



**EHESP**

---

**Ingénieur du Génie Sanitaire**

Promotion : **2010 - 2011**

---

**PERSAN : PROJET D'ÉVALUATION DES RISQUES SANITAIRES**

**EVALUATION DES RISQUES SANITAIRES ENCOURUS PAR LES PRIMO-  
INTERVENANTS DANS LE CADRE D'UNE INTERVENTION SUR NAVIRE EN  
FEU SANS DEVERSEMENT D'HYDROCARBURES**

---

**Pierre CHABAUD  
Sabrina MEKHOUS  
Ombeline TRIAU**

---

# Remerciements

---

Nous tenons à remercier Monsieur Jean-Ulrich MULLOT pour sa grande disponibilité, et pour avoir pris le temps de répondre à nos questions.

Nous remercions également Monsieur Eric GUILLAUME, auteur du rapport du Laboratoire National de métrologie et d'Essais « Effets du feu sur les personnes » pour son aide précieuse.

Enfin, nous adressons nos remerciements à Messieurs Philippe GLORENNEC et Olivier BLANCHARD pour leurs conseils.

---

# Sommaire

---

<b>Introduction</b> .....	<b>- 2 -</b>
<b>1 Contexte de l'étude</b> .....	<b>3</b>
<b>2 Identification des polluants traceurs et caractérisation de l'exposition</b> .....	<b>5</b>
2.1 Recensement des substances toxiques présentes dans les fumées d'incendie de navire .....	5
2.1.1 Méthode mise en œuvre .....	5
2.1.2 Présentation des polluants identifiés dans les fumées d'incendie .....	6
2.2 Hiérarchisation et critères d'inclusion des polluants dans l'étude d'évaluation des risques sanitaires.....	6
2.2.1 Démarche adoptée.....	6
2.2.2 Synthèse des données.....	14
2.2.3 Justification du choix des VTR .....	22
2.3 Evaluation semi-quantitative des risques sanitaires et sélection des polluants traceurs.....	30
<b>3 Méthodes d'échantillonnage et de mesure</b> .....	<b>35</b>
3.1 Détermination des méthodes .....	35
3.2 Limites des méthodes .....	36
<b>4 Intérêts et limites de l'étude</b> .....	<b>- 42 -</b>
<b>Conclusion</b> .....	<b>- 45 -</b>
<b>Bibliographie</b> .....	<b>I</b>

---

## Liste des sigles utilisés

---

<b>ATSDR</b>	Agency for Toxic Substances and Disease Registry
<b>Cal/EPA</b>	Californian Environmental Protection Agency
<b>COV</b>	Composé Organique Volatil
<b>CVM</b>	Chlorure de Vinyle Monomère
<b>ERU</b>	Excès de Risque Unitaire
<b>ERI</b>	Excès de Risque Individuel
<b>GT</b>	Groupe de Travail
<b>HAP</b>	Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques
<b>IARC</b>	International Agency for Research on Cancer
<b>INERIS</b>	Institut National de l'Environnement industriel et des Risques
<b>INRS</b>	Institut National de Recherche et de Sécurité
<b>LNE</b>	Laboratoire National de métrologie et d'Essais
<b>NTP</b>	National Toxicology Program
<b>OEHHA</b>	Office of Environmental Health Hazard Assessment
<b>OMI</b>	Organisation Maritime Internationale
<b>OMS</b>	Organisation Mondiale de la Santé
<b>QD</b>	Quotient de Danger
<b>RIVM</b>	National Institute for Public Health and the Environment
<b>US EPA</b>	United States Environmental Protection Agency
<b>VTR</b>	Valeur Toxique de Référence

---

## Liste des tableaux

---

Tableau 1 : Liste et origine des substances chimiques toxiques retrouvées dans les fumées d'incendie .....	8
Tableau 2 : Valeurs toxicologiques de référence (avec et sans seuils d'effet) pour les polluants sélectionnés et effets sanitaires critiques associés.....	15
Tableau 3 : Justifications des choix de VTR avec et sans seuils d'effet pour les substances chimiques sélectionnées .....	23
Tableau 4 : Classification des substances avec seuil d'effet pour une exposition chronique par inhalation après calcul du ratio « concentration dans l'air/VTR ».....	33
Tableau 5 : Classification des substances sans seuil d'effet pour une exposition chronique par inhalation après calcul du ratio « concentration dans l'air x VTR ».....	34
Tableau 6 : Récapitulatif des méthodes d'échantillonnage et de mesure .....	- 39 -

## Introduction

Evaluer les risques sanitaires encourus par les primo-intervenants lors d'un incendie de navire est un enjeu d'importance. En effet, les fumées issues de la combustion accidentelle de bâtiments navals sont souvent chargées de substances chimiques pouvant présenter un risque pour les équipes d'intervention. Ainsi, la rareté de ces événements et l'état d'urgence qu'ils requièrent ne favorisent pas la mise en place de projets ayant pour objectif d'évaluer les risques dus à ces substances<sup>1</sup>.

Le travail mis en avant dans ce rapport a pour but de faire un état des lieux des substances chimiques susceptibles de provoquer des effets sur la santé et d'évaluer le risque sanitaire lié à ces composés en quantifiant l'exposition des primo-intervenants afin d'évaluer les risques encourus. En effet, l'objectif de cette étude n'est pas de quantifier l'exposition aiguë massive des pompiers aux fumées de combustion accidentelle comme pourraient l'être les habitants bloqués dans les structures, mais d'analyser les risques d'exposition des personnes peu protégées aux alentours du sinistre. Toute la difficulté de ce travail sera de sélectionner des substances chimiques de manière pertinente.

La finalité d'un travail comme celui-ci sera d'avoir les outils et les données bibliographiques pour mesurer les expositions afin de pouvoir engager une évaluation quantitative des risques sanitaires (EQRS) et pouvoir faire des recommandations à propos de moyens de prélèvements et d'analyses pour une meilleure gestion des expositions à ces composés.

Cette étude est l'objet d'une commande du Laboratoire d'Analyses de Surveillance et d'Expertise de la Marine (LASEM), basé à Toulon, qui pourra éventuellement utiliser les résultats pour mettre en place des méthodes de prévention secondaire (suivi médical, traitement particulier,...).

# 1 Contexte de l'étude

D'après les statistiques des pompiers<sup>2</sup>, plus de 400 personnes sont décédées lors d'incendies en 1999 en France. Les feux de véhicules sont la deuxième cause de décès après les incendies domestiques.

Concernant les causes de décès et d'incapacitations dus à ces sinistres, des études anglo-saxonnes mettent en avant l'inhalation des fumées comme première cause de décès (environ 70 %), suivie des brûlures (autour de 25-30 %) <sup>3,4</sup>. La fumée est donc l'un des facteurs les plus problématiques lors d'incendies.

Ce travail a pour objectif d'étudier l'impact de substances chimiques sur les primo-intervenants lors de feux de navires ; le principal pourvoyeur de composés potentiellement toxiques sera la fumée. L'inhalation est donc la voie d'exposition à prioriser. L'exposition par voie cutanée ne présente qu'un risque limité. En effet, le contact direct des fumées sur la peau ne se fera qu'au niveau du visage et des mains pour les primo-intervenants les moins équipés. Un passage cutané sera néanmoins possible, mais ce travail s'intéressera seulement à l'inhalation de composés toxiques.

Plusieurs scénarios d'exposition pourraient être envisagés dans l'évaluation des risques sanitaires liés à l'incendie d'un navire. Néanmoins, il sera choisi de ne retenir qu'un seul scénario d'exposition sachant que le manque de données bibliographiques relatant de situations similaires passées constitue un obstacle majeur à la réalisation d'une évaluation quantitative des risques sanitaires. Afin d'être le plus proche des différents scénarios possibles, il sera considéré que l'incendie a lieu sur un navire type « ferry », essentiellement composé de métaux (fer), matières plastiques, composites, polymères et éléments d'ameublement, qui regroupe ainsi une majorité de substances qui pourraient se retrouver sur différents types de navires. Cependant, le but de cette étude n'est pas de s'intéresser à un chimiquier ou un pétrolier. Ainsi, les produits transportés sont classiques telles que de l'eau, de l'essence, de la nourriture et de l'ameublement.

Concernant les conditions météorologiques de l'intervention, un scénario le plus défavorable limitant la dispersion des polluants de la fumée (beau temps et absence de vent) sera envisagé.

Il sera également admis que le navire en feu est au large. Ainsi, les primo-intervenants arrivent sur les lieux via un remorqueur qui restera aux abords du navire en feu. Ceux-ci ne disposent d'aucun appareil de protection respiratoire autonome ou de combinaison de

protection spécifique. L'intérêt de considérer ces primo-intervenants réside, d'une part, dans le fait qu'il pourrait s'agir d'un effectif relativement élevé, et d'autre part, que ces personnes seraient potentiellement plus exposées que les pompiers présents sur le même site, en raison de l'inadéquation de leurs tenues de travail. C'est pourquoi il est indispensable de s'intéresser à leurs expositions et de les évaluer au plus près de la situation réelle.



## **2 Identification des polluants traceurs et caractérisation de l'exposition**

### **2.1 Recensement des substances toxiques présentes dans les fumées d'incendie de navire**

#### **2.1.1 Méthode mise en œuvre**

La première étape de la démarche a été de dresser une liste, la plus exhaustive possible, des substances chimiques présentes dans les fumées de l'incendie de ferry. Une recherche bibliographique a permis de mettre en avant les principaux toxiques probablement présents dans les fumées d'incendie. Néanmoins, il convient d'apporter des précisions sur les sources et les modalités de sélections des substances de cette liste. En effet, il est difficile d'accéder à des données précises de compositions de fumées d'incendie de navire. Ceci peut s'expliquer par l'urgence que nécessitent des interventions comme celles-ci, les mesures de toxiques n'étant ni la priorité, ni la compétence des primo-intervenants.

De nombreuses substances sont recensées dans un rapport publié par le Laboratoire National de métrologie et d'Essais<sup>5</sup> (LNE). Plusieurs normes<sup>108,109</sup> ont permis d'établir une première base de composés particulièrement présents dans les fumées d'incendies. Ces données ne sont pas exhaustives. Ainsi, seules ces substances ont été recherchées ; il ne s'agit donc pas d'un spectre complet des toxiques présents dans les vapeurs. Des études concernant les feux domestiques<sup>6</sup> ont également été prises en compte. Dans une première approche, le groupe de travail (GT) a considéré que ce type d'accident se rapprochait du contexte "ferry". En effet, beaucoup d'éléments présents dans les lieux domestiques peuvent se retrouver à bord de bateaux de croisière. Cependant, il existe de nombreux matériaux et composés spécifiques aux navires, notamment le fioul de propulsion. Plusieurs études et campagnes de mesures ont mis en avant les substances rejetées lors d'incendies de ce type d'hydrocarbures<sup>7</sup>. Enfin, la norme STANAG 4602 AFAP3<sup>5</sup> vise à évaluer le potentiel toxique des fumées des matériaux d'aménagement du domaine naval militaire. Les composés présentés dans ce texte doivent également être pris en compte. En effet, les bâtiments militaires navals se rapprochent d'un ferry, notamment par leur structure et par l'utilisation de peintures et de solvants.

### **2.1.2 Présentation des polluants identifiés dans les fumées d'incendie**

La confrontation de ces différentes études et normes a permis de dégager une liste de 72 composés susceptibles de présenter un risque pour les primo-intervenants.

Le *tableau 1* présente chacune des substances recensées en précisant notamment son origine, c'est-à-dire le type de matériau dont elle est le constituant et/ou si elle a été retrouvée dans la fumée de combustion d'un matériau donné. Ce type d'information permet de déterminer si la substance est spécifique ou non à notre cas, c'est-à-dire l'incendie d'un ferry.

## **2.2 Hiérarchisation et critères d'inclusion des polluants dans l'étude d'évaluation des risques sanitaires**

### **2.2.1 Démarche adoptée**

Pour chacune des substances recensées, des valeurs toxicologiques de référence (VTR) avec et sans seuil ont été recherchées. Comme il l'a été précisé précédemment, seule l'exposition par inhalation sera prise en compte. De plus, l'exposition est de type « subchronique » ou « chronique », car un primo-intervenant passe en moyenne quinze à vingt ans sur le terrain et les polluants recensés se rapprochent de ceux retrouvés dans un incendie domestique, très fréquent en France (un incendie toutes les deux minutes<sup>11</sup>).

Il a d'abord été choisi de consulter les fiches INERIS (Institut National de l'Environnement industriel et des RISques) qui synthétisent les données de plusieurs bases internationales de toxicologie (les substances concernées sont repérées par un astérisque dans le *tableau 2*). Ces fiches présentent en première approche les VTR publiées par l'ATSDR (Agency of Toxic Substances and Disease Registry), l'US EPA (United States Environmental Protection Agency) et l'OMS (Organisation Mondiale de la Santé). En seconde approche, les VTR publiées par d'autres organismes, notamment, Santé Canada, le RIVM (National Institute for Public Health and the Environment) et l'OEHHA (Office of Environmental Health Hazard Assessment), ont pu être retenues pour la discussion en cas d'existence de valeurs (VTR). Lorsque les fiches INERIS n'étaient pas disponibles, les VTR de l'OEHHA, l'ATSDR, l'US EPA et l'OMS, recherchées séparément, ont été comparées. La base de données FURETOX a également été consultée. En ce qui concerne le dipropylène glycol monobutyl ether, une VTR a été trouvée sur le site de Californian Environmental Protection Agency

(Cal/EPA). Pour chaque substance, la justification du choix de la VTR est précisée dans ce rapport dans le *tableau 3*.

**Tableau 1 : Liste et origine des substances chimiques toxiques retrouvées dans les fumées d'incendie**

Famille chimique	Nom de la substance	Formule brute	N°CAS	Origine de la substance
Oxydes de carbone	Dioxyde de carbone <sup>5,6,8,9</sup>	CO <sub>2</sub>	124-38-9	Lors de tous les processus de combustion
	Monoxyde de carbone <sup>5,6,8,9</sup>	CO	630-08-0	Lors de combustions incomplètes
	Suboxyde de carbone <sup>6</sup>	C <sub>3</sub> O <sub>2</sub>	504-64-3	ND
	Anhydride mellitique <sup>6</sup>	C <sub>12</sub> O <sub>9</sub>	4253-24-1	
	Monoxyde de tricarbon <sup>6</sup>	C <sub>3</sub> O	ND	
	Tétoxyde de carbone <sup>6</sup>	CO <sub>4</sub>	ND	
Cyanures	Cyanure de sodium <sup>6</sup>	NaCN	143-33-9	Combustion de polyuréthanes, d'acrylonitriles, de polyamides, de bois et de papier lors d'incendies
	Cyanure de potassium <sup>6</sup>	KCN	151-50-8	
	Cyanure d'hydrogène <sup>5,6,8,9</sup>	HCN	74-90-8	Combustion de tous les matériaux azotés, naturels (laine, bois,...) ou artificiels (mélamines, polyamides,...)
COV	Benzène <sup>5-7</sup>	C <sub>6</sub> H <sub>6</sub>	71-43-2	Combustion de résines, mousses phénoliques, polystyrène par exemple
	Trichloroéthylène <sup>6</sup>	C <sub>2</sub> HCl <sub>3</sub>	79-01-6	Solvant utilisé pour le dégraissage de pièces métalliques, qui en présence de flamme peut se décomposer en CO, HCl et Cl <sub>2</sub>
	Tétrachloroéthylène <sup>6</sup>	C <sub>2</sub> Cl <sub>4</sub>	127-18-4	Solvant utilisé pour le dégraissage de pièces métalliques
	Ethylbenzène <sup>6,7</sup>	C <sub>8</sub> H <sub>10</sub>	100-41-4	Solvant dans les peintures

Famille chimique	Nom de la substance	Formule brute	N°CAS	Origine de la substance
COV	<b>Styrène</b> <sup>5,6</sup>	C <sub>6</sub> H <sub>5</sub> CHCH <sub>2</sub>	100-42-5	<i>Combustion de résines, mousses phénoliques, polystyrène par exemple</i>
	<b>Toluène</b> <sup>5-7</sup>	C <sub>6</sub> H <sub>5</sub> CH <sub>3</sub>	108-88-3	
	<b>Xylènes</b> <sup>7</sup>	C <sub>8</sub> H <sub>10</sub>	1330-20-7	<i>Solvant très utilisé dans la fabrication de peintures, vernis, colles</i>
	<b>Phénol</b> <sup>5,9</sup>	C <sub>6</sub> H <sub>5</sub> OH	108-95-2	<i>Combustion de résines, mousses phénoliques, polystyrène par exemple</i>
HAP	<b>Benzo(a)pyrène</b> <sup>5,7</sup>	C <sub>20</sub> H <sub>12</sub>	50-32-8	<i>Formation dans la flamme par agrégation des noyaux aromatiques libres</i>
	<b>Dibenz(a,h)anthracène</b> <sup>5,7</sup>	C <sub>22</sub> H <sub>14</sub>	53-70-3	<i>Effluents de combustions incomplètes</i>
	<b>Benzo(a)anthracène</b> <sup>5,7</sup>	C <sub>18</sub> H <sub>12</sub>	56-55-3	<i>Combustion incomplète d'HC ou de charbon</i>
	<b>Benzo(b)fluoranthène</b> <sup>5,7</sup>	C <sub>20</sub> H <sub>12</sub>	205-99-2	
	<b>Benzo(k)fluoranthène</b> <sup>5,7</sup>	C <sub>20</sub> H <sub>12</sub>	207-08-9	
	<b>Chrysène</b> <sup>5,7</sup>	C <sub>18</sub> H <sub>12</sub>	218-01-9	<i>Pyrolyse de graisses ou d'huiles</i>
	<b>Indeno(1,2,3-cd)pyrène</b> <sup>5,7</sup>	C <sub>22</sub> H <sub>12</sub>	193-39-5	<i>Combustion incomplète de carburant utilisé dans les moteurs thermiques (machines, propulsion automobile essence ou Diesel)</i>
	<b>Naphtalène</b> <sup>5-7</sup>	C <sub>10</sub> H <sub>8</sub>	91-20-3	<i>Pyrolyse du chauffage domestique pour les bois</i>

Famille chimique	Nom de la substance	Formule brute	N°CAS	Origine de la substance
Métaux	Arsenic <sup>6</sup>	As	7440-38-2	Combustion de produits fossiles (charbons, pétroles, huiles), contenant un pourcentage important d'arsenic
	Plomb <sup>6</sup>	Pb	7439-92-1	Brûlage de vieilles peintures, rejets véhicules à moteur
Acides minéraux	Chlorure d'hydrogène <sup>5,6,8,9</sup>	HCl	7647-01-0	Combustion de matériaux spécifiques tels que le PVC
	Sulfure d'hydrogène <sup>5,6,8,9</sup>	H <sub>2</sub> S	7783-06-4	Pyrolyse des produits soufrés (tel que le caoutchouc)
	Acide phosphorique <sup>8</sup>	H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>	7664-38-2	Principal gaz de combustion
	Bromure d'hydrogène <sup>5,8,9</sup>	HBr	10035-10-6	Combustion de matériaux spécifiques tels que les matériaux ignifugés au pentabromodiphényle
	Fluorure d'hydrogène <sup>5, 8,9</sup>	HF	7664-39-3	Combustion de certains matériaux naturels (laine) ou synthétiques (PTFE, PVDF, PVF2...)
Chlorophénols	Pentachlorophénol <sup>6</sup>	C <sub>6</sub> HCl <sub>5</sub> O	87-86-5	Utilisé pour la préservation des bois, sauf ceux servant à la fabrication de meubles ou de conteneurs alimentaires
	2,4,6-trichlorophénol <sup>6</sup>	C <sub>6</sub> H <sub>3</sub> Cl <sub>3</sub> O	88-06-2	Incinération de résidus chlorés
	2,4,5-trichlorophénol <sup>6</sup>	C <sub>6</sub> H <sub>3</sub> Cl <sub>3</sub> O	95-95-4	
Organochlorés	Dichlorofluoro-méthane <sup>6</sup>	CHCl <sub>2</sub> F	75-43-4	Agent d'extinction
	Dichlorométhane <sup>6</sup>	CH <sub>2</sub> Cl <sub>2</sub>	75-09-2	Agent moussant pour obtenir la mousse polyuréthane (isolation phonique et thermique, assises de sièges et canapés)
	Trichlorométhane <sup>6</sup>	CHCl <sub>3</sub>	67-66-3	Utilisé pour la fabrication du chlorodifluorométhane destiné à la réfrigération

Famille chimique	Nom de la substance	Formule brute	N°CAS	Origine de la substance
Polychloro-biphényles (PCB)	Tétrachlorodibenzodiphényls (TCDD) <sup>5,6</sup>	C <sub>12</sub> H <sub>4</sub> Cl <sub>4</sub> O <sub>2</sub>	1746-01-6	Majoritairement produites sur les cendres d'incinération lors du refroidissement des fumées. L'acide chlorhydrique et les dérivés métallochlorés comme le chlorure de cuivre en sont les principales sources
	Benzofurane <sup>6</sup>	C <sub>8</sub> H <sub>6</sub> O	271-89-6	Utilisé pour la production de peintures et vernis anti-corrosion
	Furane <sup>6</sup>	C <sub>4</sub> H <sub>4</sub> O	110-00-9	Emis lors de l'incinération de PCB
Oxydes d'azote	Monoxyde d'azote <sup>5,6,8,9</sup>	NO	10102-43-9	Formés lors d'incendies de matières azotés ; combustion des combustibles fossiles (charbon, fioul, gaz naturel)
	Dioxyde d'azote <sup>5,6,8,9</sup>	NO <sub>2</sub>	10102-44-0	
	Protoxyde d'azote <sup>5,6,8,9</sup>	N <sub>2</sub> O	10024-97-2	Combustion de matériaux azotés
	Tétraoxyde de diazote <sup>5,6,9</sup>	N <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	10544-72-6	
	Trioxyde de diazote <sup>5,6,9</sup>	N <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	10544-73-7	
	Nitrate <sup>5,9</sup>	NO <sub>3</sub>	84145-82-4	
	Pentaoxyde de diazote <sup>5,9</sup>	N <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	10102-03-1	
Aldéhydes	Formaldéhyde <sup>5,6,8,9</sup>	CH <sub>2</sub> O	50-00-0	Combustion de panneaux de bois agglomérés à la résine formaldéhyde
	Acétaldéhyde <sup>5</sup>	CH <sub>3</sub> CHO	75-07-0	Combustion de résines formo-phénoliques
	Acroléine <sup>5,8,9</sup>	C <sub>3</sub> H <sub>4</sub> O	107-02-8	

Famille chimique	Nom de la substance	Formule brute	N°CAS	Origine de la substance
Acide carboxylique	Acide formique <sup>5</sup>	HCOOH	64-18-6	<i>Résines formo-phénoliques par exemple (isolant électrique pour téléphone, appareils électroménagers)</i>
	Acide acétique <sup>5</sup>	CH <sub>3</sub> COOH	64-19-7	
Particules	PM <sub>2,5</sub> <sup>6,7</sup>			<i>Combustion du carburant</i>
	PM <sub>10</sub> <sup>6,7</sup>			
Autres	Chlorure de vinyle <sup>6</sup>	C <sub>2</sub> H <sub>3</sub> Cl	75-01-4	<i>Pyrolyse du dichloroéthylène</i>
	Phosgène <sup>5,9</sup>	CO(Cl <sub>2</sub> )	75-44-5	<i>Parfois dans feux de matériaux chlorés</i>
	Difluorocarbonyle <sup>5</sup>	COF <sub>2</sub>	353-50-4	<i>Combustion d'une matrice ne contenant pas d'hydrogène (PTFE par exemple)</i>
	Dioxyde de soufre <sup>5,8,9</sup>	SO <sub>2</sub>	7446-09-5	<i>Combustion des combustibles fossiles</i>
	Disulfure de carbone <sup>5</sup>	CS <sub>2</sub>	75-15-0	<i>Présent à l'état de traces dans les fumées de combustion</i>
	Thiophène <sup>110</sup>	C <sub>4</sub> H <sub>4</sub> S	110-02-1	<i>Trouvé naturellement dans le pétrole</i>
	Acrylonitrile <sup>5,9</sup>	CH <sub>2</sub> CHCN	107-13-1	<i>Combustion de matières plastiques principalement les copolymères acrylonitrile-styrène (SAN) ou copolymère acrylonitrile-butadiène-styrène (ABS)</i>
	Ammoniac <sup>5,6,8,9</sup>	NH <sub>3</sub>	7664-41-7	<i>Combustion incomplète de matériaux azotés</i>



Famille chimique	Nom de la substance	Formule brute	N°CAS	Origine de la substance
Autres	Oxydes de fer		1309-37-1	Combustion du fer
	Perfluoroisobutène (PFIB) <sup>111</sup>	C <sub>4</sub> F <sub>8</sub>	382-21-8	Pyrolyse du polytétrafluoroéthylène (PTFE)
	Amiante <sup>6</sup>		1332-21-4	Dans le passé, application dans la construction navale comme isolant et résistant au feu, l'industrie des matières plastiques pour l'isolation et le calorifugeage,...
	Butadiène <sup>6</sup>	C <sub>4</sub> H <sub>6</sub>	106-99-0	Combustion de plastiques et de caoutchouc
	2-butoxyéthanol <sup>7</sup>	C <sub>6</sub> H <sub>14</sub> O <sub>2</sub>	111-76-2	Utilisé dans les peintures et solvants dans certaines applications industrielles
	Dipropylène glycol monobutyl éther <sup>7</sup>	C <sub>4</sub> H <sub>9</sub> O(C <sub>3</sub> H <sub>6</sub> O) <sub>2</sub> H	29911-28-2	Evaporation des revêtements contenant cette substance qui est notamment présente dans les solvants
	Silice <sup>7</sup>	Si	1317-95-9	Présente dans l'industrie navale
	Chrome VI <sup>10</sup>	Cr VI	18540-29-9	Pigments des peintures
	Antimoine <sup>7</sup>	Sb	7440-36-0	Combustion du charbon

A l'issue de ces recherches, les substances pour lesquelles aucune VTR n'a été déterminée ont été écartées dans la suite de l'étude en raison d'un manque d'informations. Cependant, cela ne signifie pas qu'elles ne présentent aucun risque pour les primo-intervenants. Elles seront donc à considérer dans des études ultérieures. Le nombre de substances est donc réduit à 45. Le GT précise tout de même que les particules (pour lesquelles seule une valeur guide a été établie) ont été conservées, car il est important de les considérer. Leur effet sur les poumons est lié à l'apparition d'asthme chronique et à la diminution de la capacité chronique. De plus, des cancers peuvent survenir à long terme<sup>5</sup>.

La classification IARC<sup>12</sup> (International Agency for Research on Cancer) a ensuite permis d'associer à une substance son caractère cancérigène (*cf. tableau 2*). Ce tableau met en avant les substances les plus dangereuses à priori (situées en haut du tableau). Cependant, même si les données sur les navires en feu semblent inexistantes, il n'est pas envisageable de se limiter à une évaluation des dangers. Une évaluation des risques, ne serait-ce que semi-quantitative, permettrait tout de même de préciser les polluants qui seraient les plus à risque pour les primo-intervenants. Le scénario qui semble le plus proche au cas incendie de navire est celui d'un incendie domestique et pour lequel des données quantitatives existent. En effet, des éléments d'ameublement, des matières plastiques, des composites se retrouvent dans les deux cas, même s'ils ne sont pas présents dans les mêmes quantités. Enfin, il est possible, dans une première approche, d'associer les cabines du ferry à des appartements. Il faut tout de même être vigilant face à cette première approche. En effet, aucune étude ne prouve la similitude entre ces deux types de feux. De plus, parmi les substances caractéristiques des feux domestiques, les concentrations des composés ne sont pas toutes disponibles. La quantification sera donc limitée à un nombre restreint de substances.

### **2.2.2 Synthèse des données**

Le *tableau 2* montre le nombre important de substances à potentiels toxiques présents dans les fumées et recense les effets critiques de chaque composé sur l'organisme humain ou animal. Le GT a décidé de ne relever que les effets mis en avant par les études utilisées pour la construction des VTR, qu'il s'agisse d'études expérimentales sur l'animal ou d'effets démontrés chez l'Homme. Il est néanmoins important de préciser que d'autres effets différents de ceux indiqués dans le tableau peuvent être imputés à certaines substances. Les fiches toxicologiques de l'INERIS et de l'INRS (Institut National de Recherche et de Sécurité), qui précisent les effets toxicologiques connus ou supposés sur l'être humain, pourront être consultées pour une étude plus approfondie d'un composé et les bases de données scientifiques dans le cadre d'une étude approfondie pour une substance donnée.

**Tableau 2 : Valeurs toxicologiques de référence (avec et sans seuils d'effet) pour les polluants sélectionnés et effets sanitaires critiques associés**

Substances	AVEC SEUIL			SANS SEUIL		
	VTR ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	Référence, année	Effets critiques	ERUi ( $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{-}1$ )	Référence, année	Effets critiques
Formaldéhyde (*)	$4.10^1$	ATSDR, 1999	<i>Irritants muqueuses respiratoire en effet</i> <sup>13</sup>	$6.10^{-6}$	OEHHA, 2008	<i>Carcinome dans les cavités nasales</i> <sup>14</sup>
Benzène (*)	$1,3.10^1$	ATSDR, 1997	<i>Atteintes hémotoxiques effets neurologiques</i> <sup>15</sup>	$6.10^{-6}$	OMS, 2000	<i>Augmentation de l'incidence de leucémies</i> <sup>16</sup>
Benzo(a)pyrène (*)	ND	ND	ND	$8,7.10^{-2}$	OMS, 2000	<i>Cancérogène probable</i> <sup>17</sup>
Arsenic (*)	$1,5.10^{-2}$	OEHHA, 2008	<i>Effets tératogènes : diminution du poids foetal, retards de croissance intra-utérine et malformations osseuses</i> <sup>18</sup>	$4,3.10^{-3}$	US EPA, 1998	<i>Cancers pulmonaires chez des travailleurs</i> <sup>19-21</sup>
Chrome VI (*)	1	ATSDR, 2000	<i>Modifications des niveaux de lactate déshydrogénase dans le liquide de lavage bronchiolo-alvéolaire sur animaux</i> <sup>22,23</sup>	$1,5.10^{-1}$	OEHHA, 2002	<i>Cancer pulmonaire chez l'homme</i> <sup>24</sup>
Amiante	ND	ND	ND	$2,3.10^{-1}$ (fibres/ml) <sub>1</sub>	US EPA, 1993	<i>Cancer du poumon et mésothélium homme</i> <sup>25</sup>
Chlorure de vinyle (*)	$5,6.10^1$	RIVM, 2001	<i>Effets sur les testicules</i> <sup>26</sup>	$1.10^{-6}$	circulaire du MEDD du 2 août 2001	<i>Effets sur le foie (dont tumeurs) travailleurs</i> <sup>27-29</sup>

Classification IARC

Groupe 1

		Substances	AVEC SEUIL			SANS SEUIL		
			VTR (µg/m <sup>3</sup> )	Référence, année	Effets critiques	ERUi (µg/m <sup>3</sup> ) <sup>-1</sup>	Référence, année	Effets critiques
Classification IARC	Groupe 1	Butadiène (*)	2.10 <sup>1</sup>	OEHHA, 2001	Atrophie ovarienne chez les souris <sup>30</sup>	3.10 <sup>-5</sup>	US EPA, 2002	Leucémies chez travailleurs <sup>31</sup>
		2,3,7,8 TCDD (dioxines) (*)	ND	ND	ND	38	OEHHA, 2003	Augmentation de l'incidence de cancers hépatiques (adénomes et carcinomes) chez les souris mâles (après gavage) <sup>32</sup>
		Silice	3	OEHHA, 2005	Silicose sur des mineurs <sup>33</sup>	ND	ND	ND
	Groupe 2A	Trichloroéthylène (*)	5,4.10 <sup>2</sup>	ATSDR, 1997	Effets neurologiques <sup>34</sup>	4,3.10 <sup>-7</sup>	OMS, 2000	Augmentation de l'incidence myélome lymphome <sup>35</sup> .
		Tétrachloroéthylène (*)	2.10 <sup>2</sup>	OMS, 2006	Effets neurologiques <sup>36</sup>	2.10 <sup>-6</sup>	US EPA, 2008	Augmentation de l'incidence des leucémies <sup>37</sup>
		Dibenzo(a,h)anthracène (*)	ND	ND	ND	1,2.10 <sup>-3</sup>	OEHHA, 2002	Carcinomes alvéolaires chez les mâles souris <sup>38</sup>
		Plomb (*)	ND	ND	ND	1,2.10 <sup>-5</sup>	OEHHA, 2002	Tumeurs dont rénales chez les rats <sup>39</sup>

Substances	AVEC SEUIL			SANS SEUIL		
	VTR ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	Référence, année	Effets critiques	ERUi ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) <sup>-1</sup>	Référence, année	Effets critiques
Acétaldéhyde (*)	9	US EPA, 1991	Dégénérescence des cellules olfactives <sup>40,41</sup>	2,2.10 <sup>-6</sup>	US EPA, 1991	Augmentation de l'incidence des cancers <sup>42</sup>
Ethylbenzène (*)	4,35.10 <sup>3</sup>	ATSDR, 1999	Effets toxiques sur le foie et les reins <sup>43</sup>	2,5.10 <sup>-6</sup>	OEHHA, 2007	Augmentation de l'incidence des cancers <sup>44</sup>
Styrène (*)	1.10 <sup>3</sup>	US EPA, 1993	Effets sur le système nerveux central <sup>45</sup>	ND	ND	ND
Benzo(b)fluoranthène (*)	ND	ND	ND	1,1.10 <sup>-4</sup>	OEHHA, 2002	Tumeurs (type non spécifié) du tractus respiratoire supérieur (cavités nasales, larynx et trachée) <sup>46</sup>
Benzo(k)fluoranthène	ND	ND	ND	1,1.10 <sup>-4</sup>	1,10E-04	Tumeurs (type non spécifié) du tractus respiratoire supérieur (cavités nasales, larynx et trachée) <sup>46</sup>
Indeno(1,2,3-cd)pyrène (*)	ND	ND	ND	1,1.10 <sup>-4</sup>	1,10E-04	Tumeurs (type non spécifié) du tractus respiratoire supérieur (cavités nasales, larynx et trachée) <sup>46</sup>
Naphtalène (*)	9	OEHHA, 2003	Lésions nasales (inflammation chronique, métaplasie de l'épithélium olfactif) et pulmonaire (hyperplasie de l'épithélium respiratoire) chez des souris <sup>47</sup>	3,4.10 <sup>-5</sup>	OEHHA, 2005	Adénomes et carcinomes bronchio-alvéolaires chez les souris femelles <sup>47</sup> neuroblastomes de l'épithélium nasal olfactif chez les rats mâles et femelles, adénomes de l'épithélium respiratoire chez les rats femelles <sup>48</sup>

Classification IARC

Groupe 2B

	Substances	AVEC SEUIL			SANS SEUIL		
		VTR (µg/m <sup>3</sup> )	Référence, année	Effets critiques	ERUi (µg/m <sup>3</sup> ) <sup>-1</sup>	Référence, année	Effets critiques
Classification IARC Groupe 2B	Acrylonitrile	2	US EPA, 1991	Dégénérescence et inflammation de l'épithélium nasal ; hyperplasie des cellules de sécrétion du mucus observés chez le rat <sup>49</sup>	6,8.10 <sup>-5</sup>	US EPA, 1991	Cancer respiratoire (Homme) <sup>50</sup>
	Antimoine (*)	2.10 <sup>-2</sup>	US EPA, 1995	Effets toxiques pulmonaires chez les rats <sup>51</sup>	ND	ND	ND
	Pentachlorophénol (*)	ND	ND	ND	4,6.10 <sup>-6</sup>	OEHHA, 2002	Augmentation de l'incidence des tumeurs du foie et des surrénales chez les souris mâles et femelles <sup>52</sup> .
	Dichlorométhane (*)	4.10 <sup>2</sup>	OEHHA, 2003	Etude sur travailleurs: augmentation de la carboxyhémoglobine dans le sang <sup>53</sup>	1.10 <sup>-6</sup>	OEHHA, 2002	Augmentation de l'incidence des tumeurs pulmonaires et hépatique chez la souris <sup>54</sup>
	Trichlorométhane (*)	ND	ND	Hépatite et ictères observés chez des femmes exposées au chloroforme <sup>55</sup>	5,3.10 <sup>-6</sup>	OEHHA, 2002	Carcinomes hépatocellulaires et adénocarcinomes ou carcinomes du tubule rénal chez des rats mâles et des souris femelles et mâles <sup>56-60</sup> .
Groupe 3	Acroléine	2.10 <sup>-2</sup>	US EPA, 1991	Lésion du système respiratoire supérieur et inférieur <sup>61</sup>	ND	ND	ND
	Toluène (*)	3.10 <sup>2</sup>	ATSDR, 2000	Atteinte neurologique, trouble de la vision <sup>62</sup>	ND	ND	ND

		Substances	AVEC SEUIL			SANS SEUIL		
			VTR (µg/m <sup>3</sup> )	Référence, année	Effets critiques	ERUi (µg/m <sup>3</sup> ) <sup>-1</sup>	Référence, année	Effets critiques
Classification IARC	Groupe 3	Xylènes (*)	3,04.10 <sup>3</sup>	ATSDR, 1995	Trouble de la coordination motrice <sup>63</sup>	ND	ND	ND
		Phénol (*)	2.10 <sup>2</sup>	OEHHA, 2003	Effets hépatiques, cardiaques et rénaux <sup>64</sup> .	ND	ND	ND
		2-butoxyethanol	1,6.10 <sup>3</sup>	US EPA, 2010	Dépôt d'hémossidérine dans le foie sur rats et souris <sup>48</sup>	ND	ND	ND
		Chlorure d'hydrogène	9	OEHHA, 2002	Effets sur le système respiratoire: hyperplasie de la muqueuse nasale, du larynx et de la trachée chez des rats <sup>65</sup>	ND	ND	ND
	ND	Sulfure d'hydrogène (*)	3.10 <sup>1</sup>	ATSDR, 2006	Lésions nasales et des muqueuses de l'appareil respiratoire supérieur <sup>66</sup>	ND	ND	ND
		Disulfure de carbone	7.10 <sup>2</sup>	US EPA, 1995	Effets neurologiques <sup>67</sup>	ND	ND	ND
		Monoxyde d'azote (*)	ND	ND	Irritation bronchique chez les asthmatiques <sup>68</sup>	ND	ND	ND

	Substances	AVEC SEUIL			SANS SEUIL		
		VTR (µg/m <sup>3</sup> )	Référence, année	Effets critiques	ERUi (µg/m <sup>3</sup> ) <sup>-1</sup>	Référence, année	Effets critiques
Classification IARC ND	Dioxyde d'azote (*)	4,7.10 <sup>2</sup>	OEHHA, 1999	Irritation bronchique chez les asthmatiques <sup>68</sup>	ND	ND	ND
	Ammoniac (*)	7.10 <sup>1</sup>	ATSDR, 2004	Irritation en aigue, effet pulmonaire (toux, bronchite) <sup>69</sup>	ND	ND	ND
	Acide phosphorique	7	OEHHA, 2000	Fibrose bronchiolaire du tractus respiratoire observés sur le rat <sup>70</sup>	ND	ND	ND
	PM <sub>2,5</sub>	1.10 <sup>1</sup>	OMS, 2005	Maladies cardiovasculaires et respiratoires, cancers pulmonaires (homme) <sup>71</sup>	ND	ND	ND
	PM <sub>10</sub>	1.10 <sup>1</sup>	OMS, 2005	Maladies cardiovasculaires et respiratoires, cancers pulmonaires (homme) <sup>71</sup>	ND	ND	ND
	Dipropylène glycol monobutyl ether	5.10 <sup>1</sup>	Cal/EPA, 2010	Lésions histopathologiques du foie et des muqueuses nasales (rats) <sup>72</sup>	ND	ND	ND
	Cyanure d'hydrogène (*)	3	US EPA, 1994	Organes cibles: système nerveux central et thyroïde <sup>73</sup>	ND	ND	ND



	Substances	AVEC SEUIL			SANS SEUIL		
		VTR (µg/m3)	Référence, année	Effets critiques	ERUi (µg/m <sup>3</sup> ) <sup>-1</sup>	Référence, année	Effets critiques
Classification IARC ND	2,4,6-trichlorophénol (*)	ND	ND	ND	3,1.10 <sup>-6</sup>	US EPA, 1994	Augmentation de l'incidence des leucémies chez des rats mâles <sup>74</sup>
	Fluorure d'hydrogène (*)	1,4.10 <sup>1</sup>	OEHHA, 2003	Système osseux, dents et système respiratoire, fluorose squelettique <sup>75</sup>	ND	ND	ND
	Phosgène	3.10 <sup>-1</sup>	US EPA, 2005	Fibrose du poumon chez le rat <sup>76</sup>	ND	ND	ND

### **2.2.3 Justification du choix des VTR**

Il n'y a pas eu de critère commun à toutes les substances pour le choix des VTR : une étude au cas par cas a été effectuée, le *tableau 3* présente les arguments justifiant du choix de VTR qui a été fait pour chacun des polluants.

**Tableau 3 : Justifications des choix de VTR avec et sans seuils d'effet pour les substances chimiques sélectionnées**

Substances	Justifications des choix	
	VTR avec seuil	VTR sans seuil
<b>Formaldéhyde</b>	L'ATSDR est le seul organisme à proposer une VTR subchronique. En effet l'exposition subchronique convient le mieux au scénario d'exposition. La VTR proposée est de $4 \cdot 10^{-2} \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ <sup>13</sup> .	L'US EPA, santé Canada et l'OEHAA proposent trois VTR, le GT a décidé de retenir la VTR de $6 \cdot 10^{-6} (\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3})^{-1}$ <sup>14</sup> de l'OEHAA car elle est plus récente.
<b>Benzène</b>	L'ATSDR et L'US EPA proposent des VTR, le GT a décidé de retenir la VTR de l'ATSDR subchronique construite à partir de l'étude la plus récente <sup>15</sup> de $0,013 \text{ mg/m}^3$ .	L'US EPA et L'OMS proposent des valeurs, le GT a décidé de retenir la valeur de l'OMS de $6 \cdot 10^{-6} (\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3})^{-1}$ <sup>16</sup> car elle est précise contrairement à celle de l'USEPA et est utilisée dans la directive cadre de l'air ambiant (1997).
<b>Benzo(a)pyrène</b>	ND	L'US EPA et L'OMS proposent deux valeurs, le GT a décidé de retenir celle de l'OMS de $8,7 \cdot 10^{-2} (\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3})^{-1}$ Car elle est récente et a été construite à partir d'une étude chez l'Homme <sup>77</sup> .
<b>Arsenic</b>	Deux organismes proposent des VTR : le RIVM et l'OEHHA. Le premier a construit sa VTR à partir d'un LOAEC de $10 \mu\text{g/m}^3$ pour des cancers du poumon induits par une exposition par voie pulmonaire à l'arsenic trivalent. Cette valeur est tirée d'un document de l'ATSDR (1999), cité par le RIVM, mais sans aucune mention de l'étude source ayant permis d'établir cette valeur <sup>78</sup> . De plus, cette LOAEC de $10 \mu\text{g/m}^3$ n'est pas retrouvée dans le rapport de l'ATSDR (1999). Cette valeur n'est donc pas préconisée du fait de son manque de transparence au niveau de sa construction. L'OEHHA, quant à lui, a établi trois VTR (pour une exposition de 1h, de 8h et chronique) <sup>18</sup> . Le GT décide de retenir la plus contraignante d'entre elles, identique pour une exposition de 8h et une exposition chronique.	La méthode de construction utilisée par Santé Canada pour l'établissement de sa VTR n'est pas décrite en détail. Il est donc préférable de ne pas la retenir <sup>79-81,20</sup> . L'ensemble des données épidémiologiques montre une relation entre la mortalité due aux cancers du poumon et l'exposition à l'arsenic. L'US EPA retient six études réalisées dans des fonderies situées aux Etats-Unis <sup>19,20</sup> et l'OEHHA retient une étude menée sur huit fonderies différentes, localisées aux Etats-Unis (les fonderies étudiées étant souvent les mêmes). La VTR proposée par l'OEHHA est issue de données de huit fonderies, analysées dans la même étude et de la même façon, mais seuls les résultats d'une seule fonderie ont été pris en compte <sup>82</sup> . En ce qui concerne la VTR recommandée par l'US EPA, à partir d'études où des niveaux (élevés, moyens ou faibles) de concentrations d'arsenic ont été mentionnées, des ERU ont été calculés. Une moyenne géométrique a ensuite été réalisée pour déterminer l'excès de risque final. Cette méthode est plus appropriée que celle utilisée par l'OEHHA. Le mécanisme d'action cancérigène de l'arsenic étant controversé, il est conseillé pour l'instant de retenir par précaution une VTR sans seuil pour les effets cancérigènes induits par l'arsenic.

Substances	Justifications des choix	
	VTR avec seuil	VTR sans seuil
<b>Chrome VI</b>	L'ATSDR et l'US EPA proposent tous deux une VTR, chacune basée sur les deux mêmes études <sup>23</sup> . La VTR de l'ATSDR étant beaucoup plus récente que celle de l'US EPA (à savoir 2000 pour la première et 1998 pour la seconde), le GT retiendra la valeur de l'ATSDR.	L'US EPA et l'OEHHA se sont basés sur la même étude <sup>24</sup> ) pour établir leur VTR, mais celle de l'OEHHA est plus récente. L'OMS, quant à elle, s'est basée sur plusieurs études épidémiologiques et a finalement retenu la moyenne géométrique des estimations du risque obtenues pour chaque étude. Au final, le GT retient la valeur la plus contraignante, à savoir celle de l'OEHHA.
<b>Amiante</b>	ND	Seul l'US EPA a proposé une VTR.
<b>Chlorure de vinyle</b>	Trois VTR sont proposées parmi les 6 bases internationales : la VTR de l'US EPA de $1.10^{-1} \text{mg/m}^3$ <sup>83,84</sup> , celle du RIVM de $5,6.10^{-2} \text{mg/m}^3$ (établie à partir de l'étude de Bi <sup>26</sup> ) et celle de l'ATSDR de $7,8.10^{-2} \text{mg/m}^3$ (0,03ppm) (établie à partir de l'étude de Thornton <sup>85</sup> ). La VTR de l'ATSDR a été établie récemment (2006) à partir d'une étude par inhalation pour une exposition subaiguë <sup>85</sup> . La dose critique retenue est une LED10. L'ATSDR n'a pas jugé pertinent d'extrapoler cette valeur pour une exposition chronique. La dérivation subaiguë-chronique n'a donc pas été effectuée. La valeur de l'US EPA, pour une exposition chronique par inhalation a été extrapolée à partir de l'étude par ingestion <sup>83</sup> . L'US EPA a estimé que la substance présentait un mode d'action commun pour les deux voies d'exposition (ingestion et inhalation) à savoir une toxicité hépatique. L'extrapolation voie à voie a donc été réalisée en utilisant les modèles PBPK. Cette VTR a été établie en 2000, à partir des études par ingestion <sup>83</sup> et d'une part mais également à partir d'études chroniques <sup>84</sup> (ingestion) et subchronique <sup>86</sup> (inhalation) d'autre part. Le NOAEC (HEC=Human Equivalent Concentration), calculé grâce au modèle PBPK de Clewell et al <sup>87</sup> , est de $2,5 \text{mg/m}^3$ . Un facteur d'incertitude de 30 a été appliqué (3 pour la variation interspèces et 10 pour la variation intraespèces). La confiance en cette valeur est donc limitée du fait de l'extrapolation voie à voie réalisée : une étude par ingestion est utilisée pour l'élaboration de la VTR par inhalation. Enfin, la VTR du RIVM a été établie à partir de l'étude chronique par inhalation de Bi et al 1985 à partir du NOAEC extrapolée pour une exposition continue, en tenant compte des facteurs intraespèces et interspèces. L'effet critique retenu est l'effet sur les testicules. Cette VTR est la seule proposée parmi les bases consultées pour une exposition chronique par inhalation. La valeur du RIVM apparaît donc plus pertinente pour les effets à seuil par inhalation.	Trois VTR sont proposées par les 6 bases internationales : la VTR de l'US EPA, celle du RIVM et celle de l'OEHHA. Le RIVM et l'US EPA se basent sur les mêmes études pour élaborer leur VTR <sup>88,89</sup> . L'OEHHA s'appuie sur des études expérimentales complémentaires et sur une étude épidémiologique <sup>90</sup> . La valeur de l'OEHHA apparaît donc comme plus pertinente. Mais une valeur complémentaire est proposée par la circulaire française du 02/08/2001 relative aux installations classées mettant en oeuvre le chlorure de vinyle monomère (CVM), conformément aux conclusions de la réunion d'experts organisée par la Direction de la Prévention des Pollutions et des Risques du 1/06/2001. Cette circulaire donne un niveau de concentration de CVM susceptible d'entraîner un excès de risque de $10^{-5}$ , égal à $10 \mu\text{g/m}^3$ à partir de la valeur guide de l'OMS <sup>27-29</sup> . Cette valeur réglementaire est jugée pertinente et est donc retenue.

Substances	Justifications des choix	
	VTR avec seuil	VTR sans seuil
<b>Butadiène</b>	L'US EPA et l'OEHHA ont tous deux proposés des VTR et se sont basés sur la même étude <sup>30</sup> . Cependant, l'étude de l'US EPA est plus incertaine que celle de l'OEHHA (facteur d'incertitude respectivement de 1000 et 30). La VTR établie par l'OEHHA est donc retenue.	Des VTR sont proposées par l'US EPA, Santé Canada et l'OEHHA. L'étude de l'OEHHA <sup>91</sup> a été réalisée sur des souris contrairement aux deux autres faites sur l'homme. La VTR établie par Santé Canada <sup>31</sup> est une $CT_{0,01}$ correspondant à la concentration de 1,3-butadiène associée à une augmentation de 1% de l'incidence de la mortalité due à la leucémie et celle établie par l'US EPA <sup>31</sup> est un ERU. Dans le cas de notre étude, il est plus judicieux de retenir la valeur de l'US EPA, qui sera plus facilement comparable aux VTR obtenues pour les autres substances.
<b>2,3,7,8 TCDD (dioxines)</b>	ND	Une seule VTR a été proposée par l'OEHHA (2003) : $ERU_i = 38 (\mu\text{g}/\text{m}^3)^{-1}$ . Pour l'établir, l'OEHHA s'est basée sur deux études de cancérogénèse chez le rat <sup>32,92</sup> .
<b>Silice</b>	Seul l'OEHHA propose une VTR.	ND
<b>Trichloroéthylène</b>	Seule l'ATSDR propose des VTR pour l'inhalation subchronique de $0,54\text{g}/\text{m}^3$ <sup>34</sup> .	Une seule valeur proposée par l'OMS de $ERU_i = 4,3 \cdot 10^{-7} (\mu\text{g}/\text{m}^3)^{-1}$ <sup>35</sup> .
<b>Tétrachloroéthylène</b>	L'ATSDR, l'US EPA et l'OMS proposent des VTR. Le GT a décidé de retenir la VTR de l'OMS de $0,2 \text{ mg}/\text{m}^3$ car basée sur une étude épidémiologique de 101 employés <sup>36</sup> , contrairement à l'ATSDR qui s'appuie sur une étude étudiant les effets de la substance sur des femmes enceintes <sup>93</sup> .	Seule l'US EPA propose une valeur de $2 \cdot 10^{-6} (\mu\text{g}/\text{m}^3)^{-1}$ basée sur une étude sur le rat <sup>37</sup> .
<b>Dibenzo(a,h)-anthracène</b>	ND	L'ATSDR, l'US EPA et l'OMS n'ont pas déterminé de VTR. L'OEHHA propose un $ERU_i$ de $1,2 \cdot 10^{-3} (\mu\text{g}/\text{m}^3)^{-1}$ pour une exposition par inhalation.
<b>Plomb</b>	ND	Seul l'OEHHA propose une VTR.
<b>Acétaldéhyde</b>	Seule l'US EPA propose une VTR subchronique de $9 \mu\text{g}/\text{m}^3$ basée sur une Etude chez le rat <sup>40</sup> .	Seule l'US EPA propose une VTR de $2,2 \cdot 10^{-6} (\mu\text{g}/\text{m}^3)^{-1}$ basée sur une Etude chez le rat <sup>42</sup> .

Substances	Justifications des choix	
	VTR avec seuil	VTR sans seuil
<b>Ethylbenzène</b>	L'USEPA et l'ATSDR proposent deux VTR pour l'inhalation, le GT A décidé de conserver la VTR de l'ATSDR de 4,35 mg/m <sup>3</sup> car il considère que le choix des facteurs d'incertitudes est plus approprié dans la construction de la VTR par l'ATSDR a basée sur une étude effectuée chez les rongeurs <sup>43</sup> .	Seule l'OEHHA a proposé une VTR pour l'éthylbenzène basée sur une étude sur le rat <sup>44</sup> .
<b>Styrène</b>	L'ATSDR et L'US EPA proposent une VTR inhalation chronique, le GT A décidé de ne retenir que la VTR proposée par l'USEPA, la VTR étant Basée sur une étude sur l'homme <sup>45</sup> plus récente que celle de l'ATSDR <sup>94</sup> .	ND
<b>Benzo(b)-fluoranthène</b>	ND	L'ATSDR, l'US EPA et l'OMS n'ont pas déterminé de VTR. L'OEHHA propose un ERUi de 1,1E-04 (µg/m <sup>3</sup> ) <sup>-1</sup> pour une exposition par inhalation. Cette valeur dérive d'un ERU du benzo(a)pyrène qui est de 1,1.E-03 (µg/m <sup>3</sup> ) <sup>-1</sup> pour la voie respiratoire, sachant que le benzo(a)pyrène a été affecté d'un facteur d'équivalence de 0,1.
<b>Benzo(k)-fluoranthène</b>	ND	
<b>Indeno(1,2,3-cd)pyrène</b>	ND	L'ATSDR, l'US EPA et l'OMS n'ont pas déterminé de VTR. L'OEHHA propose un ERUi de 1,1E-04 (µg/m <sup>3</sup> ) <sup>-1</sup> pour une exposition par inhalation. Cette valeur dérive d'un ERU du benzo(a)pyrène qui est de 1,1.E-03 (µg/m <sup>3</sup> ) <sup>-1</sup> pour la voie respiratoire, sachant que le benzo(a)pyrène a été affecté d'un facteur d'équivalence de 0,1.
<b>Naphtalène</b>	L'ATSDR, l'US EPA et l'OEHHA proposent chacun une VTR construite à partir d'une étude réalisée sur les souris. Le GT retient la VTR qui est à la fois la plus récente et la plus contraignante, à savoir celle de l'OEHHA.	Seul l'OEHHA propose une VTR.
<b>Acrylonitrile</b>	L'OMS ne propose pas de VTR. L'US EPA propose une RfC à 2E-03 mg/m <sup>3</sup> après une étude faite sur les rats lors d'une exposition chronique <sup>49</sup> . L'ATSDR propose une MRL de 0,01ppm pour une exposition aiguë <sup>95</sup> , mais aucune précision sur l'étude n'a été trouvée. Cette VTR est donc écartée. L'OEHHA propose un REL de 5µg/m <sup>3</sup> (2ppb) basée sur la même étude que celle utilisée par l'US EPA <sup>49</sup> . Le GT retient la VTR la plus contraignante, à savoir celle de l'US EPA.	ND

Substances	Justifications des choix	
	VTR avec seuil	VTR sans seuil
<b>Ethylbenzène</b>	L'US EPA et l'ATSDR proposent deux VTR pour l'inhalation, le GT A décidé de conserver la VTR de l'ATSDR de $4.35 \text{ mg/m}^3$ car il considère que le choix des facteurs incertitudes est plus approprié dans la construction de la VTR par l'ATSDR a basée sur une étude effectuée chez les rongeurs <sup>43</sup> .	Seule l'OEHA a proposé une VTR pour l'éthylbenzène basée sur une étude sur le rat <sup>44</sup> .
<b>Antimoine</b>	Seule l'US EPA a proposé une VTR.	ND
<b>Pentachloro-phénol</b>	ND	Seule l'OEHA a proposé une VTR de $4.6.10^{-6} (\mu\text{g/m}^3)^{-1}$ basée sur une étude de cancérogénèse sur la souris <sup>52</sup> .
<b>Dichlorométhane</b>	L'ATSDR, l'OMS et l'OEHA proposent des VTR avec seuil pour le dichlorométhane. La valeur de l'ATSDR ayant été établie suite à une étude expérimentale chez le rat, le GT ne l'a pas sélectionnée. Les deux VTR de l'OMS et de l'OEHA ont été construites à partir de la même étude, réalisée dans le milieu professionnel sur des travailleurs <sup>53</sup> . Le GT a choisi de retenir la valeur de l'OEHA (2003) : REL = $0,4 \mu\text{g/m}^3$ car cette dernière est plus récente et plus contraignante.	L'US EPA, l'OEHA et Santé Canada proposent des VTR sans seuil pour le dichlorométhane. La VTR établie par Santé Canada n'a pas été sélectionnée puisqu'il s'agit de la valeur la moins récente. Les VTR de l'US EPA et de l'OEHA ont été construites à partir d'une même étude de cancérogénèse chez des rats et des souris <sup>54</sup> . Le GT a choisi de retenir la valeur de l'OEHA (2002) : ERUi = $10^{-6} (\mu\text{g/m}^3)^{-1}$ car cette dernière est plus récente et plus contraignante.
<b>Trichlorométhane</b>	L'ATSDR, le RIVM et l'OEHA proposent des VTR avec seuil pour le trichlorométhane. Les valeurs de l'OEHA et du RIVM ont été établies à partir de la même étude expérimentale sur le rat. Le GT a choisi de retenir la valeur proposée par l'ATSDR (1998) : MRL = $2,44.10^{-2} \mu\text{g/m}^3$ , pour une exposition sub-chronique, car cette dernière a été construite à partir d'une étude réalisée sur des travailleurs exposés au trichlorométhane (chloroforme) <sup>55</sup> .	L'US EPA et l'OEHA proposent des VTR sans seuil pour le trichlorométhane. Les VTR ont été établies à partir d'une même étude de cancérogénèse chez la souris, après gavage au trichlorométhane (aucune étude n'étant disponible pour l'inhalation). Le GT a choisi de retenir la valeur proposée par l'OEHA (2002) : ERUi = $5,3.10^{-6} (\mu\text{g/m}^3)^{-1}$ , malgré le fait qu'elle soit moins contraignante, car cette dernière est plus récente et a été construite à l'aide de quatre autres études toxicologiques de gavage chez le rat supplémentaires <sup>56-60</sup> .
<b>Acroléine</b>	L'US EPA, l'OEHA et l'ATSDR proposent des VTR, le GT a Décidé de retenir la valeur la plus contraignante de l'USEPA de $2.10^{-2} \mu\text{g/m}^3$ basée sur une étude sur les rongeurs <sup>61</sup> .	ND

Substances	Justifications des choix	
	VTR avec seuil	VTR sans seuil
<b>Toluène</b>	L'US EPA et l'ATSDR proposent des VTR, le GT a décidé de retenir La valeur de l'ATSDR de 3.8 mg/m <sup>3</sup> car elle est construite à partir d'une étude sur l'homme d'exposition chronique <sup>96</sup>	ND
<b>Xylènes</b>	L'US EPA et l'ATSDR proposent des VTR, le GT a choisi la valeur de 3,04.10 <sup>-3</sup> µg/m <sup>3</sup> car elle est basée sur une étude d'exposition Subchronique de rongeurs <sup>63</sup>	ND
<b>Phénol</b>	Seule l'OEHAa a proposé une VTR basée sur une étude de sur les rats <sup>64</sup>	ND
<b>2-butoxyéthanol</b>	Seul l'US EPA propose une VTR pour une toxicité chronique établie sur une étude détaillée	ND
<b>Chlorure d'hydrogène</b>	L'US EPA et l'OEHAa proposent une VTR à seuil pour le chlorure d'hydrogène (acide chlorhydrique). Ces valeurs, qui ont été construites à partir de la même étude expérimentale chez le rat <sup>65</sup> sont très proches. Le GT a choisi de retenir la valeur de l'OEHAa : REL = 9 µg/m <sup>3</sup> , cette dernière étant plus récente <sup>112</sup> .	ND
<b>Sulfure d'hydrogène</b>		
<b>Disulfure de carbone</b>	Seule l'US EPA a proposé une VTR.	ND
<b>Oxydes d'azote</b>	Seule l'OEHAa a proposé une VTR pour le dioxyde d'azote.	ND
<b>Ammoniac</b>	L'ATSDR et l'USEPA proposent des VTR pratiquement semblables basées sur la même étude <sup>69</sup> , la GT a donc décidé de retenir la valeur la Plus contraignante.	ND



Substances	Justifications des choix	
	VTR avec seuil	VTR sans seuil
<b>Acide phosphorique</b>	Seuls l'OEHHA et l'US EPA proposent une VTR basée pour les deux organismes sur les mêmes études <sup>97,70</sup> . Le GT retient donc la VTR la plus contraignante, à savoir celle de l'OEHHA.	ND
<b>PM<sub>2,5</sub></b>	Il s'agit de valeurs guides proposées par l'OMS <sup>113</sup>	ND
<b>PM<sub>10</sub></b>	Il s'agit de valeurs guides proposées par l'OMS <sup>113</sup>	ND
<b>Dipropylène glycol monobutyl ether</b>	Seule une VTR a été proposée par Cal/EPA <sup>72</sup>	ND
<b>Cyanure d'hydrogène</b>	L'US EPA et l'OEHHA proposent des VTR à seuil pour le cyanure d'hydrogène. Ces valeurs ont été construites à partir d'une même étude épidémiologique chez des travailleurs exposés de manière chronique par inhalation <sup>73</sup> . Le GT a choisi de retenir la VTR proposée par l'US EPA (1994) : RfC = 3 µg/m <sup>3</sup> , cette dernière étant plus contraignante.	ND
<b>2,4,6-trichlorophénol</b>	ND	Seule une VTR sans seuil a été proposée par l'US EPA (1994) : ERU <sub>i</sub> = 3,1.10 <sup>-6</sup> (µg/m <sup>3</sup> ) <sup>-1</sup> . Cette valeur a été construite à partir d'une étude de cancérogénèse chez des rats exposés au 2,4,6-trichlorophénol <sup>74</sup> via l'eau de boisson (en raison de l'absence de données toxicologiques pour une exposition par inhalation).
<b>Fluorure d'hydrogène</b>	Seule une VTR à seuil a été proposée par l'OEHHA (2003) : 14 µg/m <sup>3</sup> <sup>98</sup> . Cette valeur a été construite à partir d'une étude chez des travailleurs exposés au fluorure d'hydrogène <sup>75</sup>	ND
<b>Phosgène</b>	Seule une VTR à seuil a été proposée par l'US EPA (2005) : RfC = 3.10 <sup>-1</sup> µg/m <sup>3</sup> <sup>99</sup> . Cette valeur a été construite à partir d'une étude expérimentale chez le rat <sup>76</sup> .	ND

## 2.3 Evaluation semi-quantitative des risques sanitaires et sélection des polluants traceurs

Il existe peu de sources de données de mesures ou de quantifications de substances toxiques au sein des fumées de feux domestiques ou d'incendie de navire. Le GT s'est appuyé sur une revue de différentes études menées au cours d'interventions de pompiers<sup>6</sup>. Cette revue expose les quantités de nombreuses substances présentes dans les fumées. Il a été décidé de prendre en compte les valeurs mesurées ou estimées maximales durant les sinistres (les substances quantifiées sont répertoriées dans le *tableau 4*). A noter toutefois que pour le plomb, le dichlorométhane et le trichlorophénol, seules les valeurs moyennes sont disponibles. Le GT a décidé de les intégrer dans la hiérarchisation des polluants ; cette dernière pourra être amenée à évoluer si de nouvelles données sont publiées. D'autres études proposent des valeurs de quantification de polluants émis lors d'un incendie, l'une d'elles est réalisée sur les feux de combustion de pétrole provenant de la base navale pétrolière Deep Water Horizon<sup>100</sup>. Néanmoins, il a été décidé de ne pas retenir de valeurs quantitatives de ces travaux dans le cadre des polluants émis par la combustion des fiouls de propulsion. En effet, la composition du pétrole est différente de celle du fioul de propulsion et les mesures effectuées ne correspondent pas à des quantifications maximales de polluants émis dans les fumées.

Le GT a décidé d'intégrer, dans le tableau de hiérarchisation, certains toxiques dont il n'a pas été possible de déterminer les quantifications dans l'étude menée par les pompiers mais qui présentent une valeur limite fixée par l'Organisation Marine Internationale (OMI). Ces valeurs sont disponibles dans le rapport publié par E. Guillaume<sup>5</sup>. Elles correspondent à la valeur limite pour laquelle un matériau ne sera utilisé dans la construction de bâtiments navals car considéré comme rejetant dans les fumées de combustion des quantités de substances toxiques non acceptables. Cette valeur fera office de quantification dans les calculs (substances surlignées en gris dans le *tableau 4*), qui ne pourront en aucun cas intervenir dans la hiérarchisation finale des substances. En effet, le GT a décidé de considérer cette valeur seuil de manière à mettre en évidence le caractère hautement toxique que peuvent avoir certaines substances présentes dans les fumées. Ces valeurs ont permis de calculer un rapport concentration dans l'air sur VTR qui place ainsi le HCN parmi les substances pouvant avoir le plus d'impact lors de l'intervention.

Pour hiérarchiser les substances, le GT a choisi de calculer le rapport entre la concentration du composé dans l'air et la VTR sélectionnée pour ce dernier. Les composés présentant les rapports les plus élevés sont donc ceux susceptibles de provoquer le plus d'effets néfastes

sur la population étudiée. Il est toutefois important de croiser ces données avec les informations toxicologiques de chaque substance pour effectuer une sélection des substances à retenir. En effet, une substance présentant un rapport légèrement inférieur à une autre substance mais ayant des effets très toxiques sur l'organisme pourra être priorisée dans notre sélection. Les *tableaux 4* et *5* mettent en avant les rapports des substances pour lesquelles une quantification a pu être mise en œuvre.

Le GT a mis en évidence quelques substances ayant des rapports élevés, que ce soit pour des effets à seuil et sans seuil :

- **le trichlorométhane** :
  - substance du groupe 2B dans la classification IARC
  - effets à seuil : hépatite et ictères
  - effets sans seuil : carcinomes hépatiques
- **le benzène** :
  - substance du groupe 1 dans la classification IARC
  - effets à seuil : atteintes hémotoxiques et neurologiques
  - effets sans seuil : augmentation de l'incidence des leucémies
- **l'arsenic** :
  - substance du groupe 1 dans la classification IARC
  - effets à seuil : effets tératogènes, malformations osseuses
  - effets sans seuil : cancers pulmonaires
- **le naphthalène** :
  - substance du groupe 2B dans la classification IARC
  - effets à seuil : lésions de l'appareil respiratoire supérieur
  - effets sans seuil : cancers broncho-alvéolaires
- **l'acétaldéhyde** :
  - substance du groupe 2B dans la classification IARC
  - effets à seuil: dégénérescence des cellules olfactives
  - effets sans seuil : augmentation de l'incidence des cancers

Le GT attire l'attention sur le fait que les ratios présentés dans les *tableaux 4* et *5* ne constituent en aucun cas des quotients de danger (QD) pour les effets à seuil ou des excès de risques individuels (ERI) concernant les effets sans seuil. En effet, les concentrations des polluants prises en compte pour effectuer ces calculs représentent les quantités maximales mesurées par les équipes de pompiers et ne correspondent pas aux concentrations qui seraient retrouvées auprès des primo-intervenants. Néanmoins, le GT part du postulat que les proportions de polluants seront sensiblement les mêmes, quelle que soit la distance,

dans un scénario enveloppe de dispersion des fumées (beau temps, absence de vents). De futures campagnes de mesures autour d'incendies de navires permettront de déterminer les quantités précises de toxiques susceptibles d'être inhalés par les primo-intervenants et ainsi de calculer des QD et ERI précis des substances sélectionnées. Il convient donc, dans ce rapport, d'apporter des pistes de stratégie de métrologie et d'échantillonnage.

**Tableau 4 : Classification des substances avec seuil d'effet pour une exposition chronique par inhalation après calcul du ratio « concentration dans l'air/VTR »**

Nom de la substance	VTR (effet avec seuil) ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	Quantification dans fumée ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	Concentration dans l'air/VTR
Benzène	13	797546,0 <sup>6</sup>	61349,7
Cyanure d'hydrogène / acide cyanhydrique	3	154601,2 <sup>5</sup>	51533,7
Arsenic	1,50.10 <sup>-2</sup>	140 <sup>6</sup>	9333,3
Trichlorométhane	2.44.10 <sup>2</sup>	2263190,2 <sup>6</sup>	2318,7
Acétaldéhyde	9	14576,6 <sup>6</sup>	1619,6
Naphtalène	9	11203,3 <sup>6</sup>	1244,8
Butadiène	20	10689,6 <sup>6</sup>	534,5
Formaldéhyde	40	18404,9 <sup>6</sup>	460,1
Monoxyde d'azote	4,7.10 <sup>2</sup>	81799,5 <sup>5</sup>	174,0
PM <sub>10</sub>	20	3000 <sup>6</sup>	150,0
Chlorure d'hydrogène / acide chlorhydrique	9	1164,1 <sup>6</sup>	129,3
Silice	3	350 <sup>6</sup>	116,7
Styrène	1.10 <sup>3</sup>	8549,7 <sup>6</sup>	8,5
Tétrachloroéthylène(=perchloroéthylène)	2.10 <sup>2</sup>	936,9 <sup>6</sup>	4,7
Dichlorométhane	4.10 <sup>2</sup>	973,4 <sup>6</sup> (valeur moyenne)	2,4
Ethylbenzène	4,35.10 <sup>3</sup>	1647,4 <sup>6</sup>	0,4

**Tableau 5 : Classification des substances sans seuil d'effet pour une exposition chronique par inhalation après calcul du ratio « concentration dans l'air x VTR »**

Nom de la substance	VTR (ERUi : effet sans seuil) ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) <sup>-1</sup>	Quantification dans les fumées ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	Rapport VTR*Concentration dans l'air
Trichlorométhane ou chloroforme	$5,30 \cdot 10^{-6}$	2263190,2 <sup>6</sup>	$1,2 \cdot 10^1$
Benzène	$6 \cdot 10^{-6}$	797546,0 <sup>6</sup>	4,79
Arsenic	$4 \cdot 10^{-3}$	140 <sup>6</sup>	$6,02 \cdot 10^{-1}$
Naphtalène	$3,4 \cdot 10^{-5}$	11203,3 <sup>6</sup>	$3,81 \cdot 10^{-1}$
Butadiène	$3 \cdot 10^{-5}$	10689,6 <sup>6</sup>	$3,21 \cdot 10^{-1}$
Formaldéhyde	$6 \cdot 10^{-6}$	18404,9 <sup>6</sup>	$1,1 \cdot 10^{-1}$
Ethylbenzene	$2,5 \cdot 10^{-6}$	13185,3 <sup>6</sup>	$3,3 \cdot 10^{-2}$
Acétaldéhyde	$2,2 \cdot 10^{-6}$	14576,7 <sup>6</sup>	$3,21 \cdot 10^{-2}$
2,4,6 trichlorophénol	$3,1 \cdot 10^{-6}$	805,7 <sup>6</sup> (valeur moyenne)	$2,5 \cdot 10^{-3}$
Tétrachloroéthylène(=perchloroéthylène)	$2 \cdot 10^{-6}$	936,9 <sup>6</sup>	$1,87 \cdot 10^{-3}$
Pentachlorophénol	$4,6 \cdot 10^{-6}$	300,0 <sup>6</sup>	$1,38 \cdot 10^{-3}$
Dichlorométhane	$1 \cdot 10^{-6}$	973,4 <sup>6</sup>	$9,73 \cdot 10^{-4}$
Trichloroéthylène	$4,3 \cdot 10^{-6}$	969,8 <sup>6</sup>	$4,17 \cdot 10^{-4}$
Plomb	$1,2 \cdot 10^{-6}$	30,0 <sup>6</sup> (valeur moyenne)	$3,60 \cdot 10^{-4}$

### 3 Méthodes d'échantillonnage et de mesure

#### 3.1 Détermination des méthodes

Les recherches des méthodes d'analyse des polluants traceurs se sont appuyées uniquement sur la base de données MétroPol de l'INRS<sup>114</sup> qui recueille des méthodes de prélèvement et d'analyse de l'air pour l'évaluation des expositions professionnelles. Le nom de chacun des polluants traceurs a été saisi dans la base de données et a permis de dresser le *tableau 6*. Certains des polluants sont mesurés en « groupe ». Il est donc possible d'élargir le nombre de substances analysées sans augmenter le nombre de prélèvements. Ce cas de figure est intéressant pour le mélange de vapeurs d'hydrocarbures<sup>101</sup> qui inclut notamment l'éthylbenzène et le styrène, deux substances qui n'ont pas été retenues mais pour lesquelles l'analyse permettrait de déterminer si les concentrations trouvées dans la littérature sont réellement adaptées à notre cas. Il en est de même pour les dérivés halogénés des hydrocarbures aliphatiques<sup>102</sup> qui, en plus du trichlorométhane, comprennent le trichloroéthylène et le tétrachloroéthylène.

Le benzène peut être mesuré soit avec le mélange de vapeurs d'hydrocarbures C6 à C12 soit avec les hydrocarbures aromatiques<sup>103</sup>. Ces deux groupes ont plusieurs substances en commun (benzène, toluène, éthylbenzène, styrène et xylènes (isomères mesurés séparément pour les hydrocarbures aromatiques)). La mesure de ces derniers permet de prélever des volumes plus faibles et l'alternative d'un prélèvement passif (badge)<sup>104</sup> est possible, contrairement à la mesure du mélange. Cependant, le naphthalène (polluant traceur) ne peut être mesuré et seule la mesure du mélange de vapeurs d'hydrocarbures C6 à C12 le permet. Ainsi, pour éviter des analyses « inutiles » du fait de la redondance des substances mesurées par le biais de ces deux méthodes, l'analyse des hydrocarbures aromatiques n'est pas retenue.

Comme la mesure de cinq polluants ou familles de polluants a été fixée et que le butadiène se retrouve en tête des substances les plus à risques, le GT propose de mesurer également ce polluant.

La méthode d'analyse des aldéhydes est suffisamment sensible pour évaluer des teneurs de l'ordre de 0,036 mg/m<sup>3</sup> de formaldéhyde avec un prélèvement de 5L d'air. Cette concentration est du même ordre de grandeur que celle trouvée dans la littérature. Ainsi, si la littérature illustre bien le cas « incendie de navire », le formaldéhyde pourra être mesuré.

## 3.2 Limites des méthodes

L'analyse combinée de l'arsenic, l'arsine, la phosphine et la stibine peut entraîner des interférences avec les gaz réagissant avec le nitrate d'argent tels que le sulfure d'hydrogène et l'ammoniac, gaz identifiés dans les fumées<sup>105</sup>.

L'analyse des aldéhydes risque de sous-estimer les quantités d'acroléine car son dérivé se dégrade rapidement sur le support et dans la solution de désorption. De plus, si les prélèvements sont effectués à température et humidité relative élevées, il y a risque de saturation plus rapide du support<sup>106</sup>.

L'utilisation du badge présente l'avantage de ne pas gêner le geste professionnel et de ne pas être encombrant. Toutefois, contrairement au prélèvement via une pompe, il est nécessaire de mesurer les conditions de prélèvement (température, degré d'hygrométrie,...), tâche que le primo-intervenant ne pourra peut-être pas réaliser facilement et systématiquement.

En terme de coûts, il semble prévisible que le prélèvement actif nécessitera un coût de maintenance des pompes. De plus, d'après un document de l'INRS<sup>115</sup> le coût des pompes reste relativement élevé pour une entreprise ou un laboratoire. Cet article, une fois la question des gammes de mesure résolue, sera pertinent quant au choix de la pompe puisqu'il propose un outil d'aide à la décision pour sélectionner la pompe de prélèvement la mieux adaptée en fonction de certains critères.

A ce jour, le GT est en attente d'une réponse de l'INRS suite à une demande d'informations formulée par mail via le site de l'INRS. La requête porte sur la possibilité d'utiliser la même pompe de prélèvements pour réaliser plusieurs échantillons (à condition, bien sûr, que les débits de prélèvement correspondent à la capacité de la pompe en question). Il a également été demandé des compléments quant aux gammes de mesures des méthodes, afin de déterminer si les seuils de détection sont suffisants au vue des concentrations des polluants trouvées dans la littérature. Le GT précise néanmoins que les concentrations ne correspondent peut-être pas exactement au cas du « navire en feu » et qu'il faudra éventuellement adapter les méthodes de mesure en fonction des premiers résultats. De plus, le fait de réaliser ces prélèvements en présence de fumées risque t-il de saturer plus rapidement le charbon actif utilisé à la fois pour le prélèvement actif et passif ? La dernière interrogation portait sur la comparaison des résultats en fonction du type d'analyse (prélèvement actif avec pompe de prélèvement et tube ou prélèvement passif avec un badge).



En raison d'un manque d'informations actuel, le GT n'a pas pu proposer la manière d'équiper les primo-intervenants qui prélèveront les échantillons.

**Tableau 6 : Récapitulatif des méthodes d'échantillonnage et de mesure**

Fiche MétroPol	Substances mesurées et repérées par notre étude	Prélèvement			Méthode d'analyse
		Echantillonneur	Matériel	Conditions usuelles d'utilisation	
Mélange de vapeurs d'hydrocarbures C6 à C12 <sup>101</sup>	Benzène	Tube en verre type NIOSH (TCAN) longueur 70 mm, diamètre intérieur 4 mm contenant deux plages de 100 et 50 mg de charbon actif ou tube en verre, longueur 150 mm, diamètre intérieur 8 mm contenant 2 plages de 900 et 300 mg de charbon actif (TCA)	Pompe de prélèvement individuel capable d'assurer un débit régulé de 0,05 à 0,2 L/min pour TCAN et de 0,2 à 1 pour TCA (+/- 5 %) ; échantillonneur ; tuyau souple de connexion pompe-échantillonneur ; débitmètre ; flacons pour récupération du mélange utilisé	Comparaison à la VME : débits : pour TCAN : 0,05 à 0,2 L/min et pour TCA : 0,2 à 1 L/min, volume recommandé : TCA : 100 L ; TCAN : 12 L // Comparaison à la VLE : prélèvement de 15 min maximum (en général TCA de 0,5 à 1 L/min)	Chromatographie en phase gazeuse, détection par ionisation de flamme
	Toluène				
	Ethylbenzène				
	Xylènes (tous isomères)				
	Styrène				
	Naphtalène				
	Phénol				
Arsenic, arsine, phosphine, stibine <sup>105</sup>	Arsenic	Cassettes porte-filtres diamètre 37 mm contenant : un filtre en fibre de quartz imprégné de Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> à 10% et de glycérol à 5% (QIAS), deux filtres en fibre de quartz imprégnés de 500µL de solution de nitrate d'argent à 10% (QIAG)	Pompe de prélèvement individuel capable d'assurer un débit de 1L/min (+/-5%) ; échantillonneur, tube souple de connexion tube-échantillonneur, débitmètre	Débit : 1L/min ; comparaison à la VME : volume recommandé de 60 à 240L ; comparaison à la VLE : prélèvement de 15 minutes maximum	Pour dosage de l'arsenic particulaire et As <sub>2</sub> O <sub>3</sub> seulement, technique des hydrures avec analyse par spectroscopie d'absorption atomique ou spectrophotomètre d'émission à plasma (ICP)

Fiche MétroPol	Substances mesurées et repérées par notre étude	Prélèvement			Méthode d'analyse
		Echantillonneur	Matériel	Conditions usuelles d'utilisation	
<b>1,3-butadiène</b> <sup>107</sup>	<b>1,3-butadiène</b>	Tubes en verre, type NIOSH (TCAN), longueur 70 mm, diamètre intérieur 4 mm contenant deux plages de 100 et 50 mg de charbon actif, séparées et maintenues par des tampons en laine de verre	Pompe de prélèvement capable d'assurer un débit régulé de 0,1 à 1 L/min (+/- 5%) ; échantillonneurs ; tuyau souple de connexion pompe-échantillonneur ; débitmètre	Débit : 0,1 à 1 L/min ; volume recommandé : au moins 30L	Chromatographie en phase gazeuse avec détecteur à ionisation de flamme
<b>Aldéhydes</b> <sup>106</sup>	<b>Formaldéhyde</b>	Tube de verre, longueur 150 mm, diamètre intérieur 8 mm contenant de 250 à 500 mg de gel de silice (35-70 mesh) imprégné de 2,4-dinitrophénylhydrazine (DNPH) maintenu par deux tampons de laine de verre ou cartouche constituée d'un corps de seringue en verre contenant 500 mg de gel de silice imprégné à 1% de DNPH, maintenu par les pastilles en Téflon ou support commercial prêt à l'emploi	Pompe de prélèvement individuel capable d'assurer un débit régulé de 0,2 à 1L/Min (+/-5%) ; échantillonneur ; tuyau souple de connexion pompe-échantillonneur ; débitmètre	Débit : 0,2 à 1L/min ; volume recommandé : 60L ; prélèvement de 15 minutes maximum pour une comparaison à la VLE	Chromatographie liquide haute performance, détection U.V.
	<b>Acétaldéhyde</b>				
	<b>Acroléine</b>				
<b>Dérivés halogénés des hydrocarbures aliphatiques</b> <sup>104,102</sup>	<b>Trichlorométhane</b>	Tube type NIOSH, longueur 70 mm, diamètre intérieur 4 mm, contenant deux plages de 100 et 50 mg de charbon actif (TCAN) ou badge (échantillonneur par diffusion)	Pompe de prélèvement capable d'assurer un débit régulé de 0,05 à 1 L/min (+/-5%) ; échantillonneurs ; tuyau souple de connexion pompe-échantillonneur ; débitmètre ; pour prélèvement passif, badge GABIE	Débit : 0,2 L/min, volume recommandé (30L)	Chromatographie en phase gazeuse, détection par ionisation de flamme

Fiche MétroPol	Substances mesurées et repérées par notre étude	Prélèvement			Méthode d'analyse
		Echantillonneur	Matériel	Conditions usuelles d'utilisation	
Dérivés halogénés des hydrocarbures aliphatiques <sup>104,102</sup>	Trichloroéthylène	Tube type NIOSH, longueur 70 mm, diamètre intérieur 4 mm, contenant deux plages de 100 et 50 mg de charbon actif (TCAN) ou tube en verre, longueur 70 mm, diamètre intérieur 6 mm, contenant deux plages de 400 et 200 mg de charbon actif, séparées et maintenues par des tampons de laine de verre ou tube en verre, longueur 150 mm, diamètre intérieur 8 mm contenant deux plages de 900 et 300 mg de charbon actif (TCA) ou badge (échantillonneur par diffusion)	Pompe de prélèvement capable d'assurer un débit régulé de 0,05 à 1 L/min (+/-5%) ; échantillonneurs ; tuyau souple de connexion pompe-échantillonneur ; débitmètre ; pour prélèvement passif, badge GABIE	Pour TCA, débit : 0,2 à 1 L/min et volume recommandé : 30L ; pour TCAN, débit : 0,05 à 0,1 L/min et volume recommandé : 12L	Chromatographie en phase gazeuse, détection par ionisation de flamme
	Tétrachloroéthylène	Tube type NIOSH, longueur 70 mm, diamètre intérieur 4 mm, contenant deux plages de 100 et 50 mg de charbon actif (TCAN) ou tube en verre, longueur 70 mm, diamètre intérieur 6 mm, contenant deux plages de 400 et 200 mg de charbon actif, séparées et maintenues par des tampons de laine de verre ou tube en verre, longueur 150 mm, diamètre intérieur 8 mm contenant deux plages de 900 et 300 mg de charbon actif (TCA) ou badge (échantillonneur par diffusion)		Pour TCA, débit : 0,2 à 1 L/min et volume recommandé : 30L ; pour TCAN, débit : 0,05 à 0,2 L/min et volume recommandé : 30L	

## 4 Intérêts et limites de l'étude

Il est important de préciser que la sélection des polluants a été menée selon les données disponibles à ce jour. La démarche du GT s'est basée sur deux principales étapes de recherches documentaires.

La première a été la recherche de VTR des substances présumées toxiques. Les composés ne présentant pas de VTR, faute d'études, ou n'ayant tout simplement pas d'effets délétères sur l'organisme humain ont été écartés. Par le biais des bases de données scientifiques et toxicologiques, il a été possible de déterminer les VTR de plus de quarante substances parmi un listing initial de plus de 70 composés. Certains composés comme la silice ou les dérivés azotés (pentaoxyde d'azote ou tétraoxyde d'azote) ne présentent ni VTR ni valeurs guides. Dans le cadre d'une future étude, il serait intéressant d'approfondir le potentiel toxicologique de ces composés souvent cités comme pouvant provoquer des troubles chez l'Homme<sup>5</sup>.

La deuxième étape de la démarche a consisté en la recherche de valeurs quantifiant les composés dans les fumées retenus lors de la première étape. Une modélisation à partir d'un bateau "ferry" est complexe à mettre en place, de par la disparité des matériaux prenant place dans la construction d'un "ferry" et de par la détermination de la proportion de chaque polluant passant dans les fumées et étant susceptibles d'être inhalées par la population étudiée. Le GT a pris le parti de rechercher des données disponibles à partir de campagnes de mesures effectuées sur les lieux d'incendie domestiques. Aussi, le GT recommande de mettre en place des campagnes de mesures lors d'incendies de navires semblables à celles réalisées dans la revue traitant des quantifications des polluants dans les fumées d'incendies domestiques<sup>6</sup>. Cela permettra de mener une étude quantitative des risques spécifiques d'incendies de bateaux. La quantification n'a pu être réalisée que pour une vingtaine de polluants présents dans les fumées. Il convient de préciser que la liste des substances sélectionnées comme étant dangereuses et à surveiller est pertinente mais incomplète. Certaines substances n'ayant pu être quantifiées sont rapportées dans la littérature comme étant très présentes dans les fumées<sup>5</sup>. L'étude de danger menée dans ce travail (*cf. tableau 2*) met en évidence les effets particulièrement toxiques du cyanure d'hydrogène ou du chlorure de vinyle, deux substances susceptibles d'être présentes en quantité importante dans les fumées.

Le GT attire également l'attention sur la présence notable de nombreuses substances du groupe 1 de la classification IARC, notamment les dioxines et le formaldéhyde qui sont des substances à haut potentiel toxique<sup>5</sup>. Il convient également d'être vigilant par rapport à des

substances telles que l'amiante (pouvant être présent dans les cloisons des bâtiments navals), la silice et le chrome (se retrouvant dans les peintures de navires), composés spécifiques à certains types de structures. Le fait d'avoir pris comme référentiel de quantification les feux domestiques n'a pas permis de déterminer le réel impact de tels composés lors d'incendie de navires. Il est donc indispensable de préciser que cette étude peut évoluer et être étayée en fonction de données futures.

La réalisation de ce travail comporte des limites, il est nécessaire de les appréhender pour pouvoir utiliser cette étude de manière cohérente dans une approche d'évaluation du risque sanitaire d'intervention lors d'un incendie de navire. En effet, le listing initial de polluants pouvant être émis lors d'un incendie de navire a été fait selon la bibliographie existante qui ne tient pas compte de l'hétérogénéité des matériaux utilisés dans la construction de navire. Ainsi, le modèle s'est appuyé sur un recoupement d'études portant sur les fumées de feux domestiques, de feux carburants ainsi que de combustion de matériaux de construction de bâtiments navals. L'étape suivante a été de rechercher des données toxicologiques concernant les polluants sélectionnés. Or certaines substances susceptibles de comporter des risques toxicologiques n'ont pas de VTR ; ceci peut donc biaiser notre sélection, il serait intéressant de construire des VTR pour ces substances pour pouvoir déterminer le risque significatif potentiel pour les primo-intervenants.

De plus, le GT a pris le parti de sélectionner les VTR subchroniques et d'utiliser les VTR chronique à défaut. Ceci peut induire une surestimation ou une sous-estimation de l'effet toxique de certaines substances. Il pourrait être possible de ne sélectionner que les VTR chroniques pour avoir une meilleure homogénéité de période d'exposition, mais le GT a considéré que les conditions d'expositions chroniques des VTR à seuils se rapprochent souvent des conditions d'exposition subchronique, proches des conditions d'expositions du cas étudié.

La quantification possible des substances dans les fumées est une étape essentielle dans la démarche de hiérarchisation des polluants émis dans les fumées. Le peu d'études sur navires en feu disponibles a poussé le GT à prendre comme référentiel les données de quantifications de feux domestiques qui peuvent se rapprocher par certains aspects d'un incendie de ferry. Il sera nécessaire de mener des investigations pour obtenir des quantifications de composés spécifiques à des incendies de bateaux. De plus, les quantifications de polluants proviennent d'une revue regroupant les informations de nombreuses études sans spécifications des méthodes et conditions de mesures. Le GT a pris la décision de sélectionner les valeurs maximales mesurées pour chaque composé, ce qui introduit une forte imprécision et de possibles écarts importants entre la mesure et la

réalité. De plus certaines mesures maximales n'étant pas disponibles pour certains polluants, le GT a décidé de ne retenir que les valeurs moyennes ce qui a pour conséquence possible de fortement sous estimer l'importance de ces polluants dans la hiérarchisation finale. Une sélection finale a pu être faite, il convient néanmoins de préciser qu'un affinage des quantités de polluants émis dans les fumées de navire est nécessaire. De futures campagnes de mesures lors d'incendies de navires pourraient être utiles.

De plus, le GT ne tient pas compte des possibles phénomènes de synergie ou de compétitions entre gaz qui peuvent biaiser la sélection des substances. En effet, le scénario envisagé par le GT consiste à considérer que la proportion des gaz au plus fort de l'incendie sera la même auprès des primo-intervenants étant à une certaine distance du foyer. Il serait peut être judicieux d'étudier des modèles précis de comportement des fumées lors d'un incendie en mer ou les conditions météorologiques notamment sont souvent différentes des conditions terrestres.

Enfin, le GT a proposé plusieurs méthodes possibles de mesures des quantités des polluants sélectionnés, mais la plupart des méthodes manquent de praticité pour les primo-intervenants et/ou ne proposent pas des résultats en temps réel, qui permettraient à l'individu de prendre les dispositions nécessaires lors de dépassement de seuils de pollutions durant l'intervention.

## Conclusion

Les risques chimiques encourus par des primo-intervenants non protégés, lors de l'exercice de leur travail quotidien et lors de situations exceptionnelles, n'ont peu ou pas été documentés. Le manque de données de mesures de l'exposition de ces primo-intervenants à des substances chimiques potentiellement toxiques justifie la nécessité de s'intéresser à cette problématique. En effet, il est essentiel de tracer les expositions de manière à disposer de mesures réelles de terrain, importantes à plusieurs égards. Avant tout, ces valeurs seraient indispensables dans une démarche d'évaluation quantitative des risques sanitaires. Elles permettraient également d'améliorer la justesse des conclusions de ces études et de mettre en place des mesures de gestion et/ou de prévention secondaire adaptées (suivi médical, traitement) faisant suite à d'éventuelles expositions antérieures.

Ce travail de synthèse bibliographique avait pour objectif d'évaluer semi-quantitativement les risques sanitaires encourus par des primo-intervenants lors d'un incendie de navire en feu (sans déversement d'hydrocarbures). Cinq substances ou familles de substances chimiques ont ainsi été sélectionnées : le trichlorométhane, le benzène, l'arsenic, le naphthalène et l'acétaldéhyde. Aussi, ces polluants devraient être mesurés en priorité afin d'apprécier précisément les expositions et par corollaire les risques sanitaires encourus par les primo-intervenants.

Cependant, il convient de préciser que de nombreuses incertitudes, propres à la démarche d'évaluation du risque, subsistent. Elles concernent entre autres, l'incertitude liée au fait que, pour de nombreuses substances chimiques, aucune VTR n'ait été déterminée à ce jour. Ces substances ont ainsi été écartées, sans pour autant avoir l'assurance que ces dernières sont inoffensives. En outre, les valeurs de quantification des substances chimiques dans les fumées étaient issues d'incendies domestiques ; les rapports obtenus lors de l'étape de hiérarchisation ont pu ainsi mettre en avant ou au contraire écarter certains polluants qu'il aurait fallu considérer dans ce cas particulier de navire en feu. Enfin, l'incertitude relative à la construction de VTR pourrait également impacter sur les conclusions de ce rapport.

Néanmoins, il convient de rappeler que ce travail a été réalisé dans le but d'aider à la gestion de ces situations, dans l'état des connaissances scientifiques actuelles. Le recueil de données bibliographiques, présenté dans ce rapport, pourra alors être réactualisé ultérieurement, afin d'évaluer le plus précisément possible les risques sanitaires pour des primo-intervenants.



## Bibliographie

1. Bongers, S. et al. Challenges of exposure assessment for health studies in the aftermath of chemical incidents and disasters. *J Expo Sci Environ Epidemiol* 18, 341-359 (2008).
2. Huet, M. Face aux risques. CNPP entreprise SARL (2000).
3. Levin, B. & Kuligowski, E. *Inhalation Toxicology*. CRC Press 205-228 (2005).
4. Hall, J. & Harwood, B. Smoke or burns - Which deadlier ? *NFPA journal* 38-43 (1995).
5. Guillaume, E. Effets du feu sur les personnes-Synthèse bibliographique. documents du LNE (2006).
6. IARC Monographs on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans Painting, Firefighting, and Shiftwork. 98, (2010).
7. Monitoring Air Quality Along the Gulf Coast. (2011).à <<http://www.epa.gov/bpspill/air-mon.html>>
8. ISO 19703:2010 Production et analyse des gaz toxiques dans le feu -- Calcul des taux de production des espèces, des rapports d'équivalence et de l'efficacité de combustion dans les feux expérimentaux. (2010).
9. AFNOR C20-924 7-2 PR AFNOR : C20-924-7-2PR, PR NF EN 60695-7-2, Avant-projet de norme soumis à enquête publique jusqu'au 15 mai 2010 (essais relatifs aux risques du feu, toxicité des effluents du feu - Résumé et pertinence des méthodes d'essai. (2010).
10. Celebi, U.B. & Vardar, N. Investigation of VOC emissions from indoor and outdoor painting processes in shipyards. *Atmospheric Environment* 42, 5685-5695 (2008).
11. Incendies domestiques : cessez le feu ! à <<http://www.securikids.fr/parents/enquetes/archives/534-incendies-domestiques-cessez-le-feu->>
12. IARC Agents Classified by the IARC Monographs. 1–100, (2010).
13. Rusch, G.M., Clary, J.J., Rinehart, W.E. & Bolte, H.F. A 26-week inhalation toxicity study with formaldehyde in the monkey, rat, and hamster. *Toxicol. Appl. Pharmacol* 68, 329-343 (1983).
14. Kerns, W.D., Pavkov, K.L., Donofrio, D.J., Gralla, E.J. & Swenberg, J.A. Carcinogenicity of formaldehyde in rats and mice after long-term inhalation exposure. *Cancer Res* 43, 4382-4392 (1983).
15. Sun, W., Gong, Z. & Li, X. Effect of low benzene exposure on neurobehavioral function, AChE in blood and brain and bone marrow picture in mice. *Biomed. Environ. Sci* 5, 349-354 (1992).
16. Rinsky, R.A. Benzene and leukemia: an epidemiologic risk assessment. *Environ Health*

Perspect 82, 189-191 (1989).

17. Benzo[a]pyrene (BaP) (CASRN 50-32-8) | IRIS | US EPA. à <<http://www.epa.gov/iris/subst/0136.htm>>
18. Nagymajtényi, L., Selypes, A. & Berencsi, G. Chromosomal aberrations and fetotoxic effects of atmospheric arsenic exposure in mice. *J. Appl. Toxicol.* 5, 61-63 (1985).
19. Lee-Feldstein, A. Arsenic and respiratory cancer in humans: follow-up of copper smelter employees in Montana. *J. Natl. Cancer Inst* 70, 601-610 (1983).
20. US EPA National Center for Environmental Assessment Arsenic exposure and respiratory cancer in a cohort of 8044 Anaconda smelter workers: A 43-year follow-up study (Final report). (2009).à <[http://hero.epa.gov/index.cfm?action=search.view&reference\\_id=8340](http://hero.epa.gov/index.cfm?action=search.view&reference_id=8340)>
21. Enterline, P.E., Day, R. & Marsh, G.M. Cancers related to exposure to arsenic at a copper smelter. *Occup Environ Med* 52, 28-32 (1995).
22. US EPA National Center for Environmental Assessment Investigation of irritating properties of inhaled CrVI with possible influence on its carcinogenic action. (2009).à <[http://hero.epa.gov/index.cfm?action=search.view&reference\\_id=4286](http://hero.epa.gov/index.cfm?action=search.view&reference_id=4286)>
23. Malsch, P.A., Proctor, D.M. & Finley, B.L. Estimation of a chromium inhalation reference concentration using the benchmark dose method: a case study. *Regul. Toxicol. Pharmacol* 20, 58-82 (1994).
24. Mancuso, T.F. Chromium as an industrial carcinogen: Part I. *Am. J. Ind. Med* 31, 129-139 (1997).
25. US EPA ORD NCEA Integrated Risk Information System (IRIS) Asbestos (CASRN 1332-21-4) | IRIS | US EPA. à <<http://www.epa.gov/iris/subst/0371.htm>>
26. Bi, W.F., Wang, Y.S., Huang, M.Y. & Meng, D.S. Effect of vinyl chloride on testis in rats. *Ecotoxicol. Environ. Saf* 10, 281-289 (1985).
27. Europe, W.H.O.R.O.F. Air quality guidelines for Europe. (WHO Regional Office Europe: 2000).
28. Barnes, A.W. Vinyl chloride and the production of PVC. *Proc R Soc Med* 69, 277-281 (1976).
29. Nicholson, W.J., Henneberger, P.K. & Seidman, H. Occupational hazards in the VC-PVC industry. *Prog. Clin. Biol. Res* 141, 155-175 (1984).
30. NTP Toxicology and Carcinogenesis Studies of 1,3-Butadiene (CAS No. 106-99-0) in B6C3F1 Mice (Inhalation Studies). *Natl Toxicol Program Tech Rep Ser* 434, 1-389 (1993).
31. Sathiakumar, N. et al. Mortality from cancer and other causes of death among synthetic rubber workers. *Occup Environ Med* 55, 230-235 (1998).
32. Carcinogenesis Bioassay of 2,3,7,8-Tetrachlorodibenzo-p-dioxin (CAS No. 1746-01-6)

- in Osborne-Mendel Rats and B6C3F1 Mice (Gavage Study). Natl Toxicol Program Tech Rep Ser 209, 1-195 (1982).
33. Hnizdo, E. & Sluis-Cremer, G.K. Risk of silicosis in a cohort of white South African gold miners. *Am. J. Ind. Med* 24, 447-457 (1993).
  34. Arito, H., Takahashi, M. & Ishikawa, T. Effect of subchronic inhalation exposure to low-level trichloroethylene on heart rate and wakefulness-sleep in freely moving rats. *Sangyo Igaku* 36, 1-8 (1994).
  35. Maltoni, C., Lefemine, G., Cotti, G. & Perino, G. Long-term carcinogenicity bioassays on trichloroethylene administered by inhalation to Sprague-Dawley rats and Swiss and B6C3F1 mice. *Ann. N. Y. Acad. Sci* 534, 316-342 (1988).
  36. Seeber, A. Neurobehavioral toxicity of long-term exposure to tetrachloroethylene. *Neurotoxicol Teratol* 11, 579-583 (1989).
  37. JISA Carcinogenicity study of tetrachloroethylene by inhalation in rats and mice. , Japan Industrial Safety Association, Kanagawa, Japan (1993).
  38. SNELL, K.C. & STEWART, H.L. Pulmonary adenomatosis induced in DBA/2 mice by oral administration of dibenz[a,h]-anthracene. *J. Natl. Cancer Inst* 28, 1043-1051 (1962).
  39. US EPA ORD NCEA Integrated Risk Information System (IRIS) Lead and compounds (inorganic) (CASRN 7439-92-1) | IRIS | US EPA. à <http://www.epa.gov/iris/subst/0277.htm>
  40. Appelman, L.M., Woutersen, R.A. & Feron, V.J. Inhalation toxicity of acetaldehyde in rats. I. Acute and subacute studies. *Toxicology* 23, 293-307 (1982).
  41. Appelman, L.M., Woutersen, R.A., Feron, V.J., Hoofman, R.N. & Notten, W.R. Effect of variable versus fixed exposure levels on the toxicity of acetaldehyde in rats. *J Appl Toxicol* 6, 331-336 (1986).
  42. Woutersen, R., Appelman, L. & Van Der Heijden, C. Inhalation toxicity of acetaldehyde in rats II. Carcinogenicity study: Interim results after 15 months. *Toxicology* 31, 123-133 (1984).
  43. Andrew, F., Buschbom, R., Cannon, W., Miller, R. & Montgomery, L. Teratologic assessment of ethylbenzene and 2-ethoxyethanol. Battelle (1981).
  44. NTP Toxicology and Carcinogenesis Studies of Ethylbenzene (CAS No. 100-41-4) in F344/N Rats and B6C3F1 Mice (Inhalation Studies). Natl Toxicol Program Tech Rep Ser 466, 1-231 (1999).
  45. Mutti, A. et al. Exposure-effect and exposure-response relationships between occupational exposure to styrene and neuropsychological functions. *Am. J. Ind. Med* 5, 275-286 (1984).

46. Thyssen, J., Althoff, J., Kimmerle, G. & Mohr, U. Inhalation studies with benzo[a]pyrene in Syrian golden hamsters. *J. Natl. Cancer Inst* 66, 575-577 (1981).
47. NTP National Toxicology Program. Technical report series No.410 Toxicology and carcinogenesis of naphthalene (CAS No. 91-20-3) (inhalation studies). Research Triangle Park (1992).
48. NTP (2000). NTP technical report on the toxicology and carcinogenesis studies of 2-butoxyethanol (CAS No. 111-76-2) in F344/N rats and B6C3F1 mice (inhalation studies) (Report No. NTP TR 484). Research Triangle Park, NC: National Toxicology Program. <http://ntp.niehs.nih.gov/?objectid=070AC403-B110-CA79-3A23AF79DE7B752A>. National Toxicology Program (2000).
49. Quast, J.F. Two-year toxicity and oncogenicity study with acrylonitrile incorporated in the drinking water of rats. *Toxicology Letters* 132, 153-196 (2002).
50. O'Berg, M.T. Epidemiologic study of workers exposed to acrylonitrile. *J Occup Med* 22, 245-252 (1980).
51. Newton, P.E. et al. Subchronic and chronic inhalation toxicity of antimony trioxide in the rat. *Fundam Appl Toxicol* 22, 561-576 (1994).
52. NTP Toxicology and Carcinogenesis Studies of Two Pentachlorophenol Technical-Grade Mixtures (CAS No. 87-86-5) in B6C3F1 Mice (Feed Studies). *Natl Toxicol Program Tech Rep Ser* 349, 1-265 (1989).
53. DiVincenzo, G.D. & Kaplan, C.J. Uptake, metabolism, and elimination of methylene chloride vapor by humans. *Toxicology and Applied Pharmacology* 59, 130-140 (1981).
54. NTP Technical report on the toxicology and carcinogenesis studies of dichloromethane (methylene chloride) (CAS N. 75-09-2) in F344/N rats and B6C3F1 mice (inhalation studies). Research Triangle Park (1986).
55. Phoon, W.H., Goh, K.T., Lee, L.T., Tan, K.T. & Kwok, S.F. Toxic jaundice from occupational exposure to chloroform. *Med. J. Malaysia* 38, 31-34 (1983).
56. Tumasonis, C.F., McMartin, D.N. & Bush, B. Toxicity of chloroform and bromodichloromethane when administered over a lifetime in rats. *J. Environ. Pathol. Toxicol. Oncol* 7, 55-63 (1987).
57. NCI Report on carcinogenesis bioassay of chloroform National Cancer Institute - Carcinogenesis Program. Technical report series (1976).
58. Reuber, M.D. Carcinogenicity of chloroform. *Environ Health Perspect* 31, 171-182 (1979).
59. Roe, F.J., Palmer, A.K., Worden, A.N. & Van Abbé, N.J. Safety evaluation of toothpaste containing chloroform. I. Long-term studies in mice. *J Environ Pathol Toxicol* 2, 799-819 (1979).
60. Jorgenson, T.A., Meierhenry, E.F., Rushbrook, C.J., Bull, R.J. & Robinson, M.

- Carcinogenicity of chloroform in drinking water to male Osborne-Mendel rats and female B6C3F1 mice. *Fundam Appl Toxicol* 5, 760-769 (1985).
61. Feron, V.J., Kruyssen, A., Til, H.P. & Immel, H.R. Repeated exposure to acrolein vapour: subacute studies in hamsters, rats and rabbits. *Toxicology* 9, 47-57 (1978).
  62. Zavalic, M., Mandic, Z., Turk, R., Bogadi-Sare, A. & Plavec, D. Quantitative assessment of color vision impairment in workers exposed to toluene. *Am. J. Ind. Med* 33, 297-304 (1998).
  63. Hass, U. & Jakobsen, B.M. Prenatal Toxicity of Xylene Inhalation in the Rat: A Teratogenicity and Postnatal Study. *Pharmacology & Toxicology* 73, 20-23 (1993).
  64. Dalin, N. & Kristofersson, R. Physiological effects of a sublethal concentration of inhaled phenol on the rat. *Ann zool phen* 193-199 (1974).
  65. Sellakumar, A.R., Snyder, C.A., Solomon, J.J. & Albert, R.E. Carcinogenicity of formaldehyde and hydrogen chloride in rats. *Toxicology and Applied Pharmacology* 81, 401-406 (1985).
  66. Breneman, K.A., James, R.A., Gross, E.A. & Dorman, D.C. Olfactory neuron loss in adult male CD rats following subchronic inhalation exposure to hydrogen sulfide. *Toxicol Pathol* 28, 326-333 (2000).
  67. Johnson, B.L. et al. Effects on the peripheral nervous system of workers' exposure to carbon disulfide. *Neurotoxicology* 4, 53-65 (1983).
  68. Review of the one-hour ambient air quality standard for nitrogen dioxide technical support document. California Air resources Board, State of California Air resources Board technical Support Division. (1992).
  69. US EPA ORD NCEA Integrated Risk Information System (IRIS) Ammonia (CASRN 7664-41-7) | IRIS | US EPA. à <http://www.epa.gov/iris/subst/0422.htm>
  70. Aranyi, C., Vana, S.N., Bradof, J.N. & Sherwood, R. Effects of inhalation of red phosphorus/butyl rubber combustion products on alveolar macrophage responses in rats. *J Appl Toxicol* 8, 393-398 (1988).
  71. OMS Santé et qualité de l'air. (2011).à <http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs313/fr/index.html>
  72. Ciezlak unpublished report cited in OECD 2003, Organization for Economic Co-operation and Development Screening Information Data Set for Propylene Glycol Ethers. (1991).
  73. El Ghawabi, S.H. et al. Chronic cyanide exposure: a clinical, radioisotope, and laboratory study. *Br J Ind Med* 32, 215-219 (1975).
  74. NCI Bioassay of 2,4,6-trichlorophenol for possible carcinogenicity. National Cancer Institute (1979).

75. DERRYBERRY, O.M., BARTHOLOMEW, M.D. & FLEMING, R.B. Fluoride exposure and worker health. The health status of workers in a fertilizer manufacturing plant in relation to fluoride exposure. *Arch. Environ. Health* 6, 503-514 (1963).
76. Kodavanti, U.P., Costa, D.L., Giri, S.N., Starcher, B. & Hatch, G.E. Pulmonary structural and extracellular matrix alterations in Fischer 344 rats following subchronic phosgene exposure. *Fundam Appl Toxicol* 37, 54-63 (1997).
77. US EPA ORD NCEA Integrated Risk Information System (IRIS) Benzo[a]pyrene (BaP) (CASRN 50-32-8) | IRIS | US EPA. à <<http://www.epa.gov/iris/subst/0136.htm>>
78. Baars, A., Theleen, R., Janssen, P. & Hesse, J. Re-evaluation of human-toxicological maximum permissible risk levels RIVM. report 711 701 025, (2001).
79. Enterline, P.E., Day, R. & Marsh, G.M. Cancers related to exposure to arsenic at a copper smelter. *Occup Environ Med* 52, 28-32 (1995).
80. Järup, L., Pershagen, G. & Wall, S. Cumulative arsenic exposure and lung cancer in smelter workers: a dose-response study. *Am. J. Ind. Med* 15, 31-41 (1989).
81. Tseng, W.P. Effects and dose--response relationships of skin cancer and blackfoot disease with arsenic. *Environ. Health Perspect* 19, 109-119 (1977).
82. Enterline, P.E., Henderson, V.L. & Marsh, G.M. Exposure to arsenic and respiratory cancer. A reanalysis. *Am. J. Epidemiol* 125, 929-938 (1987).
83. Til, H.P., Feron, V.J. & Immel, H.R. Lifetime (149-week) oral carcinogenicity study of vinyl chloride in rats. *Food Chem. Toxicol* 29, 713-718 (1991).
84. Feron, V., Hendriksen, C., Speek, A., Til, H. & Spit, B. Lifespan oral toxicity study of vinyl chloride in rats. *Food and Cosmetics Toxicology* 19, 317-333 (1981).
85. Thornton, S.R. et al. Embryo-Fetal Developmental and Reproductive Toxicology of Vinyl Chloride in Rats. *Toxicological Sciences* 68, 207 -219 (2002).
86. Sokal, J.A. et al. Experimental studies on the chronic toxic effects of vinyl chloride in rats. *J Hyg Epidemiol Microbiol Immunol* 24, 285-294 (1980).
87. Clewell, H.J., Gentry, P.R., Gearhart, J.M., Allen, B.C. & Andersen, M.E. Considering pharmacokinetic and mechanistic information in cancer risk assessments for environmental contaminants: examples with vinyl chloride and trichloroethylene. *Chemosphere* 31, 2561-2578 (1995).
88. Maltoni, C., Lefemine, G., Ciliberti, A., Cotti, G. & Carretti, D. Carcinogenicity Bioassays of Vinyl Chloride Monomer: A Model of Risk Assessment on an Experimental Basis. *Environmental Health Perspectives* 41, 3-29 (1981).
89. Drew, R.T. et al. The effect of age and exposure duration on cancer induction by a known carcinogen in rats, mice, and hamsters. *Toxicol. Appl. Pharmacol* 68, 120-130 (1983).
90. Waxweiler, R.J. et al. NEOPLASTIC RISK AMONG WORKERS EXPOSED TO VINYL

- CHLORIDE. Ann NY Acad Sci 271, 40-48 (1976).
91. Melnick, R.L., Huff, J., Chou, B.J. & Miller, R.A. Carcinogenicity of 1,3-butadiene in C57BL/6 x C3H F1 mice at low exposure concentrations. Cancer Res 50, 6592-6599 (1990).
  92. BCDHS Report on chlorinated dioxins and dibenzofurans. Part B. Health effects of chlorinated dioxins and dibenzofurans California Department of Health Services. (1986).
  93. Ferroni, C. et al. Neurobehavioral and neuroendocrine effects of occupational exposure to perchloroethylene. Neurotoxicology 13, 243-247 (1992).
  94. Härkönen, H., Lindström, K., Seppäläinen, A.M., Asp, S. & Hernberg, S. Exposure-response relationship between styrene exposure and central nervous functions. Scand J Work Environ Health 4, 53-59 (1978).
  95. ATSDR Minimal Risk Levels (MRLs) for Hazardous Substances. à <http://www.atsdr.cdc.gov/mrls/mrllist.asp>
  96. Andersen, I. et al. Human response to controlled levels of toluene in six-hour exposures. Scand J Work Environ Health 9, 405-418 (1983).
  97. Aranyi, C., Henry, M., Vana, S. & Iverson, W. Effects of multiple intermittent inhalation exposures to red phosphorus/butyl rubber obscurant smokes in Sprague-Dawley rats. Inhal. Toxicol 65-78
  98. OEHHA Determination of Noncancer Chronic Reference Exposure Levels – Chronic Toxicity Summary – Fluorides including hydrogen fluoride. (2003).à [http://oehha.ca.gov/air/chronic\\_rels/pdf/2ApnA\\_Fluoride\\_Final.pdf](http://oehha.ca.gov/air/chronic_rels/pdf/2ApnA_Fluoride_Final.pdf)
  99. USEPA Toxicological Review of phosgene. (2005).à <http://www.epa.gov/iris/toxreviews/0487tr.pdf>
  100. Niosh Interim Guidance for Protecting Deepwater Horizon Response Workers and Volunteers. à <http://www.cdc.gov/niosh/topics/oilspillresponse/protecting/>
  101. INRS Mélange de vapeurs d'hydrocarbures de C6 à C12. (2009).à [http://www.inrs.fr/inrs-pub/inrs01.nsf/inrs01\\_metropol\\_view/24D21362F7224C76C125769C0044C225/\\$File/055.pdf](http://www.inrs.fr/inrs-pub/inrs01.nsf/inrs01_metropol_view/24D21362F7224C76C125769C0044C225/$File/055.pdf)
  102. INRS Dérivés halogénés des hydrocarbures aliphatiques. 029 (2009).à [http://www.inrs.fr/inrs-pub/inrs01.nsf/inrs01\\_metropol\\_view/6C7F01F7A3A0A8F3C125769C0044C2A5/\\$File/029.pdf](http://www.inrs.fr/inrs-pub/inrs01.nsf/inrs01_metropol_view/6C7F01F7A3A0A8F3C125769C0044C2A5/$File/029.pdf)
  103. INRS Hydrocarbures aromatiques. (2009).à [http://www.inrs.fr/inrs-pub/inrs01.nsf/inrs01\\_metropol\\_view/2C8A29AE4D7A326FC1256D5C0041BC9A/\\$File/012.pdf](http://www.inrs.fr/inrs-pub/inrs01.nsf/inrs01_metropol_view/2C8A29AE4D7A326FC1256D5C0041BC9A/$File/012.pdf)

104. INRS Prélèvement passif Badge Gabie. (2007).à <[http://www.inrs.fr/inrs-pub/inrs01.nsf/inrs01\\_metropol\\_view/3FE90AC61F69E56CC1256D5C0041FC9A/\\$File/MetC.pdf](http://www.inrs.fr/inrs-pub/inrs01.nsf/inrs01_metropol_view/3FE90AC61F69E56CC1256D5C0041FC9A/$File/MetC.pdf)>
105. INRS Arsenic,arsine,phosphine,stibine. (2003).à <[http://www.inrs.fr/inrs-pub/inrs01.nsf/inrs01\\_metropol\\_view/2AC9C0D8E1E04B02C1256D5C0041C095/\\$File/023.pdf](http://www.inrs.fr/inrs-pub/inrs01.nsf/inrs01_metropol_view/2AC9C0D8E1E04B02C1256D5C0041C095/$File/023.pdf)>
106. INRS aldéhydes. (2007).à <[http://www.inrs.fr/inrs-pub/inrs01.nsf/inrs01\\_metropol\\_view/C1C50C431F19A2EFC1256D59003715C0/\\$File/001.pdf](http://www.inrs.fr/inrs-pub/inrs01.nsf/inrs01_metropol_view/C1C50C431F19A2EFC1256D59003715C0/$File/001.pdf)>
107. INRS 1,3-BUTADIENE par chromatographie en phase gazeuse. (2003).à <[http://www.inrs.fr/inrs-pub/inrs01.nsf/inrs01\\_metropol\\_view/528F06D2C0EA677BC1256D5C00423B8F/\\$File/076.pdf](http://www.inrs.fr/inrs-pub/inrs01.nsf/inrs01_metropol_view/528F06D2C0EA677BC1256D5C00423B8F/$File/076.pdf)>
108. AFNOR C20-924 7-2 PR AFNOR : C20-924-7-2PR, PR NF EN 60695-7-2, Avant-projet de norme soumis à enquête publique jusqu'au 15 mai 2010 (essais relatifs aux risques du feu, toxicité des effluents du feu - Résumé et pertinence des méthodes d'essai. (2010).
109. ISO 19703:2010 Production et analyse des gaz toxiques dans le feu -- Calcul des taux de production des espèces, des rapports d'équivalence et de l'efficacité de combustion dans les feux expérimentaux. (2010).
110. Xylène. (2009).à <[http://www.reptox.csst.qc.ca/Produit.asp?no\\_produit=92619&nom=Xyl%E8ne](http://www.reptox.csst.qc.ca/Produit.asp?no_produit=92619&nom=Xyl%E8ne)>
111. SJCPHS PULMONARY INTOXICANTS. à <[http://www.sjcphs.org/healthcare\\_providers/Documents/05%20Terrorism%20Agents/28%20Pulmonary%20Intoxicants.pdf](http://www.sjcphs.org/healthcare_providers/Documents/05%20Terrorism%20Agents/28%20Pulmonary%20Intoxicants.pdf)>
112. OEHHA *Hydrogen chloride*. (2010).à <[http://oehha.ca.gov/air/chronic\\_rels/pdf/7647010.pdf](http://oehha.ca.gov/air/chronic_rels/pdf/7647010.pdf)>
113. OMS Santé et qualité de l'air. (2008).à <<http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs313/fr/index.html>>
114. INRS Base de données métropol. à <[http://www.inrs.fr/htm/frame\\_constr.html?frame=/INRS-PUB/inrs01.nsf/IntranetObject-accesParReference/Rubrique9b/%24File/Visu.html](http://www.inrs.fr/htm/frame_constr.html?frame=/INRS-PUB/inrs01.nsf/IntranetObject-accesParReference/Rubrique9b/%24File/Visu.html)>
115. INRS *Performances des pompes de prélèvement individuel*. (2008).