V.R. 2	V.R. 4	V.R. 3	PNI 5	PNI 6
Sites												
Types de sites	Industriel				Bruit de fond		Industriel				Bruit de fond	
Critères	Sous vent dominant (nord-est de l'industrie métallurgie)			Au sud du site métallurgie		Réserve naturelle, 65 km de V.R.	Sous vent dominant (nord-est de l'industrie métallurgie)			Au sud du site métallurgie		Réserve naturelle, 65 km de V.R.
Période de mesure	Hiver : 78 jours (juin-août 2003) ; Été : 114 jours en (déc. 2003- fév. 2004)				Hiver : 95 jours (juin-août 2003) ; Été : identique à celle de V.R.		Période identique avec les jauges					
<b>Concentration moyenne* de ΣPCB-DL</b>												
Moyenne	2.15	3.55	1.44	0.52	0.505	0.195	2.53	2.81	3.045	1.765	1.015	1.75
Été	2.19	4.34	1.44	0.90	0.2	0.11	2.53	2.92	1.99	1.88	1.05	1.68
Hiver	2.11	2.76	-	0.14	<b>0.81</b>	0.28	-	2.70	4.10	1.65	0.98	1.82
Unité	TEQ-OMS 2005 pg/m <sup>2</sup> /jour						TEQ-OMS 2005 pg/g					
<b>Concentration de ΣPCBi</b>												
Moyenne	38400	17400	8600	6050	8985	3445	4115	8650	11570	7075	3870	5075
Été	14200	16300	8600	8700	1670	1290	5390	4900	4040	3550	2580	2890
Hiver	62600	18500	-	3400	<b>16300</b>	5600	2840	12400	19100	10600	5160	7260
Unité	pg/m <sup>2</sup> /jour						pg/g					

Tableau 10 : Résultats des mesures de PCB dans une zone industrialisée à Rio de Janeiro (Source : De Souza Pereira et al., 2007)

V.R. : Volta Redonda

PNI : Parc National d'Itatiaia

\*les concentrations moyennes entre deux saisons

A part le site PNI 5 pour la méthode de jauge (dont la teneur mesurée en hiver est plus élevée que les autres valeurs en hiver trouvés sur le même type de site dans l'étude), les résultats semblent cohérents. C'est-à-dire que les teneurs pour les sites industriels sont plus élevées par rapport à celles des sites de bruit de fond.

- **Etude des profils de congénères**

Dans la même étude (De Souza Pereira et al., 2007<sup>35</sup>), les résultats montrent un profil des congénères avec un pourcentage très élevé de PCB 118 dans la somme des 12 PCB-DL dans les jauges et le bioindicateur. Quant aux PCBi, le pourcentage le plus élevé est représenté par le PCB 52 dans les jauges ; par le PCB 153 et le PCB 52 dans le bioindicateur.

### 5.5.6. Recherche des valeurs typiques pour chaque type de sites de mesure

En effectuant la recherche bibliographique sur les teneurs mesurées dans les autres régions françaises ou dans les autres pays, il est possible de regrouper certains résultats selon leur type de sites de mesure (sites de bruit de fond ou ruraux, sites urbains ou sites industriels). Cependant, il a été difficile de trouver exactement les études qui sont cohérentes avec notre campagne pour les bioindicateurs. Le problème est soit que l'étude utilise les lichens et les bryophytes mais elle ne mesure pas les mêmes PCB que notre campagne ou soit que le type de bioindicateur utilisé n'est pas le même que le nôtre.

Les valeurs trouvées et les détails importants des études sont regroupés dans :

- Tableau 12 : Les teneurs des PCB<sub>i</sub> et PCB-DL mesurées sur les sites de bruit de fond/ruraux
- Tableau 13 : Les teneurs des PCB<sub>i</sub> et PCB-DL mesurées sur les sites urbains. Les résultats de la recherche bibliographique ne sont pas disponibles pour la méthode des bioindicateurs.
- Tableau 14 : Les teneurs des PCB<sub>i</sub> et PCB-DL mesurées sur les sites industriels

Le Tableau 11 suivant récapitule les fourchettes des valeurs retrouvées pour les 12 PCB-DL et les 6 PCB<sub>i</sub>. Il s'agit des mêmes congénères mesurés dans la campagne de mesure :

Type de PCB	ΣPCB-DL			ΣPCB <sub>i</sub>		
	Atmosphère	Jauges	Bioindicateurs	Atmosphère	Jauges	Bioindicateurs
Méthode de mesure						
Unité	TEQ-OMS 2005 pg/m <sup>3</sup>	TEQ-OMS 2005 pg/m <sup>2</sup> /jour	TEQ-OMS 2005 pg/g	pg/m <sup>3</sup>	pg/m <sup>2</sup> /jour	pg/g
Bruit de fond/ruraux	10 <sup>-3</sup>	0,50 – 1,10	0,13 – 1,75	8,48-28,37	3445 – 8985	905 – 5075
Urbains	0,02 – 0,34	0,63 – 1,95	-	156,3 – 590	4000 – 12600	-
Industriels	0,164	0,52 – 3,55	1,77 – 3,05	585,15	6050 – 38400	4115 – 11570

Tableau 11 : Tableau récapitulatif des fourchettes de teneur pour chaque type des sites

Méthode de mesure	Atmosphère	Jauges			Bioindicateur		
	Echantillonnage actif	Owen	Bergerhoff		( <i>Tillandsia Usneoides</i> (L.))	Epicéa de Norvège ( <i>Picea abies</i> (L.) Karst.)	
Pays	République Tchèque	France	Brésil		Brésil		Suisse, Allemagne, Autriche, Italie, Slovénie
Détails de localisation	-	Rhône Alpes	Rio de Janeiro Parc National d'Itatiaia (PNI)		Rio de Janeiro Parc National d'Itatiaia (PNI)		1400m d'altitude au-dessus du niveau de la mer
Sites	Kosetice	Bacon	PNI 5	PNI 6	PNI 5	PNI 6	Alpes centrales
Critères	Site d'observatoire d'EMEP (European Monitoring & Evaluation Program)	Site rural mais sous vents dominants	Réserve naturelle, 65 km de V.R.		Réserve naturelle, 65 km de V.R.		Au moins 50 km des grands polluants
Période de mesure	Année 2013	Déc. 2011-jan. 2012 (1 mois)	Hiver : 95 jours (juin-août 2003) ; Eté : 145 jours (déc. 2003-fev. 2004)		Période identique avec les jauges		Sept.-oct. 2004 ; oct. 2005 ; mai 2006
Concentration moyenne* de ΣPCB-DL	0.78.10 <sup>-3</sup>	1.1	0.505	0.195	1.015	1.75	0.125
Unité	TEQ-OMS 2005 pg/m <sup>3</sup>	TEQ-OMS 2005 pg/m <sup>2</sup> /jour				TEQ-OMS 2005 pg/g	
Concentration moyenne* de Σpcbi	8.48	7200	8985	3445	3870	5075	905
Unité	pg/m <sup>3</sup>	pg/m <sup>2</sup> /jour				pg/g	
Source	<a href="#">Site web EMEP pour la République Tchèque</a>	COPARLY, 2012 <sup>31</sup>	De Souza Pereira et al., 2007 <sup>35</sup>		De Souza Pereira et al., 2007		Offenthaler et al., 2009 <sup>48</sup>

Tableau 12 : Les teneurs des PCBi et PCB-DL mesurées sur les sites de bruit de fond/ruraux

Méthode de mesure	Atmosphère				Jauges		Bioindicateur	
	Echantillonnage actif				Owen			
Pays	Colombie		Turquie	France	France		-	
Détails de localisation	Andean		Nord de Izmir, environ 50km du centre-ville	Rhône-Alpes	Rhône-Alpes (Sites de mesure installés suite à un incendie d'un stock de biomasse sur la plateforme Ecopole à Décines-Charpieu)		-	
Sites	Liceo	Palogrande	Aliaga	Guizzardi	Guizzardi	Veyssièrè	-	-
Critères	Commerciale ; haute circulation : influence possible des émissions de l'incinérateur des déchets solides	Résidentiel ; mi basse circulation	La source d'origine possible des PCB est la combustion du fioul dans l'usine pétrochimique	Site de mesure installé suite à un incendie d'un stock de biomasse sur la plateforme Ecopole à Décines-Charpieu ; site habité ; sous vents dominants	Site habité ; sous vents dominants	Moins exposé au vu des vents dominants	-	
Période de mesure	juin-oct. 2012, oct. 2012-Fev. 2013, fev.-juin 2013		Hiver : mars-avr. 2005 Eté : juin 2005	déc. 2011 (14 jours)	Déc. 2011-jan. 2012 (1 mois)		-	
Concentration moyenne* de ΣPCB-DL	0.344	0.256	-	0.02	1.95	0.63	-	-
Unité	TEQ-OMS 2005 pg/m <sup>3</sup>				TEQ-OMS 2005 pg/m <sup>2</sup> /jour		-	
Concentration moyenne* de ΣPCBi	-	-	156.3	590	12600	4000	-	-
Unité	pg/m <sup>3</sup>				pg/m <sup>2</sup> /jour		-	
Source	Cortés et al., 2014 <sup>32</sup>		Cetin et al., 2007 <sup>28</sup>	COPARLY, 2012 <sup>31</sup>	COPARLY, 2012 <sup>31</sup>		-	

Tableau 13 : Les teneurs des PCBi et PCB-DL mesurées sur les sites urbains

Méthode de mesure	Atmosphère		Jauges				Bioindicateur				
	Echantillonnage actif		Owen	Bergerhoff			<i>(Tillandsia Usneoides (L.))</i>				
Pays	Colombie	Turquie	France	Brésil				Brésil			
Détails de localisation	Andean	Environ 5 km du sud d'Aliaga	Rhône-Alpes	Rio de Janeiro Volta Redonda (V.R.)			Rio de Janeiro Volta Redonda (V.R.)				
Sites	Nubia	Horozgedigi	Tarvel	V.R. 1	V.R. 2	V.R. 4	V.R. 3	V.R. 1	V.R. 2	V.R. 4	V.R. 3
Critères	Zone commerciale ; la source des PCB est l'industrie	La source d'origine possible des PCB est l'usine de la fabrication des aciers utilisant le four à arc électrique	Source de l'incendie Sites de mesure installés suite à un incendie d'un stock de biomasse sur la plateforme Ecopole à Décines-Charpieu	Sous vent dominant (nord-est de l'industrie métallurgie)		Au sud du site métallurgie		Identiques à ceux des jauges			
Période de mesure	juin-oct. 2012, oct. 2012-fev. 2013, fev.-juin 2013	Hiver : mars-avr. 2005 Été : juin 2005	Déc. 2011-jan. 2012 (1 mois)	78 jours en hiver (juin-août 2003) ; 114 jours en été (décembre 2003- février 2004)				Identiques à ceux des jauges			
Concentration moyenne* de ΣPCB-DL	0.164	-	1.01	2.15	3.55	1.44	0.52	2.53	2.81	3.045	1.765
Unité	TEQ-OMS 2005 pg/m <sup>3</sup>		TEQ-OMS 2005 pg/m <sup>2</sup> /jour								
Concentration moyenne* de ΣPCBi	-	585,15	7300	38400	17400	8600	6050	4115	8650	11570	7075
Unité	pg/m <sup>3</sup>		pg/m <sup>2</sup> /jour				pg/g				
Source	Cortés et al., 2014	Cetin et al., 2007 <sup>28</sup>	COPARLY, 2012 <sup>31</sup>	De Souza Pereira et al., 2007				De Souza Pereira et al., 2007			

Tableau 14 : Les teneurs des PCBi et PCB-DL mesurées sur les sites industriels

## 5.6 Synthèse de l'étude bibliographique

La bioaccumulation des PCB dans la chaîne alimentaire fait que l'alimentation constitue la principale source d'exposition de la population générale aux PCB (plus de 90% de l'exposition totale). Les poissons qui se retrouvent au bout de la chaîne alimentaire, les plus gros prédateurs comme les saumons, sont ceux qui présentent le plus de risques d'être riches en PCB (contamination par l'eau). De même, les retombées atmosphériques de PCB se retrouvent sur les plantes, puis dans les animaux qui les consomment (comme les vaches, chèvres, volailles), et dans les œufs et le lait, et au final l'être humain.

Ainsi, la mesure des PCB dans les retombées (les précipitations et les dépôts de poussières) est adaptée par rapport à une voie d'exposition par la chaîne alimentaire. C'est donc une méthode plus intéressante à ce titre que la mesure dans l'atmosphère. Il est à noter qu'il existe des valeurs de référence dans l'alimentation et que l'OMS a estimé une concentration moyenne des PCB dans l'air ambiant. Pourtant, aucune valeur réglementaire ni sanitaire n'est disponible dans les retombées.

Les 12 PCB-DL, ayant le même mécanisme de toxicité que les dioxines et furanes, possèdent chacun un facteur de toxicité (TEF) fixé par l'OMS. Il est donc possible d'exprimer les teneurs mesurées en somme d'équivalence toxique (TEQ). Les valeurs en TEQ sont intéressantes pour faire la comparaison avec d'autres études des PCB et des dioxines/furanes. Par ailleurs, les 7 PCB<sub>i</sub>, étant particulièrement persistants et présents dans l'environnement, représentent environ 50 % de l'ensemble des congénères de PCB présents dans les aliments d'origine animale et dans les tissus humains. Ainsi, sa mesure dans l'environnement est aussi intéressante que celle des PCB-DL même si les PCB<sub>i</sub> n'ont pas de TEF.

Rappelons les 3 plus grands secteurs contribuant aux rejets de PCB dans l'atmosphère :

- L'industrie manufacturière (les émissions des installations de traitement des déchets industriels dangereux et des déchets non dangereux, ainsi que les émissions des aciéries électriques),
- Le secteur résidentiel/tertiaire,
- Le secteur de la transformation d'énergie (les émissions de la production d'électricité).

On s'attend à mesurer une teneur en PCB plus importante dans l'atmosphère en été qu'en hiver car la volatilisation des PCB à partir des sources diffuses (notamment sol pollué, sédiments fluviaux et portuaires) est favorisée lorsque la température est élevée. De plus, il est à noter que la présence des PCB dans les retombées est très influencée par le flux des précipitations. Plus il y a de précipitations, plus les flux des PCB augmentent dans les retombées.

Les PCB moins chlorés (plus volatiles) sont susceptibles d'être mesurés dans les endroits éloignés de la source polluante (bruit de fond/ruraux) à cause du transfert atmosphérique à longue distance alors que les PCB plus chlorés (moins volatiles) sont éventuellement présents près de la source.

## 6. Résultats

---

### 6.1 Résultats bruts

- Résultats dans les jauges

Les résultats d'analyses fournis par le laboratoire sont exprimés en TEQ-OMS 2005 pg/échantillon. Ils sont disponibles sur simple demande auprès d'Air Normand : [contact@airnormand.fr](mailto:contact@airnormand.fr). Ces résultats sont ensuite exprimés par Air Normand en "unités des dépôts de PCB" en divisant par la surface d'échantillonnage et par la durée d'exposition pour obtenir des TEQ-OMS 2005 pg/m<sup>2</sup>/jour (PCB).

- Résultats dans les lichens

Les résultats de PCB proviennent du rapport A15-820 de 2014, exprimés en TEQ-OMS 2005 pg/g de MS<sup>15</sup>. Toute demande de ce rapport devra être adressée directement à la société Aair Lichens (17 rue des Chevrettes, 44470 CARQUEFOU).

- Résultats dans les bryophytes

Les résultats de PCB proviennent du rapport de 14-RA-02-NC-05 et 15-RA-03-NC-06 de 2014, exprimés en TEQ-OMS 2005 pg/g de MS. Toute demande de ce rapport devra être adressée directement à la société Biomonitor (25 rue Anatole France, 54530 Pagny-sur-Moselle).

### 6.2 Résultats transformés

#### 6.2.1. Résultats détaillés des mesures

Les résultats détaillés des PCB-DL et des PCB<sub>i</sub> sont présentés dans :

- Annexe 2 : Résultats des PCB-DL dans les jauges
- Annexe 3 : Résultats des PCB<sub>i</sub> dans les jauges
- Annexe 4 : Résultats des lichens
- Annexe 5 : Résultats des bryophytes

Dans les parties qui suivent, les teneurs en PCB pour la méthode des jauges sont exprimées en moyennes des deux saisons de l'année (été/hiver). Les résultats détaillés des jauges (teneurs selon la saison) sont disponibles dans les Annexes 2 et 3.

#### 6.2.2. Volume prélevé dans les jauges de dépôt

Les volumes prélevés sont présentés en Annexe 1 : Quantité d'eau recueillie dans les jauges. Les volumes recueillis sont très différents d'une période à l'autre en fonction de la pluviométrie. Ils varient de 5153 ml à 10291 ml.

#### 6.2.3. Conditions météorologiques

Les stations météorologiques prises en compte dans le cadre de ce travail sont situées dans l'enceinte de l'usine Renault de Sandouville (RNO) pour l'agglomération havraise et sur le toit du centre Max Dormoy à Grand-Quevilly (QV) pour l'agglomération rouennaise.

---

<sup>15</sup> MS = matière sèche

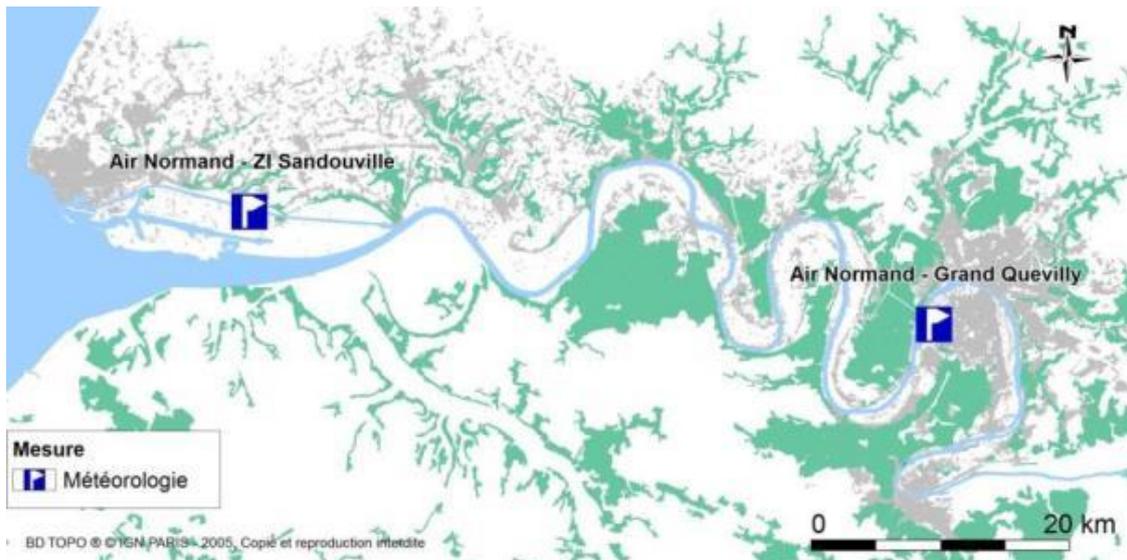


Figure 20 : Localisation des stations météorologiques de mesure de vent prises en compte

### Roses des vents

Date début	Date fin	Girouette Air Normand	
		GQV – Grand Quevilly (Rouen)	RNO – ZI Sandouville (Le Havre)
14/01/2014	12/03/2014	<p>Rose des vents [14/01/2014;12/03/2014]</p>	<p>Rose des vents [14/01/2014;12/03/2014]</p>
04/07/2014	02/09/2014	<p>Rose des vents [04/07/2014;02/09/2014]</p>	<p>Rose des vents [04/07/2014;02/09/2014]</p>

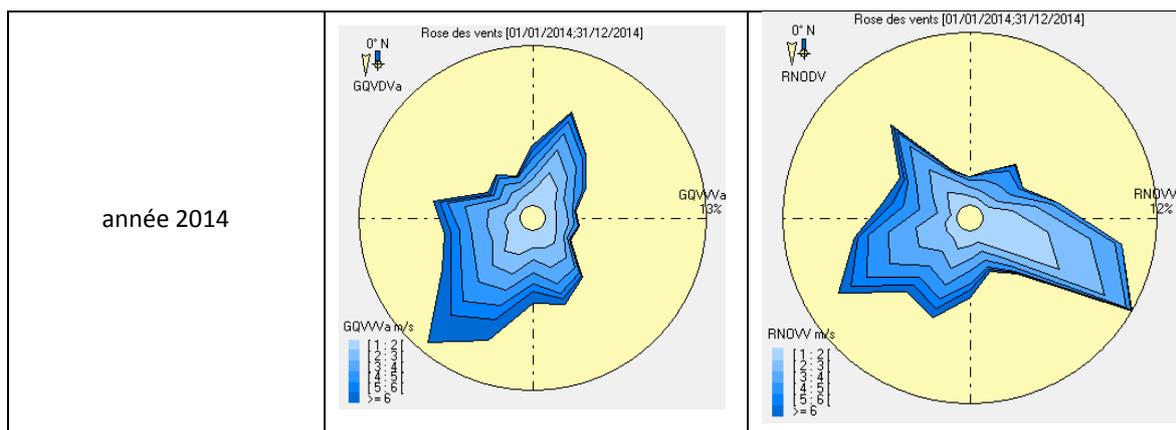


Tableau 15 : Figure des Roses des vents sur la période d'exposition des jauges (en été et en hiver)

Des roses de vent sont tracées afin de visualiser la fréquence des directions d'où vient le vent. Elles sont calculées ici en pourcentage du temps. Les roses des vents montrent que :

- les vents dominants venaient de l'est à sud-ouest lors de la campagne d'hiver 2014,
- les vents dominants venaient de nord-ouest à sud-ouest lors de la campagne d'été.

En considérant que ces roses des vents sont représentatives du régime des vents de la zone d'étude et les usines considérées comme étant les émetteurs principaux, les sites potentiellement les plus exposés aux retombées atmosphériques de PCB de ces deux usines sont définis dans le tableau suivant :

Saison	Hiver	Eté
Rouen	Sites 2 et 6	Sites 2 et 4
Le Havre	Sites 8, 9 (par vent de sud-est), 10, et 11	Sites 7, 8, et 11

Tableau 16 : Sites les plus exposés selon les roses de vent

Cependant, en prenant en compte la distance les séparant de l'usine et leur localisation en dehors de la zone industrielle, le site 6 (Préfecture) pour Rouen et le site 11 (Château d'eau de Sandouville) pour Le Havre peuvent être considérés comme des sites témoins peu influencés par les émissions potentielles de TRIADIS et de SEDIBEX.

### Pluviométrie

Date début	Pluviométrie Météo France Boos (en mm)
du 14/01/2014 au 12/03/2014	178,5
du 12/03/2014 au 06/05/2014	124
du 06/05/2014 au 04/07/2014	186,5
du 04/07/2014 au 02/09/2014	193
du 02/09/2014 au 05/11/2014	109,2
du 05/11/2014 au 13/01/2015	152,6

Tableau 17 : Pluviométrie durant les prélèvements

La pluviométrie est plus importante sur les périodes d'hiver et d'été (en gras) où ont eu lieu les deux grosses campagnes sur tous les sites. Ceci est cohérent avec les résultats de pluviométrie des mois de janvier, mai et août, supérieurs à la normale (sur 30 ans).

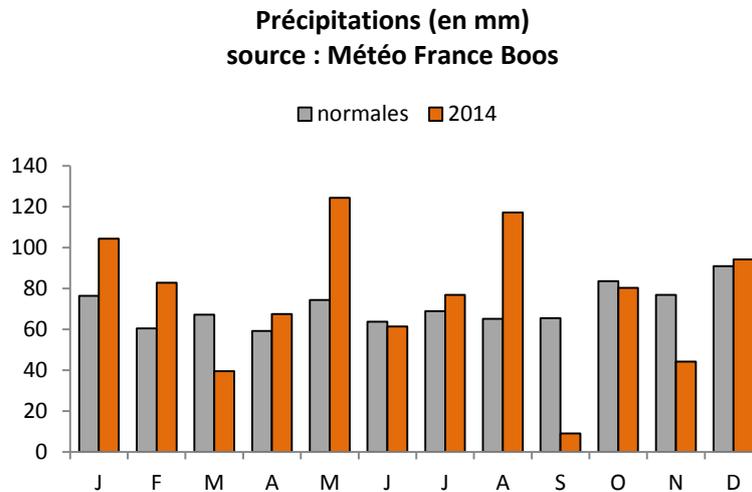


Figure 21 : Evolution mensuelle des précipitations en 2014 à la station Météo France Boos

#### 6.2.4. Confrontation aux valeurs bibliographiques

- Cas des jauges

Les résultats précédents sont confrontés aux valeurs minimales et maximales trouvées dans la recherche bibliographique (voir la partie 5.5.6). Le tableau suivant fait le bilan des situations de dépassement de ces valeurs minimales et maximales par type de site de mesure, pour la méthode des jauges :

Type des PCB	Type des sites de mesure	Dépassement de la valeur minimale de la bibliographie		Dépassement de la valeur maximale de la bibliographie	
	Zones	Rouen	Le Havre	Rouen	Le Havre
PCB-DL	Z.I.	Site 1 et 2	Site 8	Site 1	Aucun
	Urbain	Aucun	Pas de site de type urbain au Havre	Aucun	Pas de site de type urbain au Havre
	Bruit de fond	Aucun			
PCBi	Z.I.	Site 1 et 2	Site 8	Aucun	
	Urbain	Sites 3 et 5	Pas de site de type urbain au Havre	Aucun	Pas de site de type urbain au Havre
	Bruit de fond	Site 6	Aucun	Aucun	

Tableau 18: Sites en situation de dépassement des valeurs minima et maxima bibliographiques pour la méthode des jauges

**Le fait marquant est que le site 1 (SCI Jonques de la Seine) de Rouen (teneur moyenne de 11,55 TEQ-OMS 2005 pg/m<sup>2</sup>/jour) dépasse la valeur moyenne maximale relevée dans la bibliographie (De Souza Pereira et al., 2007<sup>35</sup>) pour les PCB-DL dans les jauges (3,55 TEQ-OMS 2005 pg/m<sup>2</sup>/jour). Cette valeur bibliographique concerne les mêmes 12 PCB-DL mesurés dans la campagne mais issue de la méthode de mesure utilisant la jauge Bergerhoff.**

#### **6.2.5. Confrontation aux valeurs de retombées significatives**

Les résultats des lichens sont confrontés aux valeurs de retombées significatives proposées par Air Lichens, d'après un calcul statistique sur sa base de données (valeurs qui s'écartent de plus de 40% du bruit de fond). Dans cette étude, les valeurs de retombées significatives sont :

- 1,3 TEQ-OMS 2005 pg/g pour les PCB-DL et
- 5000 pg/g pour les PCBi

**Dans les deux cas de PCB-DL et de PCBi, tous les sites de Rouen et le site 10 (France Liant Rogerville) du Havre dépassent ces valeurs de retombées significatives.**

Quant aux résultats des bryophytes, aucune valeur de retombées significatives n'est proposée par BioMonitor.

#### **6.2.6. Confrontation des 3 types de résultats (jauges, lichens et bryophytes)**

Les figures dans le tableau suivant présentent en parallèle les retombées des PCB-DL et des PCBi dans les 3 matrices différentes.

Le but est de visualiser, pour les deux types des PCB, les sites les plus impactés par les retombées et d'observer la cohérence des résultats des 3 méthodes.

Cas des PCB-DL

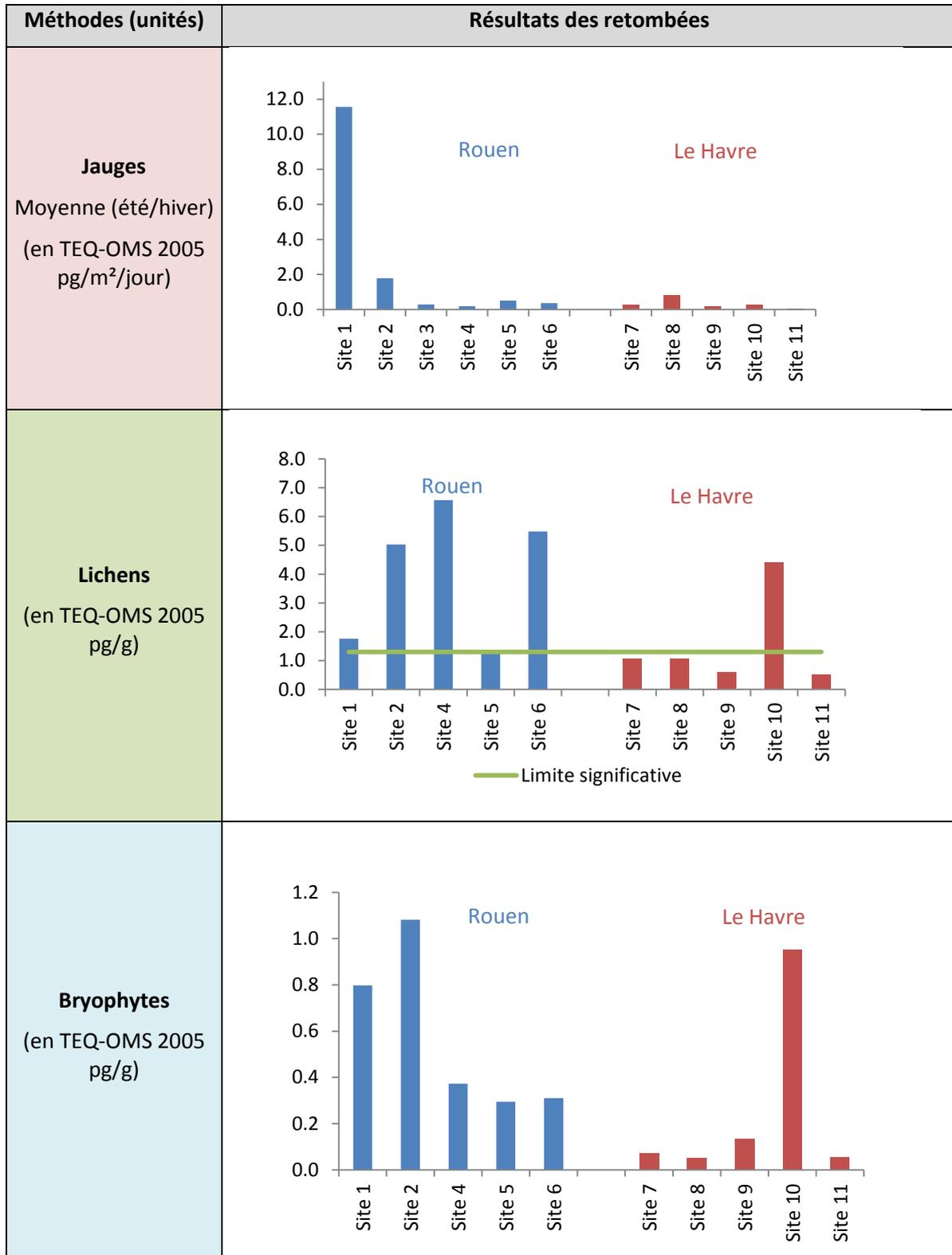


Tableau 19 : Confrontation entre 3 méthodes de prélèvements des PCB-DL

## Commentaires :

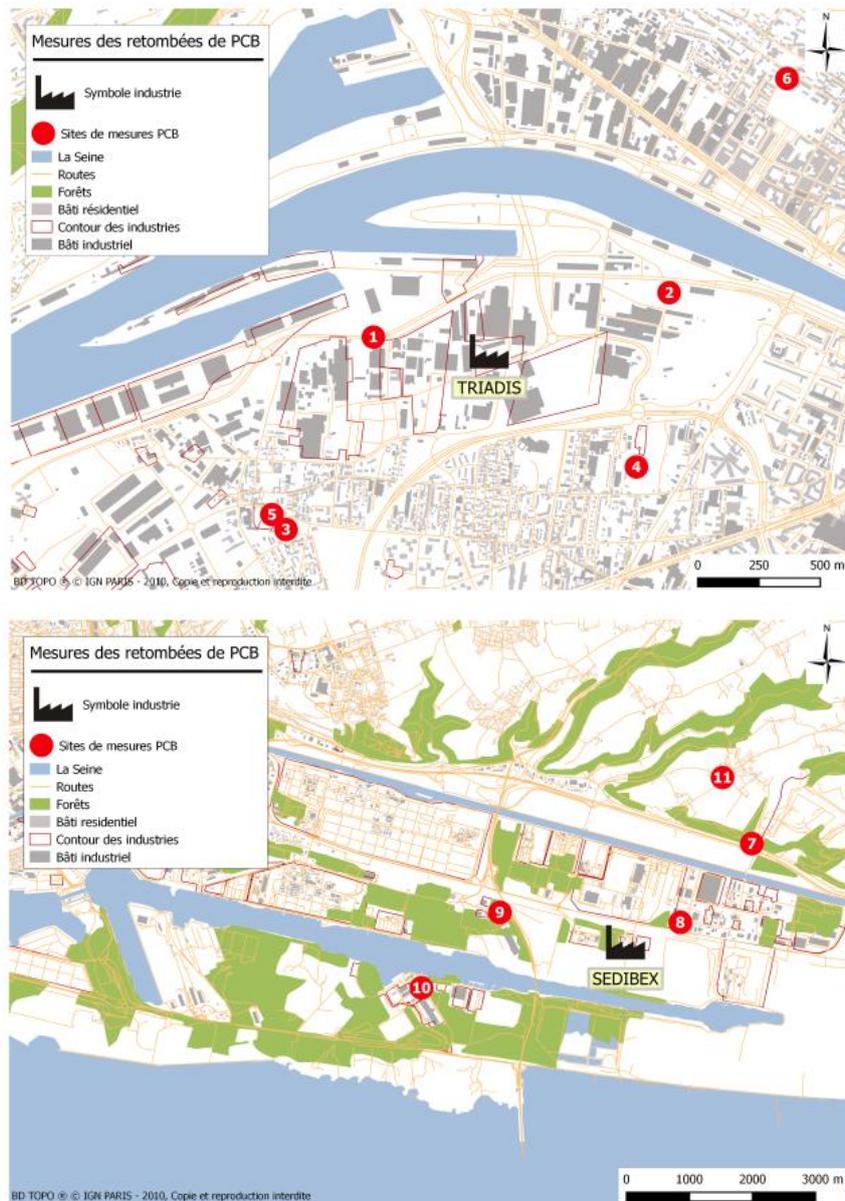


Figure 22 : Rappel de la localisation des sites de mesure (au-dessus : les sites de Rouen, en dessous : les sites du Havre)

- Globalement, les niveaux de retombées sont plus élevés à Rouen qu'au Havre (à l'exception du site 10, France Liants Rogerville).
- Les sites présentant les plus fortes retombées ne concordent pas toujours d'une méthode de mesure à l'autre, à quelques exceptions près :
  - Le site 10 (France Liants Rogerville) du Havre se distingue nettement des autres pour les méthodes de lichens et de bryophytes (mais pas pour les jauges), conformément à l'historique existant sur ce site pour d'autres polluants (dioxines furanes, métaux).

(Source : Air Normand, 2013<sup>19</sup> : Rapport d'étude n° 1202-012-1, Mesures des retombées atmosphériques de métaux et de dioxines/furanes sur le secteur du Havre)

- Sur Rouen, le site 1 (SCI Jonques de la Seine) est plus élevé pour les jauges et les bryophytes et le site 2 (Port Autonome GPMR) pour les 3 méthodes (surtout pour les bryophytes et les lichens).

De façon plus détaillée pour chacune des méthodes de mesure :

- Pour les jauges, nous constatons :
  - Une concentration très élevée pour le site 1 (SCI Jonques de la Seine) de Rouen, suivi par le site 2 (Port Autonome GPMR).
  - Le site 8 (APAVE Sandouville) montre une retombée plus élevée que les autres sites en zone industrielle du Havre.
- Dans les lichens,
  - Toutes les teneurs des sites de Rouen dépassent la valeur de retombée significative ; Les teneurs les plus élevées sont sur :
    - les sites 4 (Stade Mermoz) et 2 (Port Autonome GPMR) de Rouen,
    - le site 6 (Préfecture) de Rouen, le site témoin urbain, qui présente la retombée la plus élevée après le site 4, ce qui pose la question de son origine.
  - Un seul site du Havre dépasse la valeur de retombée significative, à une concentration relativement élevée : c'est le site 10 (France Liants Rogerville).
- Dans le cas des bryophytes,
  - Remarque identique à celle de la méthode des jauges concernant les sites 1 (SCI Jonques de la Seine) et 2 (Port Autonome GPMR),
  - Le site 10 (France Liants Rogerville) se détache nettement des autres sites du Havre,
  - Le site 6 (Préfecture) de Rouen (témoin urbain) a le même ordre de grandeur de retombées que les sites 4 et 5 (sites urbains) de Rouen,
  - Les sites 7 (Restaurant Le Gabion d'Or Sandouville), 8 (APAVE Sandouville) en zone industrielle du Havre ont le même ordre de grandeur que le témoin rural habité (site 11 Château d'eau Sandouville). Le site 9 (SDV Sandouville) montre une retombée légèrement plus élevée que les autres sites en zone industrielle.

### **6.2.7. Confrontation des deux types de PCB (PCB-DL et des PCB<sub>i</sub> en somme)**

Les figures dans le tableau suivant présentent en parallèle les retombées des PCB-DL et des PCB<sub>i</sub> dans les 3 matrices différentes.

Il est observable que l'ordre de grandeur des retombées des PCB<sub>i</sub> est beaucoup plus élevé que pour les PCB-DL car les PCB<sub>i</sub> sont plus abondants dans l'environnement.

Globalement, le profil des PCB-DL est assez similaire à celui des PCB<sub>i</sub> sur les mêmes sites

Le but est de visualiser la cohérence entre la mesure des PCB-DL et des PCBi en regardant le profil de ces deux types sur les mêmes sites.

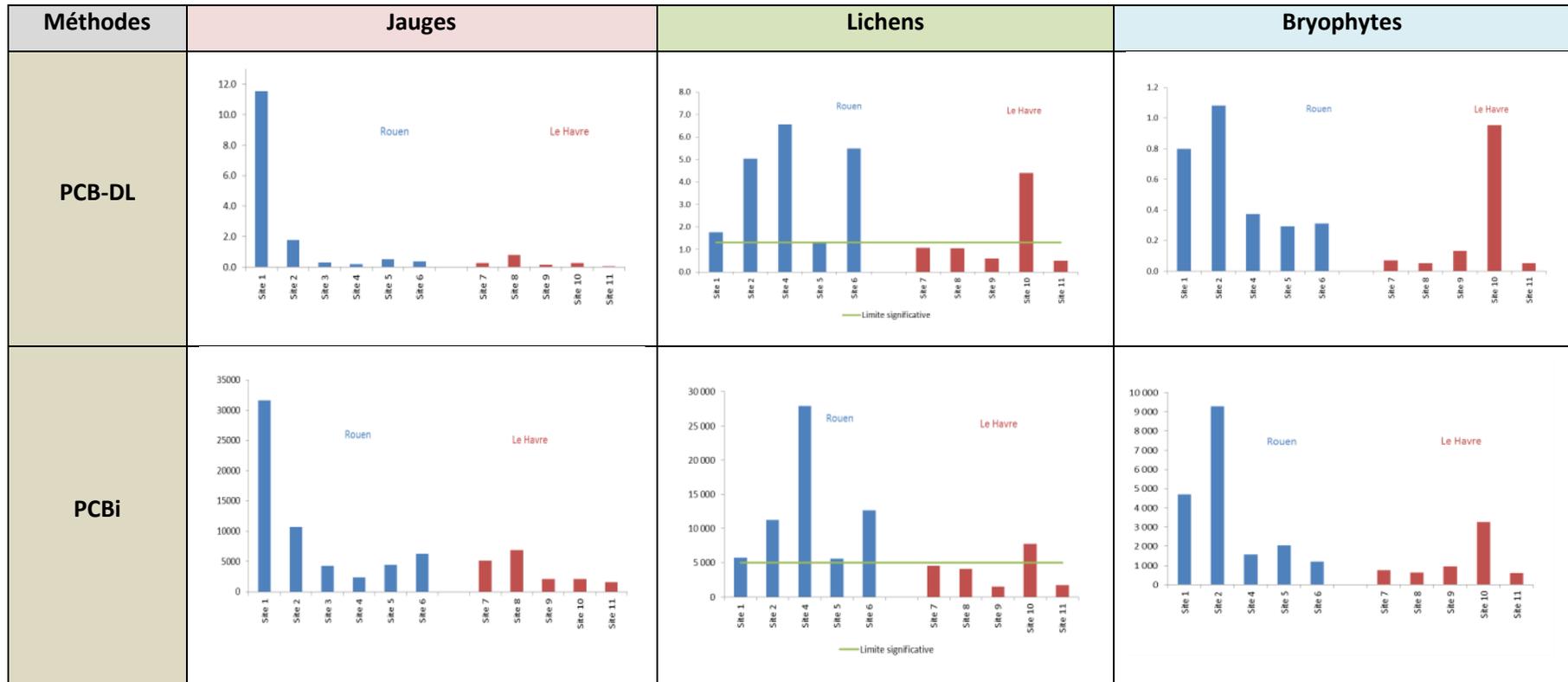


Tableau 20: Comparaison entre les résultats des PCB-DL et des PCBi (en somme)

### 6.2.8. Etude des profils des congénères

Dans cette partie, les profils des PCB-DL sont tout d'abord mis en parallèle pour les trois méthodes (jauges, lichens et bryophytes) dans le **Cas des PCB-DL**

Tableau 21, suivis par des profils des PCB<sub>i</sub> dans le Tableau 23. Tous les résultats sont exprimés en pourcentage des concentrations massiques.

- Cas des PCB-DL

D'une façon globale, nous pouvons constater que pour les PCB-DL, les profils des congénères de Rouen semblent identiques à ceux du Havre pour chaque méthode. Par ailleurs, si nous comparons les trois méthodes pour une zone, nous retrouvons aussi des profils qui se ressemblent. Les observations plus détaillées sont regroupées dans le Tableau 22.

- Cas des PCB<sub>i</sub>

Quant aux PCB<sub>i</sub>, pour chaque méthode, les profils de Rouen et du Havre sont globalement identiques avec néanmoins quelques points de divergence. Par contre la comparaison des trois méthodes pour une même zone met en évidence le fait que les profils ne se ressemblent pas. Les observations plus détaillées concernant cette comparaison sont regroupées dans le Tableau 24.

## Cas des PCB-DL

Jauges (Moyenne été/hiver)	Lichens	Bryophytes
<b>Rouen</b>		
<b>Le Havre</b>		
<b>Constituants majoritaires</b>		
PCB 118, PCB 105	PCB 118, 105	PCB 118, 105
<b>% massique moyen des constituants majoritaires précédents</b>		
Rouen : 71,8 % Le Havre : 73,9 %	Rouen : 75,2 % Le Havre : 71,1 %	Rouen : 72,4 % Le Havre : 77,3 %

Tableau 21: Profils des congénères des PCB-DL pour les trois méthodes différentes

**Commentaires :**

Méthodes	Jauges (Moyenne été/hiver)	Lichens	Bryophytes
<b>Observation générale</b>	Le profil des sites du Havre est proche de celui de Rouen.	Le profil des sites du Havre est proche de celui de Rouen	Le profil des sites du Havre semble proche de celui de Rouen
	Le site 7 du Havre (Restaurant Le Gabion d'Or) montre le pourcentage le plus élevé par rapport aux autres sites pour le PCB 167.		
<b>Observation sur les sites témoins</b>	<b>Rouen</b>		
	Le profil du site 6 Préfecture (témoin urbain) n'est pas significativement différent des autres sites.		
	Exception : pour le PCB 167, le site 6 montre un pourcentage massique plus élevé que les autres sites. C'est l'inverse pour le PCB 105.	-	-
	<b>Le Havre</b>		
	Le profil du site 11 Château d'Eau de Sandouville (témoin rural habité) n'est pas significativement différent des autres sites.		
	Il est même possible de remarquer que pour le PCB 118, le site 11 montre en fait la concentration la plus élevée par rapport aux autres sites.	-	-

Tableau 22 : Observations des profils des congénères pour les PCB-DL

## Cas des PCBi

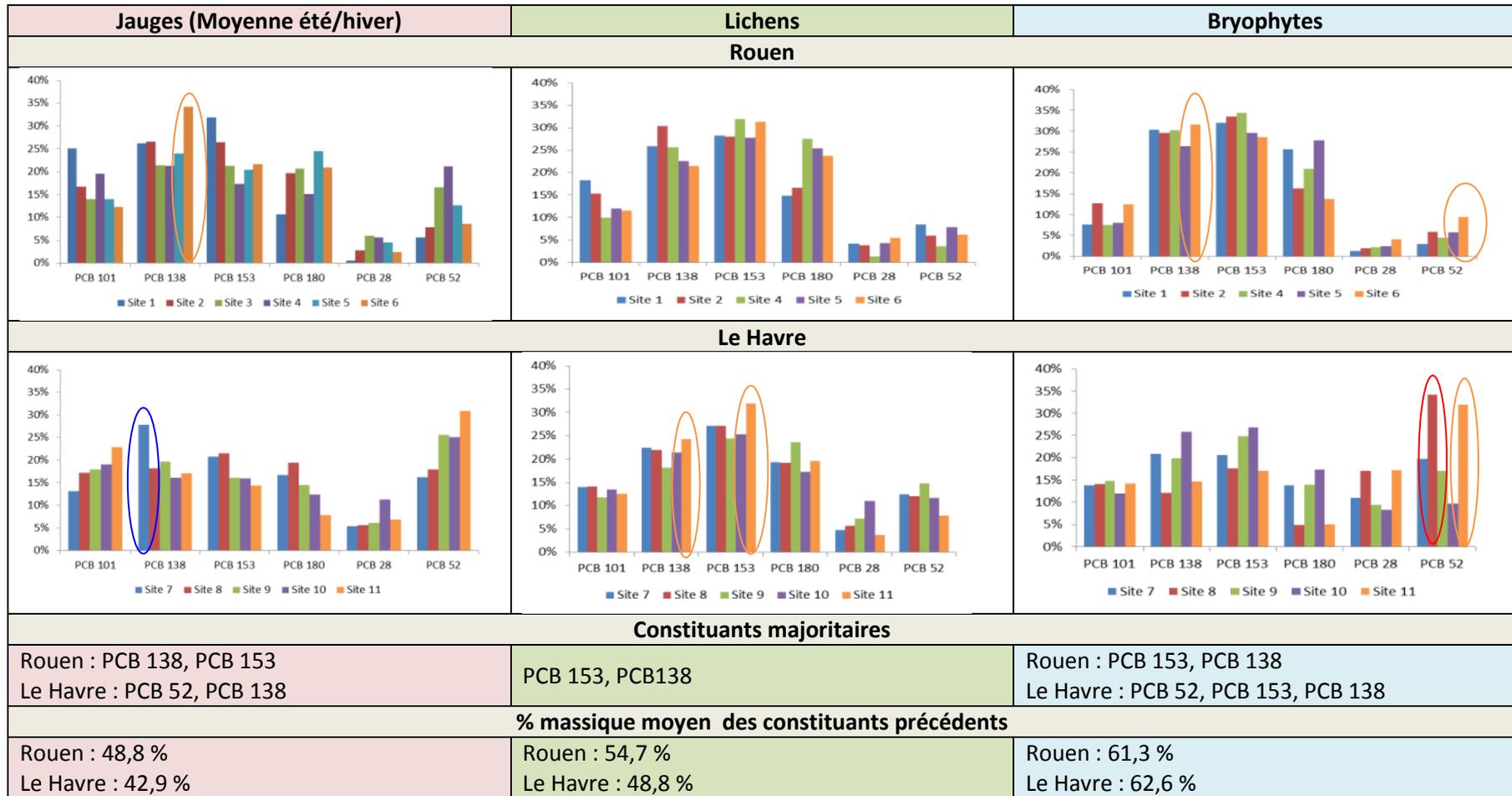


Tableau 23: Profils des congénères des PCBi pour les trois méthodes différentes

**Commentaires :**

Contrairement aux PCB-DL, où seuls quelques congénères sont majoritaires, ici presque tous les congénères des PCB<sub>i</sub> sont présents.

Méthodes	Jauges (Moyenne été/hiver)	Lichens	Bryophytes
<b>Observation générale</b>	Les profils sur les sites du Havre et de Rouen sont plus différents que pour les PCB-DL : En particulier, le site 7 du Havre présente un pourcentage plus élevé de PCB 138.	Le profil des sites du Havre est proche de celui de Rouen	Le profil des sites du Havre semble différent de celui de Rouen : En particulier, les sites 8 et 11 du Havre présentent des pourcentages plus élevés pour le PCB 52
<b>Observation sur les sites témoins</b>	<b>Rouen</b>		
	Le profil du site 6 (Préfecture) n'est pas significativement différent de celui des autres sites		
	Pour le PCB 138, le site 6 montre un pourcentage plus élevé que les autres sites	-	Pour le PCB 52 et le PCB 138, le site 6 montre un pourcentage plus élevé comparé aux autres sites
	<b>Le Havre</b>		
	Le profil du site 11 (Château d'Eau de Sandouville) n'est pas significativement différent de celui observé sur les autres sites		
Il est même possible de remarquer que pour le PCB 101 et le PCB52, le site 11 montre la concentration la plus élevée par rapport aux autres sites.	Pour le PCB 138 et le PCB 153, le site 11 montre une concentration plus élevée comparée aux autres sites	-	

Tableau 24 : Observations des profils des congénères pour les PCB<sub>i</sub>

## 6.2.9. Résultats saisonniers des PCB pour la méthode des jauges

Globalement, les retombées dans les jauges en été montrent une légère augmentation par rapport aux résultats de l'hiver avec une exception sur le site 8 (APAVE Sandouville) du Havre où la teneur en été est moins élevée qu'en hiver.

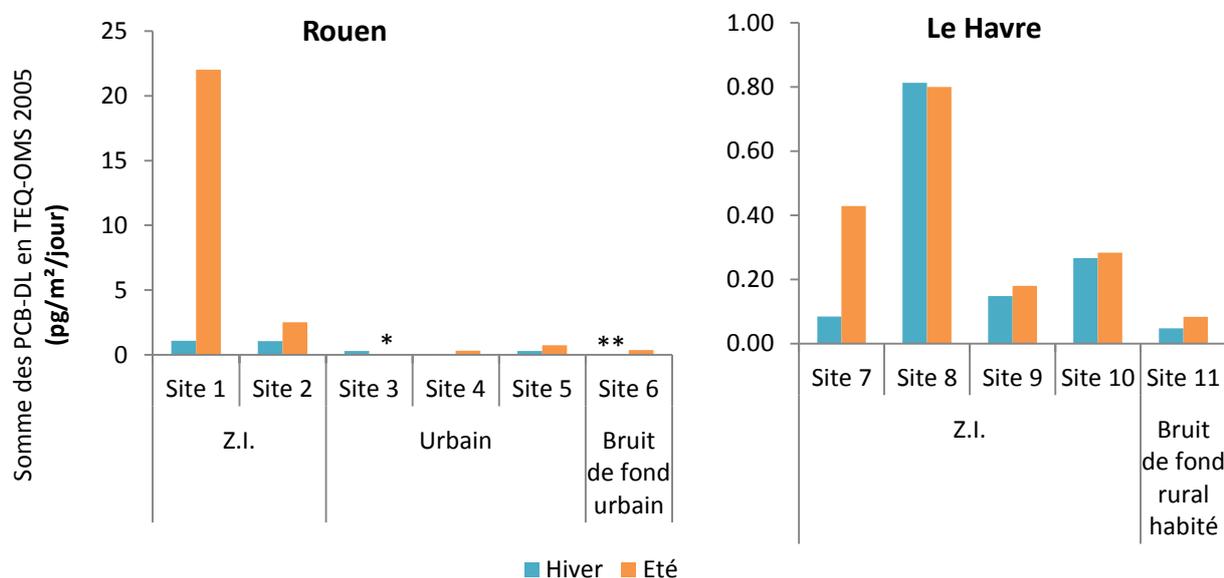


Figure 23 : Résultats saisonniers des PCB-DL pour la méthode des jauges

\*Pas de mesure en été sur le site 3

\*\*Pas de mesure en hiver sur le site 6

Dans deux cas, la différence hiver/été est plus marquée :

- Le site 7 (Restaurant Le Gabion d'Or Sandouville) du Havre qui montre une retombée 4 à 5 fois plus élevée en été qu'en hiver à la fois pour les PCB-DL et les PCB<sub>i</sub>.
- Le site 1 (SCI Jonques de la Seine) qui présente une retombée 20 fois plus élevée pendant la période de mesure d'été par rapport à celle d'hiver.

## 7. Interprétation des résultats et discussion

### 7.1 Importance des valeurs repères

Afin de situer les teneurs mesurées et de décider de leur caractère significatif ou pas, les résultats des retombées des PCB doivent être comparés à des valeurs repères.

Les résultats des lichens de cette étude sont comparés avec les valeurs de retombées significatives proposées par Aair Lichens. Ces seuils n'ont pas de valeur réglementaire ni sanitaire. Ainsi, les retombées dans les lichens sont dites significatives lorsqu'elles s'écartent de plus de 40% du bruit de fond. Cela concerne un grand nombre de sites. Pour les études des jauges et des bryophytes, aucune valeur repère n'est disponible.

Par ailleurs, les résultats de la campagne peuvent être confrontés avec les valeurs typiques retrouvées dans l'étude bibliographique pour chaque type des sites de mesure. Seule la méthode des jauges est

comparée ici aux valeurs bibliographiques. Les teneurs des bioindicateurs ne le sont pas car les végétaux des campagnes de mesure ne sont pas identiques à ceux de l'étude bibliographique. Même dans le cas des jauges, la comparaison n'est qu'indicative, car les méthodes de mesure et d'analyses peuvent varier d'une étude à l'autre et influencer les résultats (traitement des limites de quantification par exemple).

Les faits marquants sur la situation des résultats des jauges (valeurs en moyenne des deux saisons – été et hiver) en Haute Normandie par rapport aux valeurs bibliographiques sont :

- Globalement, tous les sites sont dans la fourchette des valeurs trouvées dans la bibliographie sauf pour le site 1 à Rouen (SCI Jonques de la Seine). Ce site (dont la teneur moyenne mesurée est de 11,55 TEQ-OMS 2005 pg/m<sup>2</sup>/jour) dépasse la valeur moyenne maximale relevée dans la bibliographie, qui est de 3,55 TEQ-OMS 2005 pg/m<sup>2</sup>/jour pour les PCB-DL mesurés sur un site fortement industrialisé, Volta Redonda (V.R.) 2 à Rio de Janeiro. La source polluante de ce site est l'industrie métallurgie (Source : De Souza Pereira et al., 2007).
- Le site 1 présente aussi la valeur maximale des PCBi, 31361 pg/m<sup>2</sup>/jour, qui n'atteint toutefois pas la teneur maximale de la bibliographie, 38400 pg/m<sup>2</sup>/jour, mesurée sur un autre site fortement industrialisé, V.R. 1 à Rio de Janeiro. Tous les sites de V.R. ont la même source polluante.
- La valeur minimale est enregistrée sur le site 11 du Havre (Château d'Eau Sandouville, un site témoin rural habité) avec une teneur de 0,005 TEQ-OMS 2005 pg/m<sup>2</sup>/jour pour les PCB-DL. Celle-ci est beaucoup moins élevée que la valeur minimale de la bibliographie, 0,5 TEQ-OMS 2005 pg/m<sup>2</sup>/jour, pour le site de bruit de fond : Parc National d'Itatiaia (PNI) 5, une réserve naturelle à Rio de Janeiro. (Source : De Souza Pereira et al., 2007). Il est possible que cet écart de concentration lie à des différences de limite de détection.
- Quant aux PCBi, la valeur minimale est mesurée sur le même site que les PCB-DL, c'est-à-dire le site 11 du Havre avec une teneur de 1590 pg/m<sup>2</sup>/jour. Celle-ci est moins élevée que la valeur minimale de la bibliographie, 3445 pg/m<sup>2</sup>/jour, mesurée sur le site PNI 6, un autre site de la réserve naturelle à Rio de Janeiro. (Source : De Souza Pereira et al., 2007). Nous pouvons en tirer la conclusion que le site 11 est bien choisi comme site de bruit de fond.

## **7.2 Comparaison des résultats dans les jauges, les lichens et les bryophytes : Explication des retombées les plus importantes**

On peut tout d'abord noter l'accord des 3 différentes méthodes sur quelques événements importants :

- Des retombées des PCB assez élevées sont mesurées sur le site 10 (France Liants Rogerville) en zone industrielle du Havre. La tendance est identique pour l'étude des lichens et des bryophytes. Une hypothèse est que l'activité de reconditionnement de certains déchets (à l'intérieur des bâtiments), et d'évacuation des déchets dangereux sur le site ex-CITRON a suscité la remise en suspension de poussières polluées, malgré la fermeture de l'usine CITRON (source : DREAL).

Remarquons que sur la période des jauges qui est limitée dans le temps, les résultats ne montrent pas de retombées de PCB remarquables, ce qui peut être s'expliquer par une activité moindre sur ces périodes alors que les 2 méthodes utilisant des bioindicateurs qui accumulent les retombées sur une période d'environ 1 an ont sans doute, dans cette hypothèse, intégré les émissions de ces travaux.

Comparativement au site 10, tous les autres sites du Havre semblent moins impactés pour les deux types de PCB.

- Le site témoin de Rouen (Site 6 Préfecture) présente globalement des valeurs de retombées du même ordre de grandeur que les autres sites rouennais. Il est même possible de remarquer que dans les lichens, la teneur de ce site montre une valeur relativement élevée (seconde plus élevée après le site 4 du Stade Mermoz). Nous pouvons émettre l'hypothèse qu'il existe peut-être une autre source (non déterminée) d'émission de PCB sur ce secteur.

On peut noter des divergences de résultats sur quelques sites :

- Le site 1 (SCI Jonques de la Seine) montre une retombée très élevée pour la méthode des jauges pendant la période d'été (voir Annexe 2 : Résultats des PCB-DL dans les jauges). Cependant, les vents dominants durant cette période d'été viennent de l'ouest et du sud-ouest donc ne proviennent pas majoritairement de la direction de TRIADIS (sauf peut-être par vent faible (18%) étant donné la proximité). Il est possible qu'un autre émetteur des PCB existe sur le secteur. Une autre hypothèse pour expliquer cette donnée élevée est que la température estivale favorise la volatilisation des PCB (sol ou sédiments fluviaux ?). On observe presque le même phénomène d'augmentation des PCB dans les résultats des bryophytes mais de façon moins marquée ce qui peut être lié au fait que la retombée très concentrée en PCB pourrait être ponctuelle et est plus moyennée dans le cas des bryophytes (accumulation des polluants sur une période d'environ un an contre deux mois pour les jauges).

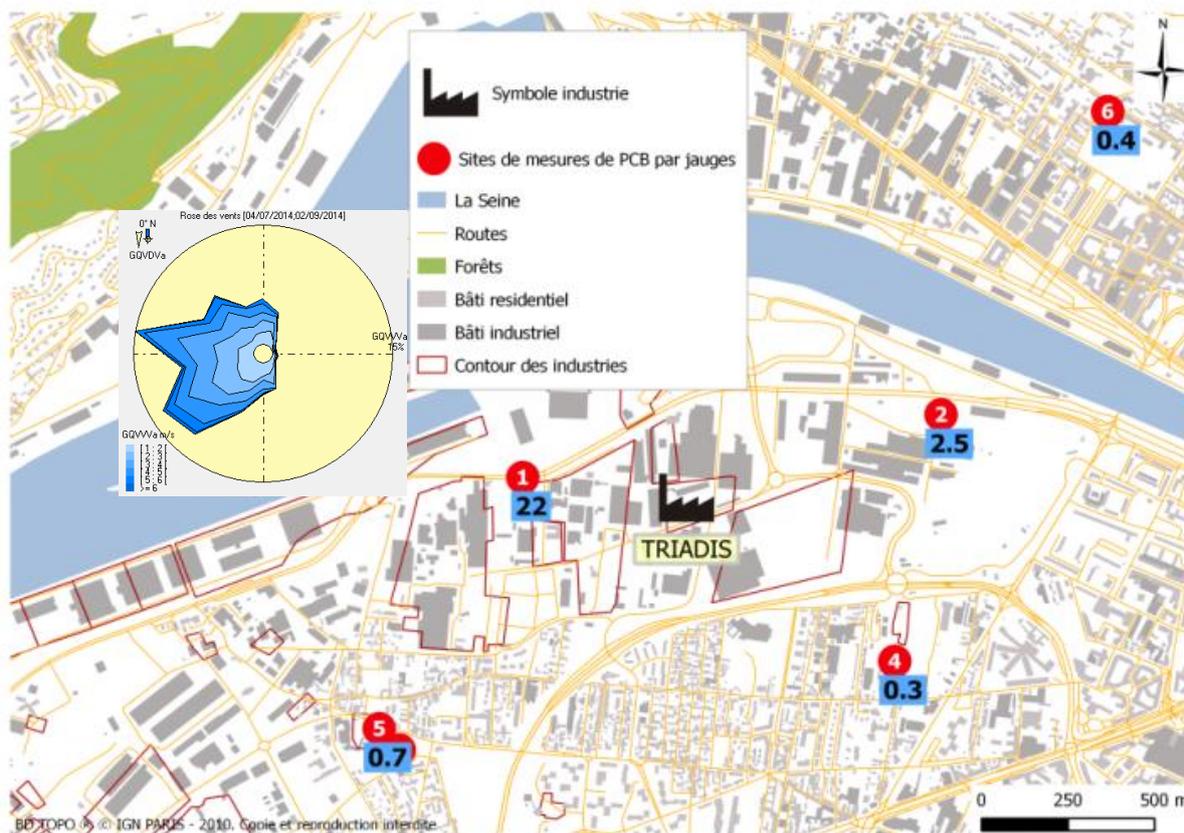


Figure 24 : Exemple de la série d'été des PCB-DL dans les jauges sur les sites de Rouen (La teneur en PCB est indiquée en bleu en  $\text{pg}/\text{m}^2/\text{jour}$ )

- Concernant les lichens sur le site 1 (SCI Jonques de la Seine), les résultats sont différents sans doute en raison de la localisation des prélèvements qui est éloignée d'environ 700 mètres de celle des jauges et des bryophytes (source : Rapport Air Lichens A15 820). Ainsi il est possible de constater sur la carte plus précise de localisation des prélèvements ci-dessous que

le site 1 du prélèvement des lichens est plus éloigné du trafic et de l'incinérateur TRIADIS que celui des bryophytes et des jauges. Cependant, cette analyse nécessiterait d'être complétée par d'autres campagnes de mesure.

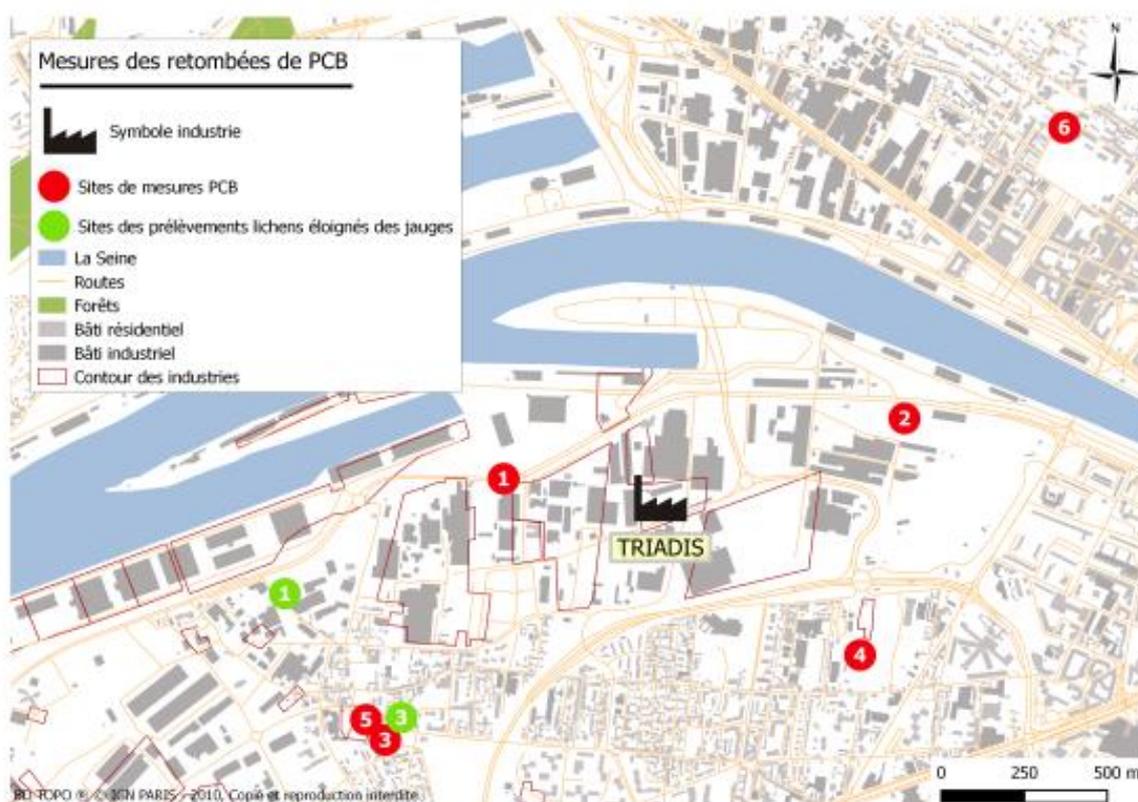


Figure 25 : Carte de la localisation des sites selon la méthode d'échantillonnage

- Des valeurs assez élevées par rapport aux autres sites sont aussi observées sur le site 2 (Port Autonome GPMR) dans la méthode des jauges et des bryophytes. Ce site a été fréquemment sous les vents de TRIADIS pendant les campagnes par jauges et plus globalement tout au long de l'année 2014 (pour l'accumulation dans les bioindicateurs) ce qui est une des explications possibles à ces valeurs plus élevées. Remarquons que nous ne retrouvons pas ces valeurs élevées dans les mesures de dioxines/furanes et de métaux effectuées en parallèle dans les jauges sur le site 2 (voir résultats du rapport 1202-022), alors qu'on trouve une augmentation dans les lichens du cuivre, du nickel et des dioxines/furanes. La volatilisation à partir des sols pollués et des sédiments fluviaux peut être une hypothèse de l'augmentation des PCB sur le site 2.
- Sur le site 4 (Stade Mermoz) de Rouen on note une retombée plus importante dans les lichens (bien supérieure à celle des autres sites). La méthode des jauges et des bryophytes ne présente pas la même tendance. Il ne nous a pas été possible d'apporter une explication à ce résultat.
- Si nous regardons les résultats des jauges sur les sites du Havre seuls sans les comparer à ceux de Rouen, la retombée mesurée sur le site 8 (APAVE Sandouville) représente en effet la concentration moyenne la plus élevée de la zone obtenue dans les jauges. La méthode des lichens et des bryophytes ne présente pas la même tendance. Ce site s'est trouvé sous les vents dominants de SEDIBEX pendant les deux périodes de mesure (été et hiver), ce qui a pu avoir un impact sur les résultats.

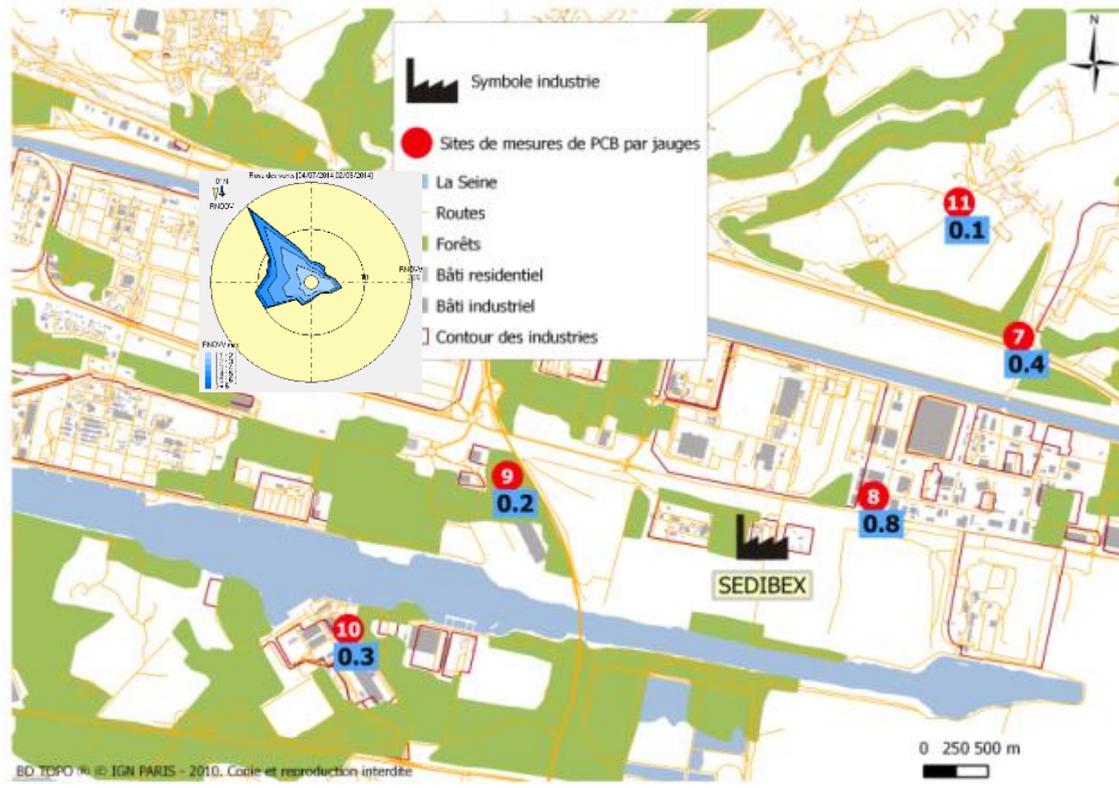


Figure 26 : Exemple de la série d'été des PCB-DL dans les jauges sur les sites de Rouen (La teneur en PCB est indiquée en bleu en  $\text{pg}/\text{m}^2/\text{jour}$ )

### 7.3 Résultats saisonniers des PCB pour la méthode des jauges

Deux types de comportement sont observés pour les sites de mesure :

- Les retombées en été sont plus élevées qu'en hiver sur quelques sites pour lesquels ces différences sont très marquées (site 1 (SCI Jonques de la Seine) de Rouen, site 7 (Restaurant Le Gabion D'OR Sandouville) du Havre) et dans une moindre mesure le site 2 (Port Autonome GPMR) de Rouen. Une des pistes d'interprétation mentionnée est liée au fait que la température puisse jouer un rôle dans la volatilisation des PCB (e.g. la volatilisation à partir de sols pollués ou sédiments fluviaux).
- Certains sites ne présentent pas de profil saisonnier. Les sites 8 (APAVE Sandouville) et 10 (France Liants Rogerville) du Havre semblent impactés de façon constante toute l'année.
- Tous les autres sites présentent des retombées faibles pour les deux saisons (sauf le site 6 car seule la campagne d'été a été réalisée sur ce site).

Voir l'Annexe 2 : Résultats des PCB-DL dans les jauges et l'Annexe 3 : Résultats des PCB<sub>i</sub>.

### 7.4 Confrontation des études des PCB-DL et des PCB<sub>i</sub>

Globalement, sur les mêmes sites, les résultats des deux types de PCB semblent cohérents. Prenons l'exemple de la méthode des jauges sur le site 1 (SCI Jonques de la Seine) de Rouen, nous retrouvons à la fois une valeur très élevée pour la somme des PCB-DL et des PCB<sub>i</sub> sur ce site. La même tendance est observable sur le site 4 (Stade Mermoz) de Rouen dans le cas des lichens. Ceci indique qu'il est possible de mesurer soit les PCB-DL ou les PCB<sub>i</sub> sans besoin de mesurer les deux types de PCB en même temps. Cependant, l'étude des deux types peut être une piste d'étude

complémentaire pour déterminer la source d'émission polluante. Rappelons néanmoins que les PCB (en particulier les plus légers) peuvent voyager par volatilisation sur de longues distances, se déposer et être réémis ce qui complique l'étude des sources si celles-ci ne sont pas majeures.

### 7.5 Etude des profils des congénères

D'une façon globale, les profils des congénères de Rouen semblent identiques à ceux du Havre pour chaque méthode dans le cas des PCB-DL mais moins observable dans le cas des PCBi. Nous pouvons faire l'hypothèse que ces profils identiques viennent du fait que les sources des PCB sont de même nature pour les deux zones. Cette hypothèse est cependant à confirmer par autres campagnes de mesure. Il est aussi observable que le PCB 118 présente le pourcentage le plus élevé dans les trois méthodes de mesure sur tous les sites de Rouen et du Havre. L'étude de Castro-Jiménez et al., 2011<sup>27</sup> trouve le même résultat sur un site rural mais très influencé par l'industrie notamment un incinérateur des déchets.

## 8. Conclusion et recommandations

---

Les objectifs principaux de cette étude ont globalement trouvé une réponse dans le cadre de cette étude:

- Les teneurs en PCB dans les retombées atmosphériques autour de deux incinérateurs déclarés en Haute Normandie sont mieux connus suite aux campagnes de mesure réalisées en 2014. En les confrontant aux résultats trouvés dans l'étude bibliographique, la Haute Normandie montre des retombées dans les jauges de l'ordre de grandeur celles d'autres régions et d'autres pays, voire quelques fois moins élevées pour des typologies de sites comparables (à l'exception notable d'un site à Rouen sur lequel les valeurs de dépôt dépassent le haut de la fourchette de référence bibliographique à une période donnée).
- Les résultats de mesure des retombées atmosphériques dans les lichens et les bryophytes concordent sur le site 10 (France Liants Rogerville) du Havre, un site très impacté par la source historique. Il pourrait être envisagé de poursuivre l'étude sur ce site pour pouvoir surveiller les niveaux des PCB.
- Cette étude met aussi en évidence des retombées significatives de PCB sur la zone rouennaise. Sans exclure la contribution de TRIADIS -seul émetteur industriel déclaré sur la zone- aux teneurs de retombées mesurées, l'existence d'autres sources de PCB sur le secteur est vraisemblable. Mais celles-ci restent à déterminer. Il est donc recommandé de poursuivre des mesures sur l'agglomération et des investigations complémentaires (notamment par recherche et croisement avec des bases de données de type sols pollués, qualité des sédiments, inventaire des émissions tous secteurs etc.) afin de compléter l'analyse.
- Afin d'avoir une comparaison des 3 méthodes, il paraît important de mesurer les polluants sur un même endroit. L'éloignement entre les endroits de mesure peut entraîner des problèmes d'interprétation.

Une amorce de base des données est disponible dans le cas où AIR NORMAND ou la DREAL souhaite continuer l'étude des PCB (voir Appendice 1 : Base des données des résultats de campagne).

Enfin, l'interprétation des résultats des études de retombées pourrait être facilitée par l'existence de valeurs repères pour chacune des 3 méthodes de mesure.

## 9. Pages complémentaires

### 9.1 Annexes

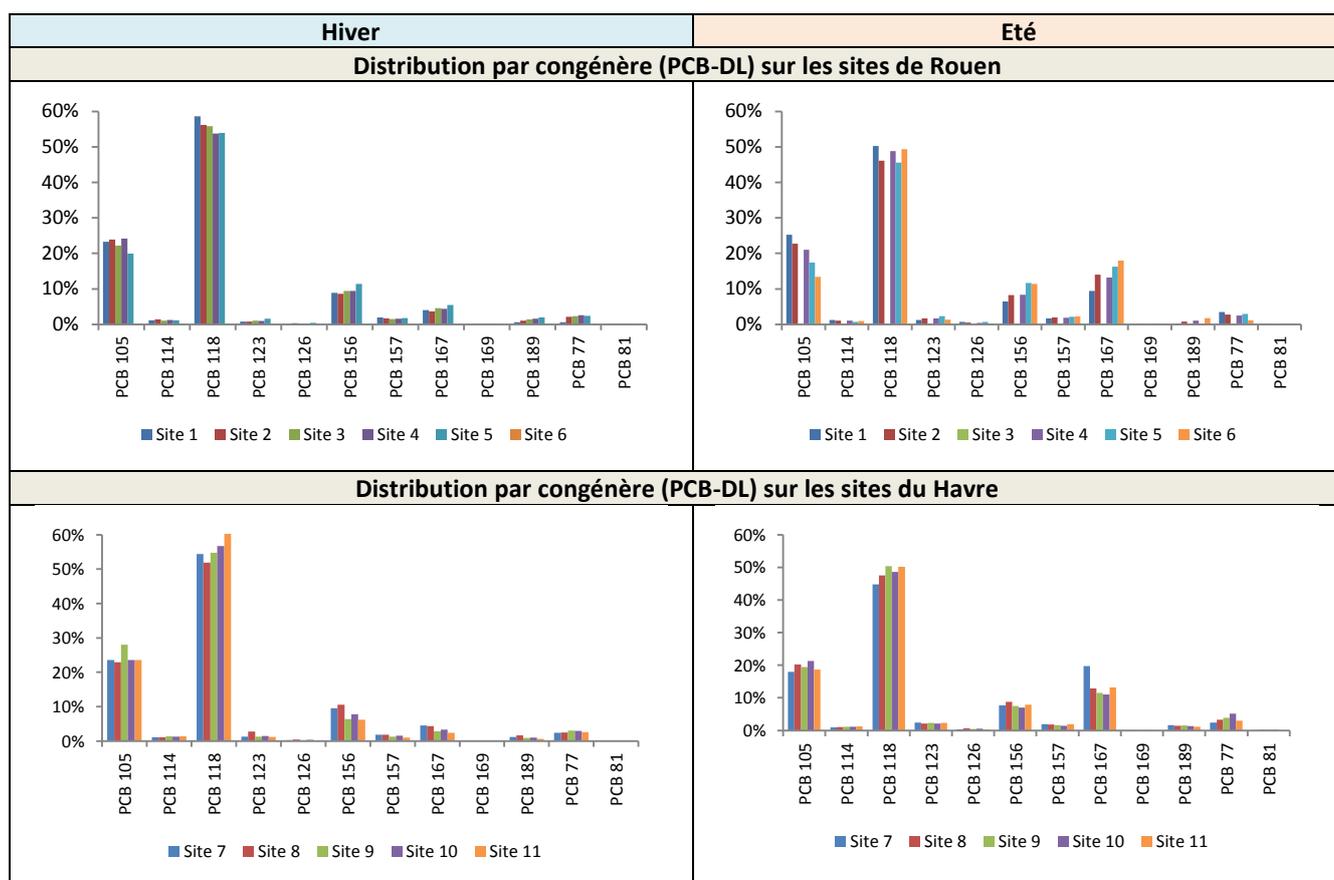
#### 9.1.1. Annexe 1 : Quantité d'eau recueillie dans les jauges

Référence	N° support	Début prélèvement	Fin prélèvement	Nb de jours	Qté d'eau recueillie (L)
<b>Hiver</b>					
ROUEN-SITE 2 SCI JONQUES DE LA SEINE	J22	14/01/2014	12/03/2014	57	6560
ROUEN-SITE 7 ATELIERS PQV TERRASSE	J26	14/01/2014	12/03/2014	57	7595
ROUEN-SITE 8 STADE MERMOZ	J27	14/01/2014	12/03/2014	57	6953
ROUEN-SITE 9 PORT AUTONOME GPMR	J29	14/01/2014	12/03/2014	57	7694
ROUEN-SITE 12 ATELIERS PQV SOL	J33	14/01/2014	12/03/2014	57	7417
LE HAVRE-SITE 8 CHÂTEAU D'EAU SANDOUVILLE	J13	14/01/2014	11/03/2014	56	6835
LE HAVRE-SITE 11 RESTAURANT LE GABION D'OR SANDOUVILLE	J20	14/01/2014	11/03/2014	56	6504
LE HAVRE-SITE 12 APAVE SANDOUVILLE	J15	14/01/2014	11/03/2014	56	6873
LE HAVRE-SITE 15 SDV OUDALLE	J1	14/01/2014	11/03/2014	56	5153
LE HAVRE-SITE 16 FRANCE LIANTS ROGERVILLE	J2	14/01/2014	11/03/2014	56	7008
<b>Eté</b>					
ROUEN-SITE 2 SCI JONQUES DE LA SEINE	J21	04/07/2014	02/09/2014	60	8734
ROUEN-SITE 6 PREFECTURE	J22	04/07/2014	02/09/2014	60	9350
ROUEN-SITE 8 STADE MERMOZ	J23	04/07/2014	02/09/2014	60	9590
ROUEN-SITE 9 PORT AUTONOME GPMR	J24	04/07/2014	02/09/2014	60	8287
ROUEN-SITE 7 ATELIERS PQV TERRASSE	J25	04/07/2014	02/09/2014	60	10291
LE HAVRE-SITE 8 CHÂTEAU D'EAU SANDOUVILLE	J6	08/07/2014	04/09/2014	58	7282
LE HAVRE-SITE 11 RESTAURANT LE GABION D OR SANDOUVILLE	J5	08/07/2014	04/09/2014	58	5193
LE HAVRE-SITE 12 APAVE SANDOUVILLE	J2	08/07/2014	03/09/2014	57	9771
LE HAVRE-SITE 15 SDV OUDALLE	J3	08/07/2014	02/09/2014	56	9914
LE HAVRE-SITE 16 FRANCE LIANTS ROGERVILLE	J4	08/07/2014	02/09/2014	56	10007

## 9.1.2. Annexe 2 : Résultats des PCB-DL dans les jauges

Références	Type de sites	N° de site	Σ PCB-DL en TEQ-OMS 2005 (pg/m <sup>2</sup> /jour)		
			Moyenne (été/hiver)	Hiver	Été
<b>ROUEN</b>					
SCI JONQUES DE LA SEINE	Z.I.	Site 1	<b>11.553</b>	1.091	22.014
PORT AUTONOME GPMR		Site 2	<b>1.781</b>	1.060	2.502
ATELIERS PQV TERRASSE	Urbain	Site 3	0.292	0.292	-
STADE MERMOZ		Site 4	0.190	0.068	0.313
ATELIERS PQV SOL		Site 5	0.516	0.290	0.742
PREFECTURE	Bruit de fond urbain	Site 6	0.361	-	0.361
<b>LE HAVRE</b>					
RESTAURANT LE GABION D'OR SANDOUVILLE	Z.I.	Site 7	0.256	0.084	0.428
APAVE SANDOUVILLE		Site 8	0.807	0.813	0.800
SDV OUDALLE		Site 9	0.164	0.148	0.180
FRANCE LIANTS ROGERVILLE	Bruit de fond rural habité	Site 10	0.275	0.266	0.283
CHÂTEAU D'EAU SANDOUVILLE		Site 11	0.066	0.048	0.083

Tableau 25 : Résultats des PCB-DL par la méthode de jauge

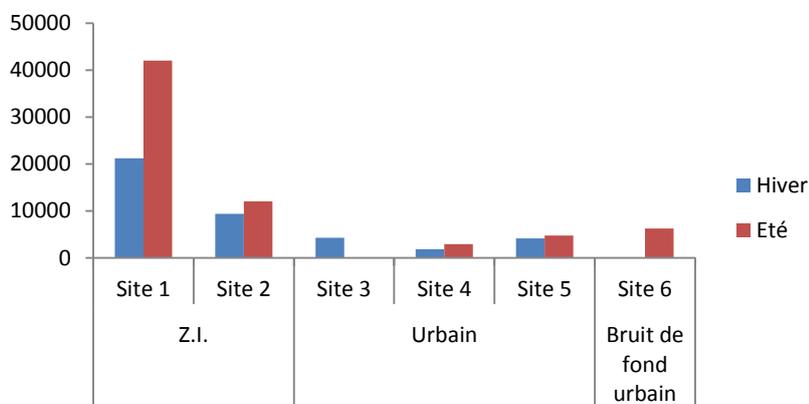


### 9.1.3. Annexe 3 : Résultats des PCBi dans les jauges

Références	Type de sites	N° de site	Σ PCBi (pg/m <sup>2</sup> /jour)		
			Moyenne (été/hiver)	Hiver	Eté
<b>ROUEN</b>					
SCI JONQUES DE LA SEINE	Z.I.	Site 1	<b>31631</b>	21216	42046
PORT AUTONOME GPMR		Site 2	10728	9392	12063
ATELIERS PQV TERRASSE	Urbain	Site 3	4291	4291	-
STADE MERMOZ		Site 4	2401	1850	2952
ATELIERS PQV SOL		Site 5	4447	4146	4747
PREFECTURE	Bruit de fond urbain	Site 6	6257	-	6257
<b>LE HAVRE</b>					
RESTAURANT LE GABION D'OR SANDOUVILLE	Z.I.	Site 7	5123	1930	8316
APAVE SANDOUVILLE		Site 8	6917	7547	6286
SDV OUDALLE		Site 9	2128	1908	2349
FRANCE LIANTS ROGERVILLE		Site 10	2150	1835	2465
CHÂTEAU D'EAU SANDOUVILLE	Bruit de fond rural habité	Site 11	1590	1423	1756

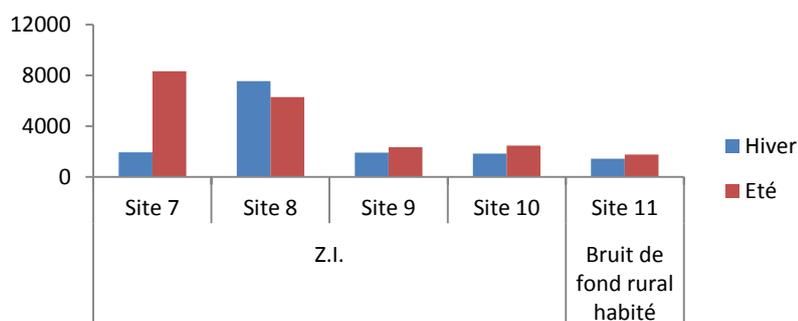
Somme des PCBi (pg/m<sup>2</sup>/jour)

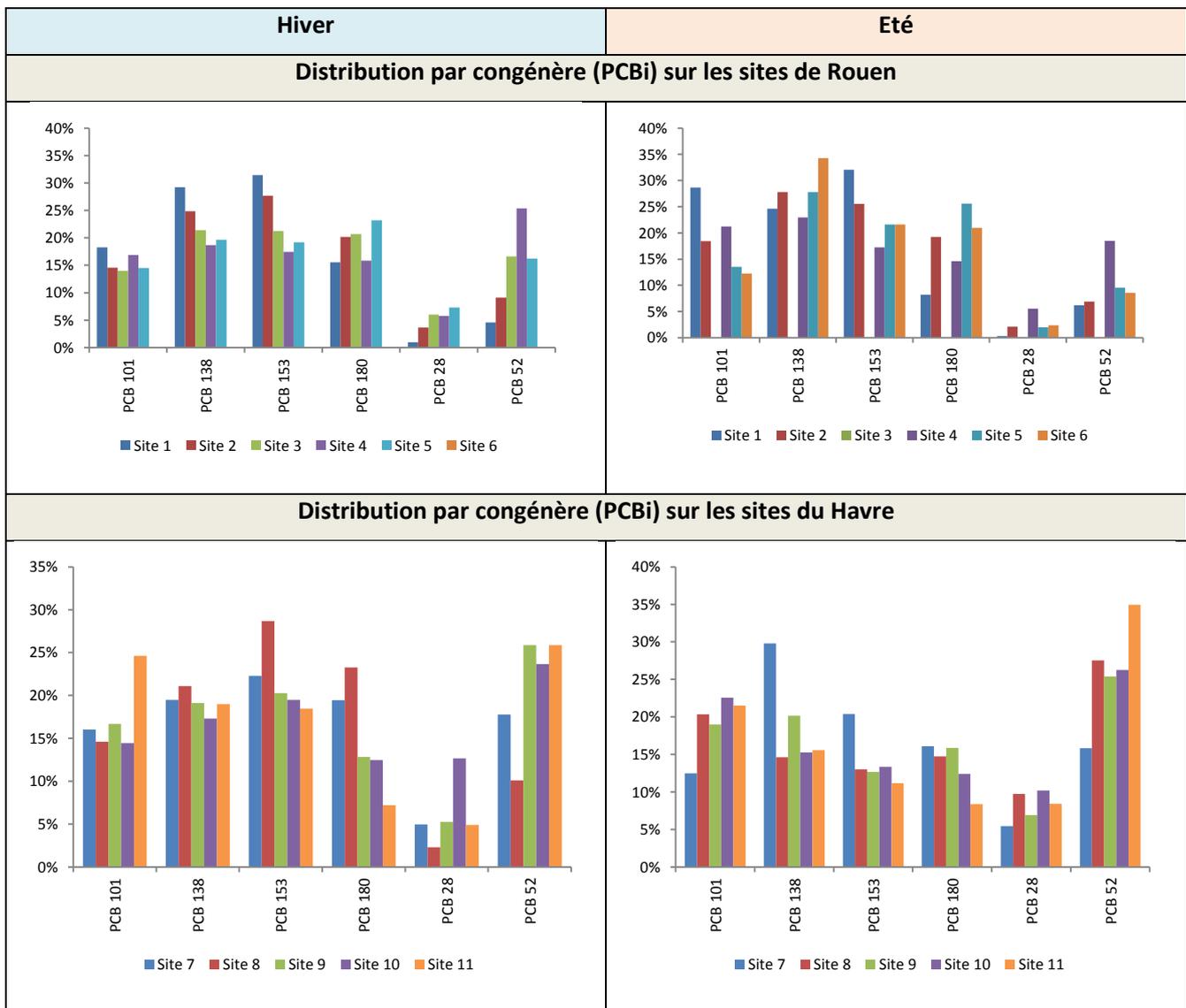
Résultat saisonnier sur le site de Rouen (PCBi)



Somme des PCBi (pg/m<sup>2</sup>/jour)

Résultat saisonnier sur le site du Havre (PCBi)





### 9.1.4. Annexe 4 : Résultats des lichens

Références	Type de sites	Sites	Σ PCB-DL en TEQ-OMS 2005 (pg/g)
<b>ROUEN</b>			
SCI JONQUES DE LA SEINE	Z.I.	Site 1	1.763
PORT AUTONOME GPMR		Site 2	5.032
STADE MERMOZ	Urbain	Site 4	<b>6.568</b>
ATELIERS PQV SOL		Site 5	1.319
PREFECTURE	Bruit de fond urbain	Site 6	5.480
<b>LE HAVRE</b>			
RESTAURANT LE GABION D'OR SANDOUVILLE	Z.I.	Site 7	1.062
APAVE SANDOUVILLE		Site 8	1.055
SDV OUDALLE		Site 9	0.593
FRANCE LIANTS ROGERVILLE		Site 10	<b>4.405</b>
CHÂTEAU D'EAU SANDOUVILLE	Bruit de fond rural habité	Site 11	0.505

Tableau 26 : Résultats des PCB-DL par la méthode des lichens

Références	Type de sites	Sites	Σ PCBi (pg/g)
<b>ROUEN</b>			
SCI JONQUES DE LA SEINE	Z.I.	Site 1	5698
PORT AUTONOME GPMR		Site 2	11211
STADE MERMOZ	Urbain	Site 4	27883
ATELIERS PQV SOL		Site 5	5612
PREFECTURE	Bruit de fond urbain	Site 6	12679
<b>LE HAVRE</b>			
RESTAURANT LE GABION D'OR SANDOUVILLE	Z.I.	Site 7	4549
APAVE SANDOUVILLE		Site 8	4127
SDV OUDALLE		Site 9	1489
FRANCE LIANTS ROGERVILLE		Site 10	7768
CHÂTEAU D'EAU SANDOUVILLE	Bruit de fond rural habité	Site 11	1683

Tableau 27 : Résultats des PCBi par la méthode des lichens

### 9.1.5. Annexe 5 : Résultats des bryophytes

Références	Type de sites	Sites	Σ PCB-DL en TEQ-OMS 2005 (pg/g)
<b>ROUEN</b>			
SCI JONQUES DE LA SEINE	Z.I.	Site 1	0.798
PORT AUTONOME GPMR		Site 2	<b>1.082</b>
STADE MERMOZ	Urbain	Site 4	0.373
ATELIERS PQV SOL		Site 5	0.295
PREFECTURE	Bruit de fond urbain	Site 6	0.310
<b>LE HAVRE</b>			
RESTAURANT LE GABION D'OR SANDOUVILLE	Z.I.	Site 7	0.070
APAVE SANDOUVILLE		Site 8	0.053
SDV OUDALLE		Site 9	0.134
FRANCE LIANTS ROGERVILLE		Site 10	<b>0.953</b>
CHÂTEAU D'EAU SANDOUVILLE	Bruit de fond rural habité	Site 11	0.054

Tableau 28 : Résultats des PCB-DL par la méthode des bryophytes

Références	Type de sites	Sites	Σ PCBi (pg/g)
<b>ROUEN</b>			
SCI JONQUES DE LA SEINE	Z.I.	Site 1	4706
PORT AUTONOME GPMR		Site 2	9295
STADE MERMOZ	Urbain	Site 4	1575
ATELIERS PQV SOL		Site 5	2040
PREFECTURE	Bruit de fond urbain	Site 6	1198
<b>LE HAVRE</b>			
RESTAURANT LE GABION D'OR SANDOUVILLE	Z.I.	Site 7	750
APAVE SANDOUVILLE		Site 8	643
SDV OUDALLE		Site 9	961
France LIANTS ROGERVILLE		Site 10	3249
CHÂTEAU D'EAU SANDOUVILLE	Bruit de fond rural habité	Site 11	617

Tableau 29 : Résultats des PCBi par la méthode des bryophytes

### 9.1.6. Annexe 6 : Description des sites de mesure

Sites de Rouen :

Sites	Jauges	Lichens Photos Aairlichens	Bryophytes Photos BioMonitor
Site 1 : SCI Jonques de la Seine			
Site 2 : Port Autonome GPMR			
Site 3 : Ateliers Petit Quevilly (Terrasse)		-	-

<p>Site 4 : Stade Mermoz</p>			
<p>Site 5 : Ateliers PQV (Sol)</p>			
<p>Site 6 : Préfecture</p>			

Sites du Havre :

<b>Sites</b>	<b>Jauges</b>	<b>Lichens Photos Aairlichens</b>	<b>Bryophytes Photos BioMonitor</b>
Site 7 : Restaurant Gabion d'Or Sandouville			
Site 8 : APAVE Sandouville			

<p>Site 9 : SDV Sandouville</p>			
<p>Site 10 : France Liants Rogerville</p>			
<p>Site 11 : Château d'Eau Sandouville</p>			

### 9.1.7. Annexe 7 : Emissions dans l'air en France métropolitaine par type de combustibles

En kg	1990	1995	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013
CMS sauf lignite	27	20	21	17	17	18	17	18	17	18	17	15	15	11	14	15
Lignite	2.6	3.1	0.6	0.5	0.3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Bois	11	11	9.8	9.9	9.1	9.8	10.1	10.1	10.0	9.8	11	11	12	11	12	13
Déchets industriels solides	91	77	28	24	5.5	3.6	5.3	5.4	4.9	1.2	1.1	0.9	1.0	0.5	0.7	0.4
Déchets municipaux organiques	3.2	2.8	1.0	0.8	0.7	0.4	0.7	0.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Déchets municipaux fossiles	2.1	1.8	0.6	0.5	0.4	0.2	0.4	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Autres combustibles solides	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0	0	0	0
Coke de pétrole	0.1	0.1	0.1	0.2	0.3	0.6	0.8	0.7	0.6	0.4	0.3	0.4	0.2	0.3	0.2	0.1
Fioul lourd	4.6	4.0	3.4	3.1	2.6	2.8	2.7	3.0	2.8	2.4	2.2	2.0	1.8	1.3	1.2	1.0
Fioul domestique	5.6	5.6	4.6	5.2	4.7	5.0	4.8	4.7	4.3	3.8	4.4	4.2	3.9	3.3	3.3	3.5
Essence / super	0.002	0.002	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000
Gazole et GNR	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.2	0.2
Carburéacteurs	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
Huiles et solvants usagés	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Autres produits pétroliers	0.0	0.0	0.1	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Gaz naturel et GNV	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
GPL et GPLc	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Agro-carburant essence	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Agro-carburant diesel	0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
Autres produits de la biomasse	0.1	0.1	0.1	0.2	0.3	0.3	0.1	0.1	0.2	0.2	0.2	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
<b>Total</b>	<b>148</b>	<b>126</b>	<b>69</b>	<b>61</b>	<b>41</b>	<b>41</b>	<b>42</b>	<b>43</b>	<b>39</b>	<b>36</b>	<b>36</b>	<b>34</b>	<b>35</b>	<b>28</b>	<b>31</b>	<b>33</b>
<i>% émissions totales</i>	<i>81</i>	<i>79</i>	<i>65</i>	<i>63</i>	<i>54</i>	<i>54</i>	<i>54</i>	<i>57</i>	<i>54</i>	<i>52</i>	<i>53</i>	<i>58</i>	<i>56</i>	<i>50</i>	<i>54</i>	<i>57</i>

(Source : CITEPA, 2015)

## 9.2 Appendices

### 9.2.1. Appendice 1 : Base des données des résultats de campagne

Afin de faciliter l'interprétation des résultats, des règles pour entrer les données dans la base des données ont été fixées par AIR NORMAND. La base des données construite est présentée comme suivante :

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q
1	N° Echantillon	référence	N° support	date remise	Paramètre	Type de PCB	Méthode	Début prélèvement	Fin prélèvement	Nb de jours	Qtté d'eau recueillie	Unité d'eau recueillie	signé	Résultat (pg/jauges)	Résultat (pg/m <sup>3</sup> /jour)	Facteur Equivalent de Toxicité (TEF-OMS 2005)	I-TEQ (pg/m <sup>3</sup> /jour )
2	407006-003	ROUEN-SITE 2 SCI JONQUES DE LA S	J22	14/03/2014	PCB 77	PCB-DL non ortho	EN 1528-2	14/01/2014	12/03/2014	57	6560	g		137	53.12921353	0.0001	0.00531292
3	407006-003	ROUEN-SITE 2 SCI JONQUES DE LA S	J22	14/03/2014	PCB 81	PCB-DL non ortho	EN 1528-2	14/01/2014	12/03/2014	57	6560	g		5.66	2.194973347	0.0003	0.00065849
4	407006-003	ROUEN-SITE 2 SCI JONQUES DE LA S	J22	14/03/2014	PCB 126	PCB-DL non ortho	EN 1528-2	14/01/2014	12/03/2014	57	6560	g		21.4	8.299015836	0.1	0.82990158
5	407006-003	ROUEN-SITE 2 SCI JONQUES DE LA S	J22	14/03/2014	PCB 169	PCB-DL non ortho	EN 1528-2	14/01/2014	12/03/2014	57	6560	g	<	0.5	0.193902239	0.03	0.00290853
6	407006-003	ROUEN-SITE 2 SCI JONQUES DE LA S	J22	14/03/2014	PCB 105	PCB-DL mono-orth	EN 1528-2	14/01/2014	12/03/2014	57	6560	g		5070	1966.168705	0.00003	0.05898506
7	407006-003	ROUEN-SITE 2 SCI JONQUES DE LA S	J22	14/03/2014	PCB 114	PCB-DL mono-orth	EN 1528-2	14/01/2014	12/03/2014	57	6560	g		249	96.56331511	0.00003	0.0028969
8	407006-003	ROUEN-SITE 2 SCI JONQUES DE LA S	J22	14/03/2014	PCB 118	PCB-DL mono-orth	EN 1528-2	14/01/2014	12/03/2014	57	6560	g		12800	4963.897323	0.00003	0.14891692
9	407006-003	ROUEN-SITE 2 SCI JONQUES DE LA S	J22	14/03/2014	PCB 123	PCB-DL mono-orth	EN 1528-2	14/01/2014	12/03/2014	57	6560	g		176	68.25358819	0.00003	0.00204761
10	407006-003	ROUEN-SITE 2 SCI JONQUES DE LA S	J22	14/03/2014	PCB 156	PCB-DL mono-orth	EN 1528-2	14/01/2014	12/03/2014	57	6560	g		1940	752.340688	0.00003	0.02257022
11	407006-003	ROUEN-SITE 2 SCI JONQUES DE LA S	J22	14/03/2014	PCB 157	PCB-DL mono-orth	EN 1528-2	14/01/2014	12/03/2014	57	6560	g		421	163.2656854	0.00003	0.00489797
12	407006-003	ROUEN-SITE 2 SCI JONQUES DE LA S	J22	14/03/2014	PCB 167	PCB-DL mono-orth	EN 1528-2	14/01/2014	12/03/2014	57	6560	g		873	338.5533096	0.00003	0.0101566
13	407006-003	ROUEN-SITE 2 SCI JONQUES DE LA S	J22	14/03/2014	PCB 189	PCB-DL mono-orth	EN 1528-2	14/01/2014	12/03/2014	57	6560	g		130	50.41458218	0.00003	0.00151244
14	407006-003	ROUEN-SITE 2 SCI JONQUES DE LA S	J22	14/03/2014	PCB 28	PCBi	EN 1528-2	14/01/2014	12/03/2014	57	6560	g		537	208.2510049	ND	ND
15	407006-003	ROUEN-SITE 2 SCI JONQUES DE LA S	J22	14/03/2014	PCB 52	PCBi	EN 1528-2	14/01/2014	12/03/2014	57	6560	g		2490	965.6331511	ND	ND
16	407006-003	ROUEN-SITE 2 SCI JONQUES DE LA S	J22	14/03/2014	PCB 101	PCBi	EN 1528-2	14/01/2014	12/03/2014	57	6560	g		9980	3870.288694	ND	ND
17	407006-003	ROUEN-SITE 2 SCI JONQUES DE LA S	J22	14/03/2014	PCB 138	PCBi	EN 1528-2	14/01/2014	12/03/2014	57	6560	g		16000	6204.871653	ND	ND
18	407006-003	ROUEN-SITE 2 SCI JONQUES DE LA S	J22	14/03/2014	PCB 153	PCBi	EN 1528-2	14/01/2014	12/03/2014	57	6560	g		17200	6670.237027	ND	ND
19	407006-003	ROUEN-SITE 2 SCI JONQUES DE LA S	J22	14/03/2014	PCB 180	PCBi	EN 1528-2	14/01/2014	12/03/2014	57	6560	g		8500	3296.338066	ND	ND
20	407006-007	ROUEN-SITE 7 ATELIERS PQV TERRA	J26	14/03/2014	PCB 77	PCB-DL non ortho	EN 1528-2	14/01/2014	12/03/2014	57	7595	g		52.3	20.28217422	0.0001	0.00202822
21	407006-007	ROUEN-SITE 7 ATELIERS PQV TERRA	J26	14/03/2014	PCB 81	PCB-DL non ortho	EN 1528-2	14/01/2014	12/03/2014	57	7595	g	<	4.2	1.628778809	0.0003	0.00024432
22	407006-007	ROUEN-SITE 7 ATELIERS PQV TERRA	J26	14/03/2014	PCB 126	PCB-DL non ortho	EN 1528-2	14/01/2014	12/03/2014	57	7595	g		6.36	2.466436482	0.1	0.24664365
23	407006-007	ROUEN-SITE 7 ATELIERS PQV TERRA	J26	14/03/2014	PCB 169	PCB-DL non ortho	EN 1528-2	14/01/2014	12/03/2014	57	7595	g		1.5	0.581706718	0.03	0.0174512
24	407006-007	ROUEN-SITE 7 ATELIERS PQV TERRA	J26	14/03/2014	PCB 105	PCB-DL mono-orth	EN 1528-2	14/01/2014	12/03/2014	57	7595	g		498	193.1266302	0.00003	0.0057938
25	407006-007	ROUEN-SITE 7 ATELIERS PQV TERRA	J26	14/03/2014	PCB 114	PCB-DL mono-orth	EN 1528-2	14/01/2014	12/03/2014	57	7595	g		23.7	9.190966137	0.00003	0.00027573

Figure 27 : Base des données des résultats de campagne

Les résultats bruts sont entrés dans le fichier Excel avec tous les détails concernant la présentation des résultats finaux. Cette étape est très importante afin de faciliter le traitement pendant l'utilisation du tableau croisé dynamique, l'outil permettant de trier les détails et sortir un tableau selon notre besoin.

Liste de champs de tableau croisé dynamique

Choisissez les champs à inclure dans le rapport :

- Paramètre
- Type de PCB
- Méthode
- Début prélèvement
- Fin prélèvement
- Nb de jours
- Qtté d'eau recueillie
- Unité d'eau recueillie
- signe
- Résultat (pg/jauges)
- Résultat (pg/m<sup>2</sup>/jour)
- Facteur Equivalent de Toxicité (TEF-OMS 2005)
- I-TEQ (pg/m<sup>2</sup>/jour)

Faites glisser les champs dans les zones voulues ci-dessous:

Filtre du rapport  
 Étiquettes de colon...

Étiquettes de lignes  
 Valeurs

Différer la mise à jour de la dispo...

En utilisant le filtre, nous pouvons choisir si le tableau concerne les PCB-DL ou les PCB<sub>i</sub>, la période de mesure en été ou en hiver, etc.

1	Type de PCB	PCBi						
2	Début prélèvement	(Plusieurs éléments)						
3								
4	Somme de Résultat (pg/m <sup>2</sup> /jour)	Étiquettes de colonnes						
5	Étiquettes de lignes	PCB 101	PCB 138	PCB 153	PCB 180	PCB 28	PCB 52	Total général
6	LE HAVRE-SITE 11 RESTAURANT LE GABION C	1345.714732	2853.445532	2126.231183	1713.112672	549.4499338	1657.877756	10245.83181
7	LE HAVRE-SITE 12 APAVE SANDOUVILLE	2381.050246	2509.856734	2981.385429	2683.399238	786.0173519	2491.436021	13833.14502
8	LE HAVRE-SITE 15 SDV OUDALLE	764.1964249	838.4055818	684.0663245	617.7517587	262.8898858	1089.453581	4256.763557
9	LE HAVRE-SITE 16 FRANCE LIANTS ROGERVIL	821.4322108	693.5398339	686.0399723	534.4638219	483.1489794	1081.55899	4300.183808
10	LE HAVRE-SITE 8 CHÂTEAU D EAU SANDOUVI	728.5890964	543.2567631	458.7710263	249.3465786	217.3462616	981.8829706	3179.192697
11	<b>Total général</b>	<b>6040.982711</b>	<b>7438.504444</b>	<b>6936.493935</b>	<b>5798.074069</b>	<b>2298.852412</b>	<b>7302.209318</b>	<b>35815.11689</b>
12								

La façon détaillée lors de l'entrée des résultats bruts facilite l'utilisation du tableau croisé dynamique : Il suffit de choisir les paramètres à définir dans les colonnes, les lignes, et le filtre

Figure 28 : Utilisation du tableau croisé dynamique d'Excel

### 9.2.2. Appendice 2 : Détails concernant *Tillandsia Usneoides* (L.)



Figure 29 : *Tillandsia usneoides* (source : <http://www.aujardin.info>)

*Tillandsia usneoides*, appelé couramment cheveux d'ange ou barbe de vieillard, est une plante épiphyte de la famille des Broméliacées. Originaires d'Amérique centrale et du sud des États-Unis, ils croissent accrochés aux branches d'arbres des milieux humides.

Il se retrouve aujourd'hui partout dans le monde, soit introduit dans les forêts, soit cultivé dans les maisons, serres, vérandas, ou en extérieur.

Cette plante se présente sous forme de tiges filiformes, souples et ramifiées indéfiniment, recouvertes de fines écailles argentées. Elles portent des feuilles fines, parfois redressées, parfois bouclées, de même texture que la tige. Les minuscules écailles qui recouvrent l'ensemble ont un rôle important dans l'absorption de l'eau et des nutriments. *Tillandsia usneoides* n'a pas de racine, c'est une plante à fleur épiphyte qui se nourrit exclusivement du ruissellement de l'eau sur ses tiges et feuilles.

L'ensemble pend d'une branche ou d'un support sur un à plusieurs mètres comme une longue barbe de vieillard.

### 9.3 Bibliographie

- 1 Activités de TRIADIS Services de Rouen (consulté le 11 mai 2015)  
[http://www.groupe-seche.com/FR/triadis-services---site-de-rouen-rouen\\_40\\_31.html](http://www.groupe-seche.com/FR/triadis-services---site-de-rouen-rouen_40_31.html)
- 2 Activités de SEDIBEX du Havre (consulté le 11 mai 2015)  
[http://www.sedibex.fr/sedibex\\_dechetsindustriels\\_activite\\_process.html](http://www.sedibex.fr/sedibex_dechetsindustriels_activite_process.html)
- 3 Définition de la dose journalière tolérable (DJT) (consulté le 11 mai 2015)  
<http://www.efsa.europa.eu/fr/faqs/faqchemicalsinfood.htm>
- 4 Définition de la concentration ubiquitaire (consulté le 11 mai 2015)  
<http://www.evere.fr/assets/files/Suivi-2010-sols-et-aquiferes-CLIS-du-20-04-11.pdf>
- 5 Définition du récepteur Ah (consulté le 27 mai 2015)  
<http://www.greenfacts.org/fr/glossaire/pqrs/recepteur-Ah.htm>
- 6 Données des mesures des PCB dans l'air ambiant en République de Tchèque (consulté le 19 mai 2015)  
<http://www.pops-gmp.org/visualization-2014>
- 7 Fabrication de l'acier (consulté le 28 mai 2015)  
<http://www.futura-sciences.com/magazines/matiere/infos/gr/d/matiere-fabrication-acier-835/>
- 8 Méthodologie de la recherche documentaire : principes clés (consulté le 7 avril 2015)  
[http://bu.univ-avignon.fr/wp-content/uploads/2013/08/Methodo\\_documentaire.pdf](http://bu.univ-avignon.fr/wp-content/uploads/2013/08/Methodo_documentaire.pdf)
- 9 PCB: quels risques pour ma santé? : site de l'ASEF (consulté le 10 juillet 2015)  
<http://www.asef-asso.fr/mon-alimentation/nos-syntheses/1316-les-pcb-quels-risques-pour-ma-sante-la-synthese-de-l-asef>
- 10 Polychlorobiphényles – PCB : Site du CITEPA (consulté le 2 mars 2015)  
<http://www.citepa.org/fr/air-et-climat/polluants/polluant-organiques-persistants/polychlorobiphenyls>
- 11 Polychlorobiphényles, Point sur les connaissances, Institut de Veille Sanitaire (consulté le 10 juillet 2015)  
<http://www.invs.sante.fr/Dossiers-thematiques/Environnement-et-sante/Polychlorobiphenyles/Points-sur-les-connaissances>
- 12 Portail de l'Economie et des Finances : Réglementation concernant les PCB (consulté le 16 juin 2015)  
<http://www.economie.gouv.fr/dgcrf/publications/juridiques/panorama-des-textes/Dioxines>
- 13 Que sont les PCB ? Quels sont leurs dangers ? (consulté le 14 avril 2015)  
<http://www.developpement-durable.gouv.fr/Que-sont-les-PCB-Quels-sont-leurs.html>
- 14 Séminaire «Maîtrise de l'information scientifique» : Recherche bibliographique (consulté le 7 avril 2015)  
[http://australe.upmc.fr/access/content/group/fcMED\\_infoScient/pdf/D\\_sem\\_recherche\\_biblio.pdf](http://australe.upmc.fr/access/content/group/fcMED_infoScient/pdf/D_sem_recherche_biblio.pdf)

- 15 Site du Registre Environnementale, Ontario : Proposal to Amend Ontario Regulation 419/05: Air Pollution – Local Air Quality, under the Environmental Protection Act, to include an Ontario Air Standard for Dioxins, Furans and Dioxin-like PCBs. (consulté le 18 mai 2015)

<http://www.ebr.gov.on.ca/ERS-WEB-External/displaynoticecontent.do?noticeId=MTA3MDk2&statusId=MTYwNzgw>

- 16 Site du Service Public de la Diffusion du Droit : Arrêté relatif aux installations d'incinération et de co-incinération de déchets non dangereux et aux installations incinérant des déchets d'activités de soins à risques infectieux (consulté le 16 juin 2015)

[http://www.legifrance.gouv.fr/affichTexte.do;jsessionid=024DC1C5AF1FD94C2E087AE56E13E9B3.tpdila18v\\_1?cidTexte=JORFTEXT000026856084&categorieLien=id](http://www.legifrance.gouv.fr/affichTexte.do;jsessionid=024DC1C5AF1FD94C2E087AE56E13E9B3.tpdila18v_1?cidTexte=JORFTEXT000026856084&categorieLien=id)

- 17 ADEME, 2013 : Museum national d'histoire naturelle – Pollution atmosphérique par les métaux en France. Dix ans de biosurveillance des retombées.
- 18 Air Normand, 2009 : Surveillance environnementale autour des incinérateurs: Mesures de retombées & Biosurveillance, Etude des données existantes et projet de mutualisation, Rapport d'étude n° E 08\_21\_09.
- 19 Air Normand, 2013 : Mesures des retombées atmosphériques de métaux et de dioxines/furanes sur le secteur du Havre, Rapport d'étude n° 1202-012-1.
- 20 Anderson P.N., Hites R.A., 1996: OH radical reactions: The major removal pathway for polychlorinated biphenyls from the atmosphere, Environ. Sci. Technol. **30**, 1756–1763.
- 21 Aries E., Anderson D. R., Fisher R., Fray T. A. T., Hemfrey D., 2006: PCDD/F and “Dioxin-like” PCB emissions from iron ore sintering plants in the UK, Chemosphere 65(9), 1470-1480.
- 22 Aydin Y. M., Kara M., Dumanoglu Y., Odabasi M., Elbir T., 2014 : Source apportionment of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) and polychlorinated biphenyls (PCBs) in ambient air of an industrial region in Turkey, Atmospheric Environment **97**, 271-285.
- 23 Blanchard M., Teil M.J. and Chevreuil M., 2004: The Seasonal Fate of PCBs in Ambient Air and Atmospheric Deposition in Northern France, Journal of Atmospheric Chemistry **53**, 123-144.
- 24 Brož J., Grabic R., Kilián J., Lojkásek M., Marklund S., Ocelka T., Pekárek V., Příbyl J., Tydlitát V., Výška J., 2000: The effect of oils on PAH, PCDD, PCDF, and PCB emissions from a spark engine fueled with leaded gasoline, Chemosphere **41(12)**, 1905-1911.
- 25 Campagna C., Bailey J.L., Ayotte P., Sirard M-A., 2008 : Impact d'une mixture environnementale d'organochlorés sur l'ovocyte, le spermatozoïde et l'embryon porcin in vitro.

<http://theses.ulaval.ca/archimede/fichiers/25487/25487.html>

- 26 Castro-Jiménez J., Deviller G., Ghiani M., Loos R., Mariani G., Skejo H., Umlauf G., Wollgast J., Laugier T., Héas-Moisan K., Léauté F., Munsch C., Tixier C., Tronczynski J., 2008: PCDD/F and PCB multi-media ambient concentrations, congener patterns and occurrence in a Mediterranean coastal lagoon (Etang de Thau, France), Environ. Pollut. **156**, 123-135.
- 27 Castro-Jiménez J., Mariani G., Vives I., Skejo H., Umlauf G., Zaldivar J.M., Dueri S., Messiaen G., Laugier T., 2011 : Atmospheric concentrations, occurrence and deposition of

- persistent organic pollutants (POPs) in a Mediterranean coastal site (Etang de Thau, France), *Environ. Pollut.* **159**, 1948-1956.
- 28 Cetin B., Yarkin S., Bayram A., Odabasi M., 2007: Ambient concentrations & source apportionment of PCBs and trace elements around an industrial area in Izmir, Turkey, *Chemosphere* **69(8)**, 1267-1277.
  - 29 Chi K.H., Moo B.C., Shu H.C., 2007: Measurement of atmospheric PCDD/F & PCB distributions in the vicinity area of Waelz plant during different operating stages, *Sci. Tot. Env.* **391**, 114-123.
  - 30 Commission OSPAR, 1997: Note d'orientation sur l'échantillonnage et l'analyse des PCB dans l'atmosphère et dans les précipitations, Réf. 1997-9.
  - 31 COPARLY, 2012 : Evaluation de la qualité de l'air suite à un incendie d'un stock de biomasse sur la plateforme Ecopole à Decines-Charpieu.
  - 32 Cortés J., Gonzalez C. M., Morales L., Abalos M., Abad E., Aristizabal B.H., 2014 : PCDD/PCDF & DL-PCB in the ambient air of a tropical Andean city : Passive & active sampling measurements near industrial & vehicular pollution sources, *Sci. of the Tot. Environment* **491-492**, 67-74.
  - 33 Dämmgen U., Erisman J.W., Cape J.N., Grünhage L., Fowler D., 2005: Practical Considerations for Addressing Uncertainties in Monitoring Bulk Deposition, *Environmental Pollution* **134**, 535-548.
  - 34 Dargnat C. & Fisson C., 2010 : Les Polychlorobiphényles (PCB) dans le bassin de la Seine et son estuaire, Seine-Aval.
  - 35 De Souza Pereira M., Heitmann D., Reifenhäuser W., Ornellas Meire R., Silva Santos L., Joao Paulo M. T., Malm O., Körner W., 2007 : Persistent organic pollutants in atmospheric deposition & biomonitoring with *T. usneoides* (L.) in an industrialized area in Rion de Janeiro state, southeast Brazil – Part II : PCB & PAH, *Chemosphere* **67**, 1736-1745.
  - 36 EU-India Action Plan Support Facility - Environment, 2008: Ship Dismantling - A status report on South Asia, Euroconsult Mott MacDonald and WWF-India.  
[http://www.shipbreakingplatform.org/shipbrea\\_wp2011/wp-content/uploads/2013/07/ship\\_dismantling\\_en.pdf](http://www.shipbreakingplatform.org/shipbrea_wp2011/wp-content/uploads/2013/07/ship_dismantling_en.pdf)
  - 37 Gingrich S. E., Diamond M. L., 2001: Atmospherically Derived Organic Surface Films along an Urban-Rural Gradient, *Environ. Sci. Technol.* **35**, 4031-4037.
  - 38 Grünhage L., Dämmgen U., Hertstein U., Jäger H.J., 1993: Response of grassland ecosystem to air pollutants: I – Experimental concept and site of the Braunschweig Grassland Investigation Program, *Environmental Pollution* **81**, 163–171.
  - 39 Guigon-Moreau E., Labadie P., Dargnat C., Teil M-J., Blanchard M., Chevreuil M., 2008: Développement méthodologique d'échantillonnage de contaminants émergents dans l'air ambiant. Rapport d'activité du programme Piren-Seine 2007, 9 p.
  - 40 Günindi M., Tasdemir Y., 2010: Atmospheric polychlorinated biphenyl (PCB) inputs to a coastal city near the Marmara sea, *Marine Pollution Bulletin* **60**, 2242-2250.
  - 41 Hansen L.G., 1999: The ortho side of PCBs: Occurrence and Disposition, Kluwer Academic Publishers, Boston.

- 42 Hillery B. R., Basu I., Sweet C. W., and Hites R. A., 1997: Temporal and spatial trends in a long-term study of gas-phase PCB concentrations near the Great Lakes, *Environ. Sci. Technol.* **31**, 1811–1816.
- 43 INERIS, 2001 : Méthode de surveillance des retombées des dioxines et furanes autour d'une UIOM, DURIF.
- 44 INERIS, 2011 : Données technico-économiques sur les substances chimiques en France : Les polyChloroBiphenyles (PCB), DRC-11-118962-11081A, 89 p.
- 45 INERIS et BRGM, 2014 : Guide de surveillance de l'impact sur l'environnement des émissions atmosphériques des installations d'incinération et de co-incinération de déchets non dangereux et de déchets d'activités de soins à risques infectieux, DRC-13-136338-06193C.
- 46 Margaret Chase Smith Policy Center, 2010: Maine Winter Roads: Salt, Safety, Environment & Cost, The University of Maine.
- 47 Offenberg J. H. & Baker J. E., 2002: Precipitation Scavenging of Polychlorinated Biphenyls and Polycyclic Aromatic Hydrocarbons along an Urban to Over-water Transect, *Environ. Sci. Technol.* **36**, 3763–3771.
- 48 Offenthaler I., Bassan R., Belis C., Jakobi G., Kirchner M., Kräuchi N., Moche W., Schramm K.-W., Sedivy I., Simoncic P., Uhl M., Weiss P., 2009: PCDD/F & PCB in spruce forests of the Alps, *Environmental Pollution* **157**, 3280-3289.
- 49 Ollivon D., Garban B. & Chestérikoff A., 1995: Analysis of the distribution of some polycyclic aromatic hydrocarbons in sediments and suspended matter in the river Seine (France). *Water Air and Soil Pollution* **81**, 135-152.
- 50 Paode R.D. & Holsen T.M., 1996: Standard Operating Procedure for Dry Deposition Sampling – Dry Deposition of Atmospheric Particles, Illinois Institute of Technology, Revision 2.
- 51 Règlement (UE) N°1259/2011 de la commission du 2 décembre 2011, Journal Officiel de l'Union Européenne  
<http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2011:320:0018:0023:FR:PDF>
- 52 Steinberg C., Kalbfus W., Maier M. & Traer K., 1989: Evidence of deposition of atmospheric pollutants in a remote high alpine lake in Austria, *Z. Wasser-Abwasser Forsch.*, **22**, 245-248.
- 53 Totten L.A., Eisenreich Steven J., Brunciak Paul A., 2002: Evidence for destruction of PCBs by the OH radical in urban atmospheres, *Chemosphere* **47(7)**, 735-746.
- 54 U.S. Department of Health & Human Services, 2000: Toxicological profile for polychlorinated biphenyls (PCBs), Public Health Service, Agency for Toxic Substances & Diseases Registry **Chapter 6**, 477-593.  
<http://www.atsdr.cdc.gov/toxprofiles/tp17.pdf>
- 55 U.S. Environmental Protection Agency, 2001: Frequently Asked Question about Atmospheric Deposition, Office of Wetlands, Oceans, and Watersheds, Office of Air Quality Planning and Standards, EPA-453/R-01-009.  
[http://epa.gov/owow/airdeposition/airdep\\_sept\\_final.pdf](http://epa.gov/owow/airdeposition/airdep_sept_final.pdf)

- 56 U.S. Environmental Protection Agency, 2003: Non-dioxin-like PCBs: Effects & consideration in ecological risk assessment, Ecological Risk Assessment Support Center, Office of R&D, ERASC-003.  
<http://www.epa.gov/oswer/riskassessment/pdf/1340-erasc-003.pdf>
- 57 U.S. Environmental Protection Agency, 2007: Survey of New Findings in Scientific Literature Related to Atmospheric Deposition to the Great Waters: Polychlorinated Biphenyls (PCB), EPA-452/R-07-012.
- 58 U.S. Environmental Protection Agency, 2010: Recommended Toxicity Equivalence Factors (TEFs) for Human Health Risk Assessments of 2,3,7,8-Tetrachlorodibenzo-p-dioxin and Dioxin-Like Compounds, EPA/100/R-10/005.  
<http://www2.epa.gov/sites/production/files/2013-09/documents/tefs-for-dioxin-epa-00-r-10-005-final.pdf>
- 59 Van Caneghem J., Block C., Vandecasteele C., 2014: Destruction and formation of dioxin-like PCBs in dedicated full scale waste incinerators, *Chemosphere* **94**, 42-47.
- 60 Van den Berg M., Birnbaum L. S., Denison M., De Vito M., Farland W., Feeley M., et al., 2006: The 2005 World Health Organization reevaluation of human and mammalian toxic equivalency factors for dioxins and dioxin-like compounds. *Toxicol. Sci.* **93**, 223–241.  
<http://toxsci.oxfordjournals.org/content/93/2/223.full.pdf>
- 61 Van Gerven T., Geysen D., and Vandecasteele C., 2004: Estimation of the contribution of a municipal waste incinerator to the overall emission and human intake of PCBs in Wilrijk, Flanders, *Chemosphere* **54**, 1303–1308.
- 62 Van Ry D., Gigliotti C.L., Glenn T.R., IV, Nelson E.D., Totten L.A., & Eisenreich S.J., 2002: Wet deposition of polychlorinated biphenyls in urban and background areas of the Mid-Atlantic States, *Environ. Sci. Technol.* **36(15)**, 3201-3209.
- 63 Wania F., & Mackay D., 1996: Tracking the Distribution of Persistent Organic Pollutants, *Environ. Sci. Technol.* **30(9)**, 390-396.
- 64 World Health Organization, 2000: Air Quality Guidelines for Europe Second Edition. Copenhagen, WHO Regional Publications.