

# PENTABROMODIPHENYLETHERS

---

Dernière mise à jour : 10/06/2013

## RESPONSABLE DU PROGRAMME

J.-M. BRIGNON : [JEAN-MARC.BRIGNON@INERIS.FR](mailto:JEAN-MARC.BRIGNON@INERIS.FR)

## EXPERTS AYANT PARTICIPÉ A LA REDACTION

A. GOUZY : [AURELIEN.GOUZY@INERIS.FR](mailto:AURELIEN.GOUZY@INERIS.FR)

*Veillez citer ce document de la manière suivante :*  
INERIS, 2012. Données technico-économiques sur les substances chimiques en France : Pentabromodiphényléthers, DRC-12-126866-13678A, 43 p. (<http://rsde.ineris.fr/> ou <http://www.ineris.fr/substances/fr/>)

# PENTABROMODIPHENYLETHERS

## RESUME

Les pentabromodiphényléthers (pentaBDE) ont été très largement utilisés en tant que retardateurs de flamme et incorporés dans certains produits de consommation. Le pentabromodiphényléther commercial (c-pentaBDE) est constitué d'un mélange de congénères<sup>1</sup> du diphényléther bromé dont les composants principaux sont le 2,2', 4,4'-tétrabromodiphényléther (BDE-47, CAS 40088-47-9) et le 2,2', 4,4',5-pentabromodiphényléther (BDE-99, CAS 32534-81-9), qui présentent la concentration la plus élevée en terme de masse par rapport aux autres composants du mélange.

Dans de nombreux pays, les activités de production et d'utilisation de ces substances sont très réglementées : par exemple, en Europe, aux Etats Unis, Chine, en Australie ou au Canada, elles sont interdites et ont par conséquent disparues. Il reste cependant la problématique de l'importation de produits contenant du pentaBDE en provenance d'autres pays qui ne sont pas soumis aux mêmes restrictions. Ces produits sont difficilement contrôlables et demeurent des sources importantes de pentaBDE dans l'environnement.

Le pentaBDE peut être libéré dans l'environnement :

- pendant la fabrication du produit commercial,
- pendant la fabrication d'articles traités au pentaBDE,
- pendant l'utilisation de ces articles,
- lors de l'élimination de ces articles comme déchets.

Bien que la production du c-pentaBDE ait été très fortement réduite dans le monde ces dernières années, plusieurs articles en contenant seront toujours utilisés dans les années à venir d'où une potentielle libération de la substance dans l'environnement. De plus, à la fin de leur cycle de vie, ces articles deviendront des déchets et pourraient induire de nouvelles émissions dans l'environnement lors de leur destruction.

Au début des années 2000, en Amérique du Nord et en Europe occidentale, la principale source était constituée par le c-pentaBDE incorporé dans la mousse de polyuréthane, utilisée dans le mobilier à usage domestique et urbain. A présent, cette utilisation a pratiquement cessé.

Quant aux autres usages (les textiles, les composants électriques et électroniques, les matériaux de construction, les véhicules, les avions, les conditionnements, les huiles de forage liquides et les produits à base de caoutchouc), l'information est très limitée et ne permet pas d'en tirer des conclusions.

Le pentaBDE peut être émis dans l'air, l'eau et le sol, mais est retrouvé principalement dans les sols et les sédiments. La répartition entre ces domaines environnementaux est : sol > eau > air. Plusieurs études basées sur des carottes de sédiments indiquent que le pentaBDE

<sup>1</sup> Congénère fait référence en chimie à l'une des nombreuses variantes ou configurations d'une même structure chimique, ici le diphényléther bromé.

# PENTABROMODIPHENYLETHERS

est persistant dans les sédiments marins. D'autre part, plusieurs études indiquent que le pentaBDE présent dans le sol et dans les sédiments est bio-disponible. C'est en outre une substance bioaccumulable, qui se bioconcentre en remontant les réseaux trophiques induisant des taux élevés chez les grands prédateurs (UNEP, 2006) tels que l'Homme.

Le pentaBDE est largement répandu dans l'environnement. La plupart des analyses indiquent une augmentation rapide des concentrations de pentaBDE dans l'environnement et chez les êtres humains depuis le début des années 1970 jusqu'au milieu ou la fin des années 1990 atteignant des concentrations stationnaires dans certaines régions vers les années 90 mais continuant à augmenter dans d'autres.

De nombreuses alternatives au pentaBDE ont été développées depuis son interdiction dans de nombreux pays, celles-ci sont le plus souvent spécifiques à une utilisation du pentaBDE. Pour certaines de ces alternatives, nous ne possédons que peu d'information à l'heure actuelle. Il est également très difficile d'évaluer l'évolution de la production et de la consommation de pentaBDE dans les pays qui n'ont pas interdit ces pratiques.

# PENTABROMODIPHENYLETHERS

## SOMMAIRE

1	GÉNÉRALITÉS .....	5
1.1	DEFINITION .....	5
1.2	CARACTÉRISTIQUES CHIMIQUES .....	7
1.3	RÉGLEMENTATION .....	7
1.4	CLASSIFICATION ET ÉTIQUETAGE.....	12
1.5	SOURCES DE PENTA-BDE.....	14
2	PRODUCTION ET UTILISATION.....	15
2.1	PRODUCTION ET VENTE .....	15
2.2	SECTEURS D'UTILISATION .....	16
3	REJETS DANS L'ENVIRONNEMENT.....	18
3.1	EMISSIONS INDUSTRIELLES ATMOSPHÉRIQUES .....	18
3.2	EMISSIONS INDUSTRIELLES VERS LES MILIEUX AQUATIQUES .....	19
3.3	EMISSIONS DIFFUSES LIEES AUX EPANDAGES DE BOUES .....	21
3.4	EMISSIONS DUES AUX DECHETS CONTENANT DU PENTABDE .....	21
3.5	REJETS LIES A L'UTILISATION DE PRODUITS .....	21
3.6	FACTEURS D'EMISSIONS.....	23
4	DEVENIR ET PRÉSENCE DANS L'ENVIRONNEMENT.....	24
4.1	COMPORTEMENT DANS L'ENVIRONNEMENT .....	24
4.2	PRESENCE DANS L'ENVIRONNEMENT .....	25
5	PERSPECTIVES DE RÉDUCTION DES EMISSIONS .....	29
5.1	PRODUITS ALTERNATIFS .....	29
5.2	TRAITEMENT DES REJETS INDUSTRIELS.....	34
5.3	TECHNOLOGIES EMERGENTES DE RÉDUCTION DES ÉMISSIONS.....	34
6	CONCLUSION.....	35
7	LISTE DES ABREVIATIONS .....	37
8	BIBLIOGRAPHIE.....	39

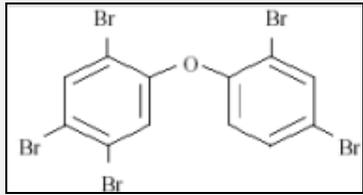
# PENTABROMODIPHENYLEETHERS

## 1 GÉNÉRALITÉS

### 1.1 DEFINITION

Le tableau 1 présente les caractéristiques principales de la molécule de pentaBDE.

Tableau 1 : Présentation du pentaBDE.

Substance chimique	N° CAS	N° EINECS	Synonymes	Formule chimique
<b>Pentabromodiphényléthers</b> C <sub>12</sub> H <sub>5</sub> Br <sub>5</sub> O	32534-81-9	251-084-2	pentaBDE PBDE	

Les pentabromodiphényléthers (CAS 32534-81-9) recouvrent un très grand nombre d'isomères différents, de formule C<sub>12</sub>H<sub>5</sub>Br<sub>5</sub>O.

La formule développée représentée dans le Tableau ci-dessus est celle du 2,2',4,4',5-pentaBDE. C'est un des 46 congénères du pentaBDE.

Les pentabromodiphényléthers peuvent être désignés par l'abréviation PBDE mais il existe un risque de confusion car cette même abréviation peut également désigner le terme polybromodiphényléthers (famille dans laquelle figurent les pentabromodiphényl-éthers et d'autres molécules comme les octabromodiphényléthers ou les décabromo-diphényléthers : il y a un total de 209 isomères dans la famille des polyBDE).

Sous la forme commerciale utilisée en dehors des laboratoires, les polyBDE sont constitués d'un mélange de différents isomères de pentabromodiphényléthers et d'autres polybromodiphényléthers (dont les tétra, octo et décaBDE). Les polybromodiphényléthers autres que le pentaBDE peuvent couramment représenter plus de 30 % du poids du produit commercial.

Les solutions commerciales de pentaBDE (c-pentaBDE) sont en fait elles-mêmes un mélange de pentaBDE et d'autres polyBDE et, dans ces appellations commerciales, la distinction entre pentaBDE et polyBDE n'est pas toujours clairement faite.

D'autres polybromodiphényléthers que les pentaBDE comme les octobromodiphényléthers et les décabromodiphényléthers peuvent aussi être spécifiquement utilisés comme retardateurs

# PENTABROMODIPHENYLETHERS

de flamme. Leur forme commerciale ne contient que très peu de pentaBDE (JRC, 2003 ; Rahman, 2001).

En revanche, les pentaBDE pourraient être un sous-produit de dégradation d'autres polyBDE (comme les hexa, hepta, nona, octo et décaBDE) dans l'environnement (Rahman, 2001). Les solutions d'octoBDE et de décaBDE pourraient donc être une source indirecte de la présence de pentaBDE dans les ressources en eau. À noter également que d'autres composés (notamment les heptaBDE, d'après JRC, 2003) sont très présents dans les solutions commerciales d'octoBDE, ce qui peut causer une production indirecte de pentaBDE via l'emploi de solutions commerciales d'octoPBDE. Cependant, la contribution de la dégradation des octoBDE et décaBDE aux niveaux environnementaux de pentaBDE actuels est jugée négligeable par (Peltola, 2000). La dégradation de décaBDE en polyBDE divers dans l'environnement est clairement attestée mais la nature des polyBDE formés et leur importance relative reste mal connue (JRC, 2002).

La composition typique des solutions commerciales de pentaBDE, octaBDE et décaBDE est résumée sur la figure 1, extraite de (Peltola, 2000).

Dans cette fiche, nous considérerons uniquement la question de l'emploi et de la substitution des pentaBDE, qui est séparable de la question de l'emploi et de la substitution des octo et décaBDE, en donnant quelques informations sur l'emploi des octo et décaBDE.

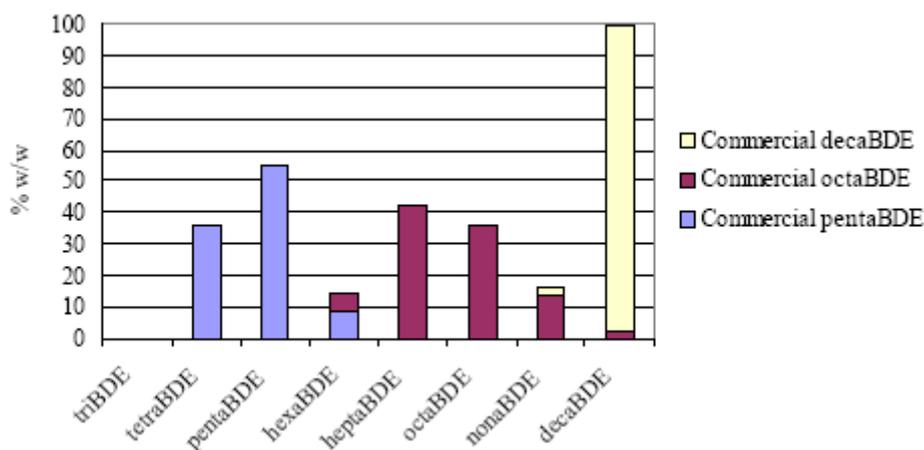


Figure 1 : Composition typique (en poids) des solutions de pentaBDE, octoBDE et decaBDE (Peltola, 2000).

# PENTABROMODIPHENYLETHERS

## 1.2 CARACTÉRISTIQUES CHIMIQUES

Le Tableau 1, ci-avant, présente les principales caractéristiques chimique du pentaBDE. Dans les conditions habituelles ambiantes, le pentaBDE est un liquide clair, ambré à jaune pâle relativement visqueux. Son point de fusion se trouve entre -7 et -3 °C et son point d'ébullition est supérieur à 300 °C ; il commence à se décomposer à partir de 200 °C.

## 1.3 RÉGLEMENTATION

### 1.3.1 LEGISLATION EUROPEENNE

La directive européenne 2003/11/CE du 6 février 2003<sup>2</sup> a interdit la mise sur le marché et l'emploi des pentaBDE et octoBDE dans des solutions à des concentrations supérieures à 0,1 % en masse, ainsi que la mise sur le marché d'articles si eux-mêmes ou des parties d'eux-mêmes agissant comme des retardateurs de flamme contiennent plus de 0,1 % en masse de pentaBDE ou d'octoBDE. Ces dispositions étaient applicables depuis le 14 août 2004 et sont toujours en vigueur en 2013.

La directive 2011/65/UE relative à la limitation de l'utilisation de certaines substances dangereuses dans les **équipements électriques et électroniques** stipule que les États membres veillent à ce que les équipements électriques et électroniques (EEE) mis sur le marché, y compris les câbles et les pièces détachées destinées à leur réparation, à leur réemploi, à la mise à jour de leurs fonctionnalités ou au renforcement de leur capacité, ne contiennent aucune des substances énumérées à l'annexe II, notamment les polyBDE, à une concentration supérieur à la concentration maximale tolérée en poids dans les matériaux homogènes de 0,1 %.

Cette directive remplace la directive 2002/95/CE, dite « RoHS » portant sur la restriction de l'utilisation de certaines substances dangereuses dans les équipements électriques et électroniques. Cette ancienne version avait, jusqu'en juin 2008, exempté le decaBDE des restrictions imposées aux autres polyBDE, et en avait fait une alternative intéressante au pentaBDE (voir paragraphe 6.1).

Ces différentes restrictions d'utilisation des pentabromodiphényléthers sont reprises à l'annexe XVII du règlement REACH<sup>3</sup>.

<sup>2</sup> Directive 2003/11/CE du Parlement européen et du Conseil du 6 février 2003 portant vingt-quatrième modification de la directive 76/769/CEE du Conseil relative à la limitation de la mise sur le marché et de l'emploi de certaines substances et préparation dangereuses (pentabromodiphényléther, octobromodiphényléther).

<sup>3</sup> REACH : Registration, evaluation and authorization of chemicals - Enregistrement, évaluation, autorisation et restriction des produits chimiques. Règlement (CE) n° 1907/2006 du Parlement européen et du conseil concernant

# PENTABROMODIPHENYLETHERS

Le pentabromobiphényléther figure dans la **liste des substances prioritaires de la directive 2000/60/CE du 23 octobre 2000 du Parlement et du Conseil établissant un cadre pour une politique communautaire dans le domaine de l'eau**. Les priorités concernant les mesures à prendre à l'égard de ces substances sur la base du risque pour ou via l'environnement aquatique sont établies par :

- une évaluation du risque conforme au règlement (CEE) no 793/93 du Conseil<sup>4</sup>, à la directive 91/414/CEE du Conseil<sup>5</sup> et à la directive 98/8/CE du Parlement européen et du Conseil<sup>6</sup>, ou
- une évaluation ciblée en fonction du risque [selon la méthodologie du règlement (CEE) no 793/93] axée uniquement sur l'écotoxicité aquatique et sur la toxicité pour l'homme via l'environnement aquatique.

Si cela est nécessaire afin de respecter le calendrier fixé, les priorités concernant les mesures à prendre à l'égard de ces substances sont établies sur la base du risque pour ou via l'environnement aquatique déterminé par une procédure simplifiée d'évaluation en fonction du risque, fondée sur des principes scientifiques et tenant particulièrement compte :

- Des données concernant le danger intrinsèque de la substance en cause et, en particulier, son écotoxicité aquatique et sa toxicité pour l'homme via les voies aquatiques d'exposition ;
- Des données de la surveillance attestant une contamination étendue de l'environnement ;
- D'autres facteurs éprouvés pouvant indiquer la possibilité d'une contamination étendue de l'environnement, tels que le volume de production ou le volume utilisé de la substance en cause, et les modes d'utilisation.

Le pentaBDE figure parmi les substances strictement réglementées par la Commission Européenne en ce qui concerne leur importation et exportation. Il figure à **l'annexe V, partie 1, du règlement (CE) n° 689/2008** parmi la liste des produits chimiques et articles interdits d'exportation.

## 1.3.2 LEGISLATION NATIONALE

En France, le décret n° 2004-1227 du 17 novembre 2004 relatif aux conditions de mise sur le marché et d'emploi de l'arsenic et de ses composés, du colorant bleu, du

---

l'enregistrement, l'évaluation et l'autorisation des substances chimiques, ainsi que les restrictions applicables à ces substances (REACH) en ce qui concerne l'annexe XVII.

<sup>4</sup> JO L 84 du 5.4.1993, p. 1.

<sup>5</sup> JO L 230 du 19.8.1991, p. 1. Directive modifiée par la directive 98/47/CE (JO L 191 du 7.7.1998, p. 50).

<sup>6</sup> JO L 123 du 24.4.1998, p. 1.

# PENTABROMODIPHENYLETHERS

pentabromodiphényléther et de l'octobromodiphényléther et modifiant le décret n° 92-1074 du 2 octobre 1992, stipule que :

- Le diphényléther, dérivé pentabromé et le diphényléther, dérivé octabromé, ne peuvent pas être mis sur le marché ou utilisés en tant que substances ou composants de substances ou de préparations à des concentrations supérieures à 0,1 % en masse.
- Il est également interdit de mettre sur le marché des produits manufacturés ou éléments de produits manufacturés agissant comme retardateurs de flamme contenant ces substances à des concentrations supérieures à 0,1 % en masse.

Le tétra, penta, hexa et hepta bromodiphényléther figurent sur la liste des substances dangereuses de l'arrêté concernant la pollution des eaux souterraines<sup>7</sup> et doivent par conséquent être pris en compte dans les Schémas Directeur d'Aménagement et de Gestion des eaux (SDAGE<sup>8</sup>).

Le pentabromodiphényléther fait également partie des substances à suivre pour la surveillance de la qualité des eaux de surface<sup>9</sup> au titre de la circulaire du 13 juillet 2006 qui permet la transposition de la directive 2000/60/CE du 23 octobre 2000 du Parlement et du Conseil établissant un cadre pour une politique communautaire dans le domaine de l'eau.

L'arrêté du 31 janvier 2008 relatif au registre et à la déclaration annuelle des émissions polluantes et des déchets (IREP) définit des seuils de rejets de différents polluants dans l'air, l'eau et le sol. Ce texte crée en outre l'obligation de renseigner le registre européen pour les installations visées dont les émissions polluantes ou la production de déchets dépassent les seuils fixés. Le pentabromodiphényléther fait partie des polluants concernés avec une limitation à 0 kg/an dans l'eau et 0 kg/an dans le sol. Cependant deux congénères du pentaBDE sont également listés dans cet arrêté avec un seuil de rejet dans l'eau de 2 g/jour :

- Le 2,2',4,4',5-pentabromodiphényléther (BDE-99, CAS 32534-81-9) ;
- Le 2,2',4,4',6-pentabromodiphényléther (BDE-100, CAS 189084-64-8).

Les chiffres des émissions de polyBDE issus du registre français des émissions polluantes (IREP) sont présentés dans le paragraphe 3.2.1 de la fiche.

<sup>7</sup> Arrêté du 17 juillet 2009 relatif aux mesures de prévention ou de limitation des introductions de polluants dans les eaux souterraines

<sup>8</sup> Institué par la loi sur l'eau de 1992, le SDAGE est un instrument de planification qui fixe pour chaque bassin hydrographique les orientations fondamentales d'une gestion équilibrée de la ressource en eau dans l'intérêt général et dans le respect des principes de la directive cadre sur l'eau et de la loi sur l'eau, des objectifs environnementaux pour chaque masse d'eau (plans d'eau, tronçons de cours d'eau, estuaires, eaux côtières, eaux souterraines).

<sup>9</sup> Circulaire du 13 juillet 2006 relative à la constitution et la mise en œuvre du programme de surveillance pour les eaux douces de surface en application de la directive 2000/60/CE du 23 octobre 2000 du Parlement et du Conseil établissant un cadre pour une politique communautaire dans le domaine de l'eau.

# PENTABROMODIPHENYLEETHERS

## 1.3.3 VALEURS UTILISÉES EN MILIEU DE TRAVAIL

Nous n'avons pas trouvé de valeurs spécifiques en milieu du travail.

## 1.3.4 VALEURS UTILISÉES POUR LA POPULATION GÉNÉRALE

Nous n'avons pas trouvé de valeurs spécifiques pour la population générale.

## 1.3.5 NORME DE QUALITE ENVIRONNEMENTALE (NQE)

La Directive 2008/105/CE du Parlement européen et du Conseil du 16 décembre 2008 établissant des normes de qualité environnementale dans le domaine de l'eau, modifiant et abrogeant les directives du Conseil 82/176/CEE, 83/513/CEE, 84/156/CEE, 84/491/CEE, 86/280/CEE et modifiant la directive 200/60/CE fixe des normes de qualité environnementale pour le pentabromodiphényléther qui fait partie des substances dangereuses prioritaires. Le tableau 2 présente ces normes.

Tableau 2 : Norme de qualité environnementale concernant le pentaBDE.

	NQE-MA Eaux de surface intérieures <sup>10</sup>	NQE-MA Autres eaux de surface <sup>11</sup>	NQE-CMA Eaux de surface intérieures <sup>10</sup>	NQE-CMA Autres eaux de surface
Pentabromodiphényléther	0,0005 µg/L	0,0002 µg/L	Non calculée	Non calculée

MA : Moyenne Annuelle

CMA : Concentration Maximale Admissible

Cette NQE remplace la NQE provisoire(NQE<sub>p</sub>) fixée par la Circulaire française du 7 Mai 2007, définissant les « normes de qualité environnementale provisoires (NQE<sub>p</sub>) » des 41 substances impliquées dans l'évaluation de l'état chimique des masses d'eau ainsi que des substances pertinentes du programme national de réduction des substances dangereuses dans l'eau.

<sup>10</sup> Rivières, lacs et masses d'eau superficielles

<sup>11</sup> Eaux de transition, eaux côtières et eaux territoriales

# PENTABROMODIPHENYLETHERS

## 1.3.6 AUTRES TEXTES

### 1.3.6.1 Appartenance à la liste des Polluants Organiques Persistants (POP)

Les Polluants Organiques Persistants (POP) sont des « produits chimiques qui demeurent intacts dans l'environnement pendant longtemps, sont largement répandus géographiquement, s'accumulent dans les organismes vivants et peuvent être néfastes pour les êtres humains et l'environnement »<sup>12</sup>.

En 1998, la commission OSPAR<sup>13</sup> a inscrit les PBDE sur sa « liste de produits chimiques en vue d'une action prioritaire ».

Depuis Mai 2009 et la quatrième réunion de la Conférence des Parties de la Convention de Stockholm sur les POP, le pentabromodiphényléther a été ajouté à la liste des substances<sup>14</sup> qui doivent être éliminées aussi bien en termes de production que d'usage à quelques exceptions près telles que notamment le recyclage.

### 1.3.6.2 Réglementation dans les autres pays

De nombreux pays ont pris des mesures pour limiter voire interdire la production et l'usage du pentabromodiphényléther (UNEP, 2007). :

- Le gouvernement Canadien a complété le Règlement sur les polybromodiphényléthers entré en vigueur le 19 juin 2008 en interdisant la fabrication de polyBDE sur le territoire, en limitant l'importation, l'utilisation et la vente de PBDE que l'on trouve dans les mélanges commerciaux notamment les penta et octo-BDE).
- L'Australie a interdit l'usage du pentabromodiphényléther dans les nouveaux articles. L'importation de produits contenant des retardateurs de flamme bromés n'est pas réglementée.
- Aux Etats-Unis depuis 2005, la production du pentabromodiphényléther a cessé et son utilisation est interdite dans certains Etats (Californie et Hawaii).
- En Norvège et en Suisse, la production, l'importation, l'exportation, la mise sur le marché et l'utilisation de pentabromodiphényléther et de mélange qui en contiennent 0,1 % en poids ou plus sont interdites. La Norvège a également interdit le recyclage et

<sup>12</sup> Rapport du Comité d'étude des polluants organiques persistants sur les travaux de sa deuxième réunion - Projet de descriptif des risques sur le pentabromodiphényléther - Programme des Nations Unies pour l'Environnement - 21 Novembre 2006.

<sup>13</sup> OSPAR : OSPAR Commission, protecting and conserving the North-East Atlantic and its resources - Commission pour la protection et la conservation du milieu marin de l'Atlantique du Nord-Est et ses ressources.

<sup>14</sup>Convention de Stockholm : <http://chm.pops.int/Convention/ThePOPs/ListingofPOPs/tabid/2509/Default.aspx>

# PENTABROMODIPHENYLETHERS

la réutilisation de produits à base de pentabromodiphényléther et de matériaux qui en renferment.

- Depuis le 1<sup>er</sup> Mars 2007, la Chine a interdit l'utilisation de pentabromodiphényléther dans les produits électriques et électroniques.

## 1.4 CLASSIFICATION ET ÉTIQUETAGE

### 1.4.1 CLASSIFICATION ET ETIQUETAGE DU PBDE

Afin d'unifier les différents systèmes nationaux de classification et d'étiquetage des produits chimiques dangereux des pays de l'Union Européenne, le Système Général Harmonisé a été créé. La classification du pentabromodiphényléther est d'après la commission européenne (2009 ; Règlement CE n°1272/2008). Les tableaux 3 et 4 présentent les éléments de classification du pentaBDE.

Tableau 3 : Présentation des éléments de classification et d'étiquetage du pentaBDE.

Système Global Harmonisé (SGH) (règlement (CE) n° 790/2009 de la Commission du 10 août 2009)		
Classification	Etiquetage	
Codes des mentions de danger	Code des pictogrammes mention d'avertissement	Code des mentions des dangers
H362 H373 H400 H410	GHS09 GHS08	H362 H373 H400 H410

# PENTABROMODIPHENYLETHERS

Tableau 4 : Définition des phrases de risques et pictogrammes de danger du pentaBDE.

Code de danger et information additionnelle	
H362	Peut être nocif pour les bébés nourris au lait maternel
H373	Risque présumé d'effets graves pour les organes à la suite d'expositions répétées ou d'une exposition prolongée
H400	Très toxique pour les organismes aquatiques
H410	Très toxique pour les organismes aquatiques, entraîne des effets néfastes à long terme
Pictogrammes	
GHS08	 Sensibilisant, mutagène, cancérigène, reprotoxique
GHS09	 Dangereux pour l'environnement

## 1.4.2 TOXICITE

La toxicité du pentaBDE a été mise en évidence dans de nombreuses études notamment aux Etats-Unis où des composants du pentaBDE ont été retrouvés chez l'Homme.

Des études toxicologiques ont montré que le pentaBDE avait des effets sur les organismes aquatiques et les mammifères concernant<sup>15</sup> :

- La reproduction ;
- Le développement cérébral ;
- Les hormones thyroïdiennes.

Les effets neurotoxiques du pentaBDE semblent similaires à ceux observés pour les Polychlorobiphényles (PCB) ; les enfants exposés au pentaBDE pourront être sujets à des problèmes de développement.

Bien que les résultats sur le sujet soient limités, le pentaBDE est également soupçonné d'être un perturbateur endocrinien.

<sup>15</sup> Guidance on alternative flame retardants to the use of commercial pentabromodiphenylether (c-pentaBDE) - The Norwegian Pollution Control Authority - February 2009

# PENTABROMODIPHENYLEETHERS

## 1.5 SOURCES DE PENTA-BDE

Le pentaBDE est une substance d'origine anthropique, néanmoins, une origine naturelle anecdotique en milieu marin est évoquée par Rahman (2001). En effet certaines éponges disposent d'enzymes permettant de produire des métabolites fortement bromés à partir des faibles concentrations de brome des eaux de mer. Le pentaBDE ne serait qu'un seul parmi plusieurs de ces métabolites bromés.

Le pentaBDE se retrouve principalement dans les produits manufacturés contenant des mousses en polyuréthane ou des articles en polyuréthane non expansé (UNEP, 2006).

# PENTABROMODIPHENYLETHERS

## 2 PRODUCTION ET UTILISATION

### 2.1 PRODUCTION ET VENTE

Les pentaBDE ne sont produits ni en France, ni dans l'Union européenne. Les octoBDE et décaBDE ne le sont pas non plus (Dungey, 2001).

Tous les pentaBDE qui ont été consommés par le passé en France étaient importés. Les chiffres sur l'utilisation de ces produits résultent d'estimations sur des données anciennes et sont donc incertains. La consommation de pentaBDE dans l'Union européenne était ainsi estimée entre 1 100 t/an dans JRC (2001) et 125 t/an dans OSPAR (2001).

La production a cessé dans l'Union européenne des 15 en 1997 (UE, 2000).

#### 2.1.1 PRODUCTION

Les processus de synthèse des PBDE ne sont pas divulgués par les producteurs. Cependant il apparait que les PBDE (dont le pentaBDE fait partie) sont synthétisés à partir du diphenyl éther par bromation avec du brome élémentaire en présence d'un catalyseur « Fridel-Crafts » (à base de fer pulvérulent) selon EHESP (2010).

#### 2.1.2 DONNEES QUANTITATIVES

##### 2.1.2.1 A l'échelle de l'Union Européenne

Aucune information récente n'a été trouvée sur les quantités de pentaBDE importées et consommées en Union Européenne.

##### 2.1.2.2 A l'échelle internationale

Avant les années 2000, le pentaBDE était produit en Israël, au Japon (jusqu'en 1990) et aux Etats-Unis (UNEP, 2007).

# PENTABROMODIPHENYLETHERS

En se référant au site internet Chemical book<sup>16</sup> consulté en janvier 2013, on dénombre 5 fournisseurs chinois et 5 fournisseurs américains de pentaBDE.

Aucune information récente n'a été trouvée sur les quantités de pentaBDE produites suite aux restrictions réglementaires.

## 2.1.2.3 Prix du pentaBDE

Nous n'avons trouvé aucune information récente sur les prix de vente du pentaBDE.

## 2.2 SECTEURS D'UTILISATION

Dans le passé, les pentaBDE ont été utilisés dans des matières plastiques (résines phénoliques, PVC, polyesters insaturés, caoutchoucs), ainsi que dans des peintures et dans l'industrie textile, mais plusieurs sources signalent que ces usages auraient été abandonnés (Union Européenne, 2000 ; Rahman, 2001).

Les pentaBDE auraient été par la suite uniquement utilisés comme l'un des constituants majoritaire d'additifs retardateurs de flamme pour polyuréthanes dans les secteurs suivants (UNEP, 2007) :

- Appareils électriques et électroniques : ordinateurs, équipements électroniques ménagers, matériel de bureau, appareils ménagers et autres contenant des plaques de circuit imprimé en stratifié, boîtiers externes et pièces internes en plastique, notamment composants et boîtiers en polyuréthane rigide produits en petite série.
- Transport : automobiles, trains, avions et bateaux contenant des garnitures intérieures en tissu et plastique ainsi que des composants électriques.
- Matériaux de construction : mousses de remplissage, panneaux isolants, mousses isolantes, revêtements muraux et de sol, bâches plastiques, résines, etc.
- Mobilier : meubles rembourrés, revêtements, matelas, composants en mousse souple. Le c-pentaBDE entre également dans la fabrication d'emballages en mousse de polyuréthane.
- Textiles: rideaux, tapis, thibaudes de tapis, tentes, bâches, vêtements de travail et de protection.
- Emballages : emballages en mousse de polyuréthane.

<sup>16</sup> <http://www.chemicalbook.com/>

# PENTABROMODIPHENYLETHERS

## 2.2.1 SECTEURS D'UTILISATION DANS L'UNION EUROPEENNE

L'utilisation des pentaBDE a été abandonnée dans l'UE en conséquence de la réglementation communautaire (Cf. paragraphe 1.3).

A titre d'exemple en France, le syndicat national des plastiques alvéolaires (SNPA), qui regroupe les principaux fabricants de mousses souples en France, nous a indiqué que les pentaBDE n'étaient plus utilisés depuis 2005.

## 2.2.2 SECTEURS D'UTILISATION A L'ECHELLE MONDIALE

Plusieurs pays ont interdit l'utilisation des pentaBDE mais on ne peut pas se prononcer sur les pays en voie de développement qui ne sont pas soumis à la même réglementation et pour lesquels les données manquent en 2013. On peut cependant penser que l'utilisation des pentaBDE dans ces pays concorde avec les utilisations définies ci-dessus (UNEP 2007).

## 2.2.3 UTILISATIONS DES MELANGES DE PRODUITS CHIMIQUES

Le pentaBDE sous sa forme commerciale, appelé c-pentaBDE, est un mélange de retardateurs de flamme bromés dont les composants principaux sont :

- Le 2,2', 4,4'-tétrabromodiphényléther (BDE-47, CAS No. 40088-47-9) et
- le 2,2',4,4',5-pentabromodiphényléther (BDE-99, CAS No. 32534-81-9)

Ils présentent la concentration la plus élevée en termes de masse par rapport aux autres composantes du mélange (UNEP, 2006).

# PENTABROMODIPHENYLETHERS

## 3 REJETS DANS L'ENVIRONNEMENT

Les rejets des pentaBDE dans l'environnement ont lieu lors de la production puis au cours du cycle de vie des polymères contenant des pentaBDE.

Selon les fabricants, les émissions de pentaBDE dans l'environnement durant la production de c-pentaBDE sont essentiellement dues aux déchets de filtration et matériaux non conformes aux spécifications que l'on élimine par mise en décharge. Les eaux usées contenant des solutions de récurage peuvent également dégager du pentaBDE (RPA, 2000). Les émissions atmosphériques engendrées par la production de c-pentaBDE sont supposées inexistantes ou négligeables (RPA, 2000; Van der Goon *et al.*, 2005). D'autre part, selon l'UNEP (2007), les quantités émises durant la fabrication de produits contenant du c-pentaBDE sont faibles par rapport à celles liées à leur consommation.

Les apports de pentaBDE sont liés à l'importation de produits étrangers qui en sont en partie constitués (notamment des matériels électroniques provenant d'Asie, des textiles, etc.). Ces apports indirects seraient la principale voie d'entrée de pentaBDE dans l'UE via des matériaux. Il est actuellement très difficile et coûteux de mesurer le pentaBDE dans des produits finis : il est donc difficile de contrôler et de limiter l'entrée sur le territoire de l'UE de produits importés contenant des pentaBDE.

Au vu des diverses interdictions réglementaires, aucune émission due à la production du pentaBDE ne devrait être constatée dans l'Union Européenne.

On peut tout de même identifier plusieurs rejets de polyBDE en Europe et/ou en France selon deux bases de données :

- La base de données E-PRTR<sup>17</sup> pour les émissions de l'Union Européenne (UE 27) : 13 cas de rejets de polyBDE dans l'environnement en 2010 ont été rapportés (cf. paragraphe 3.2.1) ;
- Le registre Français des émissions polluantes (IREP<sup>18</sup>) qui rapporte les émissions de polyBDE des industriels français depuis 2003 (cf. paragraphe 3.2.1).

### 3.1 EMISSIONS INDUSTRIELLES ATMOSPHÉRIQUES

Les principales sources de rejets atmosphériques ponctuels sont les usines d'incinération des déchets ménagers, de recyclage des métaux ou d'autres matériaux contenant des pentaBDE (UNEP, 2007). Elles sont à l'origine de rejets atmosphériques. Cependant les bases de données IREP et E-PRTR ne recensent aucune émission de polyBDE à l'atmosphère.

<sup>17</sup> <http://prtr.ec.europa.eu/Home.aspx>

<sup>18</sup> <http://www.irep.ecologie.gouv.fr/IREP/index.php>

# PENTABROMODIPHENYLETHERS

## 3.2 EMISSIONS INDUSTRIELLES VERS LES MILIEUX AQUATIQUES

### 3.2.1 REJETS DES INDUSTRIES

Comme mentionné précédemment, selon la base de donnée E-PRTR 13 cas de rejets de polyBDE dans l'environnement aquatique ont été constatés en 2010 au sein de l'Union Européenne. Les polyBDE ont été détectés dans l'eau à raison de 39,7 kg.

Les rejets étaient dus à des installations

- de combustion de type usine de production thermique (18 %),
- de traitement des déchets ménagers (52 %)
- unités de prétraitement ou teinture de fibres ou de textiles (30 %).

Ces rejets étaient principalement localisés au Royaume-Uni<sup>19</sup>. Néanmoins aucune précision n'est apportée quand à la nature des polyBDE rejetés, il n'est donc pas possible de conclure qu'il s'agit de pentaBDE.

Le registre français des émissions polluantes (IREP) permet d'identifier plusieurs secteurs d'activité responsables d'émissions de polyBDE en France. Ce registre différencie les émissions directes dans l'eau de celles qui sont indirectes. Un rejet direct est défini comme un rejet isolé, après station d'épuration interne au site industriel ou directement dans le milieu naturel, un rejet indirect est défini comme un rejet raccordé à une station d'épuration extérieure à l'installation industrielle émettrice.

Le tableau 5 présente les émissions directes dans l'eau selon le secteur d'activité.

**Tableau 5 : Emissions directes pour les diphényléthers bromés en eau en kg/an selon le secteur d'activité (site internet de l'IREP<sup>20</sup>).**

Activité	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011
Sidérurgie, métallurgie, coke	0	0	0	0	0	0	0,099	0,046	0
Déchets et traitements	0	0	0	0	0,0050	0	0	0	0
Stations d'épuration urbaine de plus de 100 000 habitants	0	0	0	0	0	6,9	3,7	1,35	0
Total	0	0	0	0	0,0050	6,9	3,7	1,4	0

Le tableau 6 présente quant à lui les émissions indirectes dans l'eau selon le secteur d'activité.

<sup>19</sup> The European Pollutant Release and Transfer Register : <http://prtr.ec.europa.eu/PollutantReleases.aspx>

<sup>20</sup> <http://www.irep.ecologie.gouv.fr/IREP/index.php> Recherche par polluant (diphényléthers bromés) sur la période 2003 - 2011)

# PENTABROMODIPHENYLETHERS

**Tableau 6 : Emissions indirectes pour les diphenyléthers bromés en eau en Kg/an selon le secteur d'activité (site internet de l'IREP)**

Activité	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011
Textile et habillement, teinture, impression, laveries	0	0	0	0	0	0	0	2,1	1,84
Divers et services (centres hospitaliers)	0	0	0	0	0	0	0	0	0,019
Déchets et traitements	0	0	0	0	0,038	0,0058	0	0	0
Total	0	0	0	0	0,038	0,0058	0	2,1	1,86

Ces données portent sur l'ensemble des polyBDE et ce de façon ponctuelle mais ne permettent pas de suivre l'évolution spécifique des émissions de pentaBDE (même si certains secteurs industriels responsables d'émissions de polyBDE peuvent être identifiés par cette source).

## 3.2.2 REJETS DES STATIONS D'EPURATION

En dehors des émissions de polyBDE présentées dans le tableau 5 ci-dessus pour la France, nous n'avons pas trouvé d'informations sur les émissions liées aux rejets issus des stations d'épuration.

## 3.2.3 LIXIVIATS DE DECHARGE

Les déchets de polymères (mousse) mis en décharge peuvent laisser échapper, par lessivage, des particules contenant du c-pentaBDE qui peuvent contaminer le sol, les eaux superficielles ou souterraines. Cependant, il est pour le moment impossible d'évaluer l'importance de ce processus.

Etant donné les propriétés physico-chimiques de cette substance (faible solubilité dans l'eau, coefficient de partition octanol/eau élevé), il a été jugé très peu probable que des quantités importantes puissent s'échapper des décharges par lessivage car elle serait plutôt susceptible de s'adsorber fortement sur les sols (RPA, 2000). Toutefois, des études préliminaires menées en Norvège ont mis en évidence des concentrations de pentaBDE jugées préoccupantes dans les eaux d'infiltration provenant de certaines décharges (Fjeld *et al.*, 2003 et 2004).

# PENTABROMODIPHENYLETHERS

## 3.3 EMISSIONS DIFFUSES LIEES AUX EPANDAGES DE BOUES

Différentes études ont mis en évidence des concentrations de pentaBDE dans des boues d'eaux usées (UNEP, 2006). Ces boues seraient épandues sur des terres agricoles contaminant ainsi les produits alimentaires qui y sont cultivés.

## 3.4 EMISSIONS DUES AUX DECHETS CONTENANT DU PENTABDE

Ces déchets peuvent résulter de la fabrication de c-pentaBDE et de produits qui en contiennent ou de la mise au rebut de tels produits. Peu d'informations ont été publiées au sujet des émissions auxquelles ils donnent lieu (UNEP, 2007).

### Rejets produits à l'incinération des déchets :

Les températures auxquelles fonctionnent les incinérateurs de déchets municipaux détruisent la quasi-totalité des agents d'ignifugation. Cependant, il a été observé, comme pour d'autres composés organiques, que des quantités à l'état de trace pouvaient franchir la chambre de combustion (Danish EPA, 1999). Des études portant sur des incinérateurs de déchets municipaux ont permis de détecter dans les fractions gazeuse et particulaire de l'air aux alentours des sites, des concentrations de pentaBDE supérieures aux concentrations ambiantes de cette substance (Agrell *et al.*, 2004 ; Law, 2005 ; ter Shure *et al.*, 2004).

## 3.5 REJETS LIES A L'UTILISATION DE PRODUITS

Une organisation néerlandaise de recherche scientifique appliquée, le TNO (2005), a conclu que les principaux rejets de pentaBDE dans l'atmosphère émanent de produits et d'équipements qui contiennent cette substance sous forme d'agent ignifugeant.

### 3.5.1 EQUIPEMENTS INTERIEURS

Du pentaBDE ayant été trouvé dans les poussières à l'intérieur des locaux, qui sont considérées comme une des principales sources de pollution par cette substance (UNEP, 2006). Le c-pentaBDE s'utilise uniquement comme adjuvant. Malgré les faibles pressions de vapeur de cette substance, une partie de celle-ci peut se volatiliser pendant tout le cycle de vie du produit (RPA, 2000). Les PBDE ainsi émis ont tendance à s'adsorber sur des particules (poussières). Ces dernières se posent à l'intérieur des appareils et des bâtiments ou se disséminent à l'extérieur (Danish EPA, 1999). La dégradation physique des produits peut également contribuer à la présence de pentaBDE dans la poussière à l'intérieur des bâtiments (UNEP, 2007).

# PENTABROMODIPHENYLETHERS

Plusieurs études menées au Canada et aux USA ont détecté dans l'air et dans la poussière à l'intérieur des bâtiments des constituants du c-pentaBDE dégagés par divers produits tels que textiles, meubles et appareils électroniques (Shoeib *et al.*, 2004; Stapleton *et al.*, 2005; Wilford *et al.*, 2005). Des expériences en enceinte contrôlée ont mis en évidence une émission atmosphérique de pentaBDE par les mousses de polyuréthane utilisées dans le mobilier (Wilford *et al.*, 2005). Les travaux de Hale *et al.*, (2002) indiquent toutefois que cette volatilisation pourrait être principalement due à la détérioration des mousses. Les données expérimentales montrent que les appareils électroniques, notamment les téléviseurs et moniteurs d'ordinateur émettent du tétra- et du pentaBDE (Danish EPA, 1999). Ces observations sont corroborées par une étude qui révèle l'utilisation de c-pentaBDE dans les circuits imprimés d'ordinateurs et télévisions datant d'avant 2004 et l'interdiction d'utilisation du pentaBDE (Betts, 2006; Hazrati et Harrad, 2006). Ces études ne précisent pas les différences d'émissions entre les anciens modèles de téléviseurs ou moniteurs et les écrans plats qui leur ont succédé.

A la fin des années 90, selon Risk and Policy Analysis Ltd (RPA, 2000), 3,9 % du pentaBDE présent dans les articles contenant du c-pentaBDE se volatilisaient chaque année au cours des dix années de la durée de vie anticipée des produits, suivant l'hypothèse la plus pessimiste. En 2000, les rejets annuels mondiaux de pentaBDE engendrés par de nouvelles utilisations de mousses de polyuréthane dans des produits varient de 585 à 1 053 tonnes (UNEP, 2007). Lors de la rédaction de ce document nous n'avons pas pu actualiser ces chiffres.

## 3.5.2 EQUIPEMENTS EXTERIEURS

En général, les matières émises par les équipements extérieurs (peintures, matériaux pour toitures, textiles de meubles extérieurs,... contenant du pentaBDE) se dispersent en faibles concentrations dans l'atmosphère. Les équipements extérieurs comportant des mousses plastiques traitées au c-pentaBDE peuvent rejeter dans l'environnement des particules contenant cette substance. En milieu urbain ou industriel, ces particules sont principalement disséminées dans le sol (75 %), mais on les retrouve aussi dans les eaux de surface (24,9 %) et dans l'atmosphère (0,1 %).

Le c-pentaBDE pouvait être incorporé au PVC comme agent ignifugeant dans les applications suivantes (RPA, 2000) : sous-couche de peinture dans l'industrie automobile, matériaux pour toitures, revêtements de bobinages, revêtements de tissus, câbles et fils, profilés, et semelles de chaussure. En 2000, les rejets annuels des équipements extérieurs dans les pays de l'Union européenne étaient estimés à 15,86 tonnes dans les sols des sites industriels, à 5,26 tonnes dans les eaux de surface et à 0,02 tonnes dans l'atmosphère. Aucune estimation des rejets mondiaux de pentaBDE des équipements extérieurs n'a été trouvée dans la littérature (UNEP, 2007).

# PENTABROMODIPHENYLETHERS

## 3.6 FACTEURS D'EMISSIONS

Concernant l'utilisation du pentaBDE dans la sous-couche de peinture dans l'industrie automobile, matériaux pour toitures, revêtements de bobinages, revêtements de tissus, câbles et fils, profilés, et semelles de chaussure, la RPA (2000) a estimé les taux d'émission sur la durée de vie de ces produits à entre 2 et 10 % (pourcentage de pentaBDE rejeté par rapport à la quantité de pentaBDE initialement incorporée au produit), la valeur supérieure s'appliquant aux produits soumis à une usure importante tels que les couches d'apprêt pour voitures ou les semelles de chaussures, et celle de 2 % aux opérations d'élimination.

Aucune autre information sur les facteurs d'émissions de pentaBDE n'a été trouvée.

# PENTABROMODIPHENYLETHERS

## 4 DEVENIR ET PRÉSENCE DANS L'ENVIRONNEMENT

### 4.1 COMPORTEMENT DANS L'ENVIRONNEMENT

#### 4.1.1 PERSISTANCE

Le pentaBDE est considéré comme une substance persistante dans l'environnement. Le tableau ci-dessous présente différentes valeurs de demi-vie obtenues dans plusieurs compartiments de l'environnement.

Tableau 7 : Présentation des demi-vies estimées du pentaBDE dans les différents compartiments écologiques

Compartiment écologique	Demi-vie estimée	Références
Sol	150 jours	Palm, 2001 ; Palm <i>et al.</i> , 2002
Sédiments aérobies	600 jours	Palm, 2001 ; Palm <i>et al.</i> , 2002
Eau	150 jours	Palm, 2001 ; Palm <i>et al.</i> , 2002
Air	11 à 19 jours	Vulykh <i>et al.</i> , 2004 Palm <i>et al.</i> , 2002

#### 4.1.2 BIODEGRADATION

Le taux de persistance mis en évidence dans le tableau précédent est conforté par le fait qu'aucune dégradation n'a été constatée en 29 jours au cours d'un essai de biodégradabilité (test OECD 301B) utilisant le pentaBDE (UNEP, 2007).

#### 4.1.3 BIOAMPLIFICATION

Au fil des années, plusieurs études ont été réalisées mettant en évidence la bioamplification du pentaBDE en fonction des organismes et régions étudiées, les valeurs sont renseignées dans les études listées ci-dessous :

- Lithner *et al.*, 2003 ;
- Sellström, 1996 ;
- Burreau *et al.*, 1999 ;
- Burreau *et al.*, 2000 ;
- Alace *et al.*, 2002 ;
- Sormo *et al.*, 2006 ;

# PENTABROMODIPHENYLETHERS

- Muir *et al.*, 2006 ;

## 4.1.4 BIOACCUMULATION

Plusieurs études indiquent que le pentaBDE présent dans le sol et dans les sédiments est bio-disponible. Du fait de son caractère bioaccumulable et de ses propriétés de bioconcentration le long de la chaîne alimentaire, on le retrouve à des taux élevés chez les grands prédateurs (UNEP, 2006).

## 4.1.5 PROPAGATION SUR DE LONGUES DISTANCES

Plusieurs études ont permis de mettre en évidence différents facteurs qui témoignent du transport sur de longues distances du pentaBDE. Le pentaBDE a été retrouvé dans des prélèvements d'air, de sol et d'eau dans des régions de l'Arctique et d'autres régions très éloignées des zones de production et d'utilisation avec notamment des concentrations qui se sont accrues ces vingt dernières années (UNEP, 2006).

En 2003, une étude a permis de déterminer les distances de transport caractéristiques du pentaBDE comme étant comprise entre 608 et 1 349 km. Ces distances ont été estimées en fonction des propriétés physiques et chimiques de la substance (UNEP, 2006).

## 4.2 PRESENCE DANS L'ENVIRONNEMENT

Le pentaBDE a été retrouvé dans l'environnement à différents endroits de la planète comme le synthétise le tableau ci-dessous (UNEP, 2006) :

Tableau 8 : Concentrations de différents domaines de l'environnement en pentaBDE.

Pays/Région	Domaines	Niveau de pentaBDE	Références	Commentaires
Europe	Atmosphère : phase gazeuse	10-120 pg/m <sup>3</sup>	Jaward <i>et al.</i> , 2004	22 pays
Japon	Atmosphère : particules phase gazeuse	0,05-0,9 pg/m <sup>3</sup> 0,05-19 pg/m <sup>3</sup>	Hayakawa <i>et al.</i> , 2004	Mesurés en été
Suède	Sédiments	<0,7-51,4 ng/g PS	Palm <i>et al.</i> 2002	Rivières à la source
Royaume Uni	Sols	78 - 3200 pg/g PS	Hassanin <i>et al.</i> 2004	
Europe Occidentale	Sédiments	<0,2-6,9 ng/g PS	Palm <i>et al.</i> 2002	Estuaires
Japon, Osaka	Sédiments	9-28 ng/g PS	Palm <i>et al.</i> 2002	

# PENTABROMODIPHENYLETHERS

Pays/Région	Domaines	Niveau de pentaBDE	Références	Commentaires
Canada	Poulamon atlantique	77 ng/g PL	Law <i>et al.</i> 2003	

La plupart des analyses de tendance indiquent une augmentation des concentrations de pentaBDE dans l'environnement depuis le début des années 1970, avec un pic vers le milieu des années 1990 suivi d'une stabilisation en Europe (Covaci *et al.*, 2002 ; Fängström *et al.*, 2005 ; Thomsen *et al.*, 2005 et Knudsen *et al.*, 2005), mais d'une augmentation continue dans l'Arctique (Vorkamp *et al.*, 2005 ; AMAP, 2002 et AMAP, 2005). Cette augmentation a également été constatée en Amérique du Nord dans l'air, le sol et les sédiments (UNEP, 2006).

En 2000, l'Union européenne a estimé l'émission annuelle de pentaBDE répartie de la manière suivante (UNEP, 2006) :

- 75 % dans le sol, soit 15,86 tonnes ;
- 0,1 % dans l'atmosphère, soit 0,025 tonnes ;
- 24,9 % dans les eaux de surface, soit 5,26 tonnes.

## 4.2.1 AIR

### 4.2.1.1 Concentrations dans les précipitations

Nous n'avons trouvé aucune information sur les concentrations au sein des précipitations.

### 4.2.1.2 Concentrations dans l'atmosphère

En 2000, les rejets annuels dans l'atmosphère de pentaBDE ont été estimés à 0,021 tonnes dans l'Union Européenne. Aujourd'hui ces rejets sont considérés comme nuls ou négligeables (UNEP, 2007).

Mises à part les concentrations listées dans le tableau 8, aucune autre information relative aux concentrations de pentaBDE dans l'atmosphère n'a été trouvée.

# PENTABROMODIPHENYLETHERS

## 4.2.1.3 Concentrations dans l'air intérieur

Le pentaBDE se retrouve dans l'air intérieur par le biais des poussières émises par des produits tels que les meubles, les dispositifs électriques et électroniques... Les poussières sont considérées comme la principale source de pollution par le pentaBDE (UNEP, 2006).

Aucune information relative aux concentrations de pentaBDE observées dans l'air intérieur n'a été trouvée.

## 4.2.2 MILIEU AQUATIQUE

### 4.2.2.1 Eau de surface

En 2010, les Agences et Offices de l'Eau<sup>21</sup> ont recensé les substances responsables de dépassement des normes dans les cours d'eau en France métropolitaine. Les résultats obtenus pour les PBDE sont les suivants :

- Nombre de points prélevés : 923
- Taux de recherche : 49,4 %
- Points conformes : 163 soit 17,1 %
- Points non conformes : 20 soit 2,2 %
- Points en doute : 746 soit 80,7 %

Le nombre élevé d'indétermination du taux des PBDE est principalement dû à l'absence de méthode d'analyse adaptée au seuil fixé.

### 4.2.2.2 Eaux marines et saumâtres

Nous n'avons trouvé aucune information sur la présence de pentaBDE dans les eaux marines et saumâtres.

<sup>21</sup> <http://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/lessentiel/ar/1981/0/respect-normes-micropolluants-cours-deau.html> (site du Ministère de l'écologie, du développement durable et de l'énergie consulté en 2013).

# PENTABROMODIPHENYLEETHERS

## 4.2.2.3 Eaux potables

Nous n'avons trouvé aucune information récente sur la présence de pentaBDE dans les eaux potables.

## 4.2.3 SEDIMENTS

Plusieurs études basées sur des carottes de sédiments indiquent que des congénères du pentaBDE, déposés dans des sédiments marins européens au début des années 1970, sont toujours présents en quantités importantes, ce qui témoigne d'une persistance élevée dans les sédiments (Covaci *et al.*, 2002 ; Nylund *et al.*, 1992 ; Zegers *et al.*, 2000 ; Zegers *et al.*, 2003). La production industrielle et l'utilisation ont débuté en Europe au début des années 1970, mais ont diminué dans les années 1990. Cette évolution se reflète dans le profil des carottes sédimentaires, dont les congénères du pentaBDE sont absents avant cette date mais dont la concentration augmente ensuite, avec une stabilisation dans les années 1990. Les dernières études en date (Zegers *et al.*, 2003) ont analysé des carottes sédimentaires provenant de Norvège, des Pays-Bas et d'Allemagne : les concentrations de PBDE, normalisées par rapport à la teneur en carbone organique total, étaient de l'ordre de 10 à 20 µg/g.

# PENTABROMODIPHENYLEETHERS

## 5 PERSPECTIVES DE RÉDUCTION DES EMISSIONS

### 5.1 PRODUITS ALTERNATIFS

Suite au retrait du c-pentaBDE des principaux marchés, les fabricants ont recherché des solutions de substitution.

Une enquête régionale effectuée aux Etats-Unis (Washington state, 2006) a permis d'obtenir auprès de certaines entreprises des informations sur les produits de remplacement déjà en usage. Les auteurs n'ont toutefois pas cherché à déterminer les effets que ceux-ci pourraient avoir sur la santé humaine ou l'environnement. Par exemple, l'hexabromocyclododécane, un substitut utilisé dans les peintures et les adhésifs, n'est pas une option recommandée : ce composé suscite déjà des inquiétudes dans plusieurs pays et régions en raison de ses propriétés chimiques. Les alternatives identifiées dans cette enquête sont reprises par l'UNEP (2007) et sont citées dans les paragraphes dédiés aux alternatives ci-après. Selon la RPA (2000), seuls le tétrabromobenzoate (TBBE) et les esters alkylphosphoriques chlorés, en particulier le tri(2-chloroisopropyl)phosphate (TCPP), constituent des substituts adéquats selon les critères toxicologiques et écotoxicologiques. Toutefois, depuis la publication de cette étude, il est possible que d'autres options aient été développées et commercialisées (UNEP, 2007).

#### *Remarque sur le décaBDE :*

Le décaBDE était principalement utilisé dans le polystyrène résistant aux chocs et dans des produits ignifuges dans des textiles servant au rembourrage. (Santé Canada, 2004). Il représentait 75 % des polyBDE utilisés dans l'UE en 2000 (Dungey, 2001). 7500 tonnes en ont été consommées en 1999 en Europe d'après (Environnement Canada, 2004).

Le décaBDE a longtemps été considéré comme une alternative intéressante au pentaBDE car il était soumis à des exemptions de restriction à l'annexe XVII de REACH (voir paragraphe 1.3 de cette fiche). Néanmoins la situation a changé puisque cela n'est plus le cas : le décaBDE est soumis à la même réglementation que le pentaBDE, il n'est donc plus utilisé comme substitut du pentaBDE en 2013.

#### 5.1.1 ALTERNATIVES CHIMIQUES AU C-PENTA-BDE POUR LES MOUSSES DE POLYURETHANE

L'Agence américaine pour la protection de l'environnement (EPA - Design for the Environment) a publié en septembre 2005 une évaluation des solutions de remplacement du c-pentaBDE pour le polyuréthane (EPA, 2005). Elle a également mis sur pied un partenariat

# PENTABROMODIPHENYLEETHERS

pour l'ignifugation du mobilier rassemblant un large groupe de parties intéressées dans le but d'évaluer des produits chimiques de remplacement écologiquement plus sûrs et d'étudier d'autres technologies susceptibles d'améliorer la sécurité incendie dans le secteur de l'ameublement. Quelques gros producteurs américains de substances ignifugeantes ont identifié des formulations chimiques aptes à remplacer le c-pentaBDE dans la production à grande échelle de mousse souple de polyuréthane basse densité :

- Société Albermale : gammes de produits SAYTEX® et ANTIBLAZE®
- Société Great Lakes Chemical Corporation : Firemaster® 550 et Firemaster® 552
- Société Supresta (Akzo Nobel) : substances Fyrol® FR-2 ; AB053 ; AC003 ; AC073 ; Fyrquel 150, Fyrquel 220 et Fyrquel 300

Les substances sélectionnées peuvent être aisément adoptées car elles sont compatibles avec les procédés de fabrication existants et, donc, économiques. Outre ces formulations, d'autres substances sont également utilisées comme retardateurs de flamme dans des mousses souples de polyuréthane haute densité et dans des mousses basse densité destinées à certains créneaux spécialisés du marché (UNEP 2007).

Trois des substances chimiques, proposées par divers rapports, et parmi les plus couramment utilisées pourraient être des solutions de remplacement plus sûres pour l'environnement et plus viables à long terme. Il s'agit de (UNEP 2007):

- **La mélamine.** Des retardateurs de flamme à base de mélamine sont actuellement employés dans des mousses souples de polyuréthane, des peintures intumescents (qui gonflent sous l'effet de la chaleur et ralentissent ainsi la combustion), des polyamides et des polyuréthanes thermoplastiques. Dans les pays d'Europe, ils ont été efficacement utilisés dans les mousses souples de polyuréthane haute densité mais la teneur en mélamine du polyol doit être de 30 à 40 % en masse.
- **Le tri(1,3-dichloro-2-propyl)phosphate (TDCPP ou TCPP).** Le TDCPP est un ester phosphorique chloré souvent employé dans les formulations de mousse de polyuréthane. Il s'utilise dans les mousses haute densité ainsi que dans les mousses basse densité lorsqu'une légère décoloration ne constitue pas un inconvénient majeur.
- **Le polyphosphate d'ammonium (APP).** L'APP, un additif retardateur de flamme, sert actuellement à ignifuger des mousses souples et rigides de polyuréthane ainsi que des stratifiés intumescents, des résines de moulage, des mastics d'étanchéité et des colles. Toutefois, les fabricants de produits chimiques et les associations professionnelles de fabricants de mousse n'envisagent pas de l'adopter comme solution de remplacement du C-pentaBDE à l'échelle industrielle. En revanche l'UNEP ne précise pas les raisons qui poussent ces acteurs à ne pas utiliser l'APP.

# PENTABROMODIPHENYLETHERS

## 5.1.2 ALTERNATIVES NON CHIMIQUES AU C -PENTABDE POUR LES MOUSSES DE POLYURETHANE

L'Agence américaine pour la protection de l'environnement a également recensé des solutions de substitution non chimiques (EPA, 2005). A l'heure actuelle, trois techniques d'ignifugation du mobilier sont disponibles (UNEP, 2007) :

- **La technologie des barrières** qui consiste à superposer les couches protectrices composées de différents matériaux résistants pour améliorer l'effet retardateur de flamme. Ces matériaux peuvent être de 3 types : à base de coton traité, à base de mélanges de fibres naturelles non extensibles et fibres synthétiques extensibles ou entièrement composés de fibres synthétiques extensibles haute performance.
- **La mousse imprégnée de graphite** qui possède une très bonne résistance à la combustion, elle est considérée comme auto-extinctrice. Elle est pour le moment principalement utilisée dans les sièges des avions.
- **le traitement de surface** est actuellement utilisé comme alternative au pentaBDE pour certaines applications dans les textiles et meubles mais ne peut le remplacer à une échelle industrielle plus large dans les mousses basse densité. En effet même si une bonne résistance peut être atteinte par l'imprégnation des mousses d'additifs divers (phosphates, sels d'aluminium, etc.), ce procédé pose des contraintes de durabilité liées à la dégradation rapide de ces traitements. Il faut aussi considérer la difficulté technique d'imprégnation de ces mousses parfois épaisses.

Ces deux dernières techniques ont des utilisations commerciales restreintes. La technologie des barrières s'emploie essentiellement dans la fabrication de matelas plutôt que dans le capitonnage des meubles mais peut avoir d'autres applications (UNEP, 2007).

On notera par ailleurs que certains types de meubles ne nécessitent pas de matériaux de capitonnage ni même de tissu. La conception doit donc être prise en compte lorsqu'on évalue d'autres moyens d'ignifugation du mobilier (UNEP, 2007).

## 5.1.3 ALTERNATIVES DU C-PENTABDE POUR LES APPAREILS ELECTRIQUES ET ELECTRONIQUES

Plusieurs gros fabricants ont commencé à abandonner l'utilisation de PBDE en 2005 (UNEP, 2007).

On peut mentionner des exemples de procédés d'ignifugation utilisés ne faisant pas appel au pentaBDE (Norwegian EPA, 2003), néanmoins, cette source ne précise pas la nature des substituts employés :

- les cartes à circuit imprimé sans brome (Sony) ;

# PENTABROMODIPHENYLEETHERS

- les retardateurs de flamme à base de phosphore pour les cartes à circuit imprimé (Hitachi) ;
- les plastiques ignifugés (Toshiba) ;
- les matières non halogénées et les fils intérieurs basse tension (Panasonic/Matsushita).

Selon Leisewitz *et al.*, (2000), l'utilisation de borate de zinc, d'hydroxyde de magnésium ou de graphite extensible à la place des retardateurs de flamme bromés ne devrait pas poser de problèmes.

## 5.1.4 ALTERNATIVES DU C-PENTABDE POUR LES TEXTILES

Des ignifugeants de remplacement non bromés sont disponibles pour les textiles. Le tableau 9 ci-dessous reprend les principales alternatives au c-pentaBDE pour les textiles (norwegian EPA, 2003).

Tableau 9 : Alternatives au c-pentaBDE dans les textiles (Norwegian EPA, 2003).

Textiles et produits commerciaux	Retardateurs de flamme dans ces produits commerciaux
Revêtements plastiques des habits de travail	trioxyde d'antimoine
Habits de travail Uniformes pour centrales électriques, secteur militaire ou de la santé et la police	Chlorure (hydroxyméthylque) de phosphonium de Tetrakis (THPC) Chlorure phosphonitrique (PNC)
Coton/polyester: habits de travail, draps de lit	Pyrovatex et Proban (composés phosphoriques organiques)
Tapis, textiles dans le secteur du transport	Hydroxyde d'aluminium
Tentes	Hydrate d'aluminium
Textiles pour meubles de bureau, dans le secteur médical, l'industrie et le transport	Composés ammonium Sels d'acide phosphorique Acétate de zirconium
Meubles de salon ou de chambre	Borax Mélanine

Certains d'entre eux, comme le trioxyde d'antimoine et le borax, présentent des risques pour l'environnement. On peut également employer des matériaux durables difficilement inflammables comme la laine et les fibres de polyester. Plusieurs fabricants affirment que l'interdiction de l'utilisation de c-pentaBDE dans les textiles réduit la qualité et la durabilité des tissus (UNEP, 2007).

# PENTABROMODIPHENYLETHERS

## 5.1.5 ASPECTS ECONOMIQUES DES ALTERNATIVES

Des études ont été menées pour déterminer la faisabilité économique de substituer le pentaBDE à travers les produits commercialisables et la rentabilité économique.

Tableau 10 : Exemple d'application pour substituer le pentaBDE dans une mousse en polyuréthane (Source : données communiquées par la société Clariant en 2008).

Application	Composition du retardateur de flamme	Coût du retardateur de flamme (€/kg de polyuréthane)	Commentaire
Mousse flexible en polyuréthane	10 % de pentaBDE additionné à environ 2 % de substance organophosphorée bon marché	Environ 0,70 €/kg de polyuréthane	Le prix du pentaBDE a été estimé à 6 €/kg en 2005 lorsqu'il a progressivement été supprimé en Europe
Mousse flexible en polyuréthane (s'utilisant dans les mêmes concentrations)	20 % de tris(2-chloro-1-méthyléthyl) phosphate (TCPP)	Environ 0,35 €/kg de polyuréthane	Le prix actuel du TCPP est de 1,80€/kg

Cet exemple montre que l'utilisation du TCPP est économiquement plus rentable que l'usage du pentaBDE combiné à une substance organophosphorée bon marché.

Néanmoins, pour certaines entreprises, la substitution du pentaBDE par un autre retardateur de flamme pourra nécessiter de nouveaux investissements pour modifier les conditions de production des produits.

Les producteurs s'attendaient à des surcoûts à la suite de l'interdiction, en vigueur dans l'Union Européenne, d'utiliser des produits chimiques dangereux, dont le c-pentaBDE, dans les appareils électriques et électroniques (UNEP, 2007).

Au niveau mondial, 35 % des entreprises de ce secteur estiment que l'augmentation des prix de leurs produits ne dépassera pas 5 %, 23 % anticipent une hausse de 5 à 10 % et 6 % prévoient une majoration supérieure à 10 % (Environmental International Reporter, 2006).

## 5.1.6 CONCLUSION SUR L'EVALUATION DES ALTERNATIVES

Il existe de nombreuses alternatives au pentaBDE en tant que retardateur de flamme et leur utilisation n'influerait que peu sur les coûts des produits finis concernés. Cependant il convient d'insister sur le fait qu'il ne peut s'agir que d'un état des lieux des alternatives à un instant donné, que des nouveaux retardateurs de flamme sont développés régulièrement et spécifiquement pour une utilisation donnée.

# PENTABROMODIPHENYLETHERS

## 5.2 TRAITEMENT DES REJETS INDUSTRIELS

### 5.2.1 REJETS SOLIDES

L'incinération est le procédé employé pour éliminer les déchets contenant du pentaBDE (UNEP, 2007), mais aucune information n'a été trouvée concernant les rejets solides industriels contenant du pentaBDE.

### 5.2.2 REJETS LIQUIDES, TRAITEMENT DES EFFLUENTS

Nous n'avons pas trouvé d'information sur le traitement des effluents industriels contenant du pentaBDE. Ceci peut être expliqué par le fait que très peu de pays exercent encore des activités de production ou d'utilisation de pentaBDE et que par conséquent les informations sont très rares.

### 5.2.3 ASPECTS ECONOMIQUES DES TRAITEMENTS

Nous n'avons pas trouvé d'information sur les aspects économiques des traitements.

## 5.3 TECHNOLOGIES EMERGENTES DE RÉDUCTION DES ÉMISSIONS

Nous n'avons pas trouvé d'information sur les technologies émergentes qui permettraient de réduire les émissions dues au pentaBDE.

# PENTABROMODIPHENYLETHERS

## 6 CONCLUSION

Les pentabromodiphényléthers (pentaBDE) ont été très largement utilisés en tant que retardateurs de flamme et incorporés dans les produits de consommation. Les activités de production et d'utilisation de ces substances sont très réglementées, que ce soit en Europe, Australie ou au Canada, elles sont interdites et ont par conséquent quasiment disparues. Il reste cependant la problématique de l'importation de produits contenant du pentaBDE en provenance d'autres pays qui ne sont pas soumis aux mêmes restrictions. Ces produits sont difficilement contrôlables et demeurent des sources de pentaBDE dans l'environnement.

Le pentaBDE peut être libéré dans l'environnement :

- pendant la fabrication du produit commercial,
- pendant la fabrication d'articles traités au pentaBDE,
- pendant l'utilisation de ces articles,
- lors de l'élimination de ces articles comme déchets.

Bien que la production du c-pentaBDE a été très fortement réduite dans le monde ces dernières années, plusieurs articles en contenant seront toujours utilisés dans les années à venir d'où une potentielle libération de la substance dans l'environnement. De plus, à la fin de leur cycle de vie, ces articles deviendront des déchets et pourraient induire de nouvelles émissions dans l'environnement lors de leur destruction.

En Amérique du Nord et en Europe occidentale, la principale source était constituée par le c-pentaBDE incorporé dans la mousse de polyuréthane, utilisée dans le mobilier à usage domestique et urbain. A présent, cette utilisation a pratiquement cessé.

Quant aux autres usages (les textiles, les composants électriques et électroniques, les matériaux de construction, les véhicules, les trains et les avions, les conditionnements, les huiles de forage liquides et les produits à base de caoutchouc), l'information est très limitée et ne permet pas de tirer des conclusions.

Le pentaBDE est retrouvé dans tous les compartiments de l'environnement (air, eaux, sols, sédiments), mais principalement dans les sols et les sédiments. Plusieurs études basées sur des carottes de sédiments indiquent que le pentaBDE est persistant dans les sédiments marins. D'autre part, plusieurs études indiquent que le pentaBDE présent dans le sol et dans les sédiments est bio-disponible. C'est en outre une substance bioaccumulable, qui se bioconcentre en remontant des réseaux trophiques induisant des taux élevés chez les grands prédateurs (UNEP, 2006) tels que l'Homme.

La plupart des analyses de tendance indiquent une augmentation rapide des concentrations de pentaBDE dans l'environnement depuis le début des années 1970 jusqu'au milieu ou la fin

# PENTABROMODIPHENYLETHERS

---

des années 1990 atteignant des concentrations stationnaires dans certaines régions vers les années 90 mais continuant à augmenter dans d'autres.

De nombreuses alternatives au pentaBDE ont été développées depuis son interdiction dans de nombreux pays, celles-ci sont le plus souvent spécifiques à une utilisation du pentaBDE. Pour certaines de ces alternatives, nous ne possédons que peu d'information à l'heure actuelle. Il est également très difficile d'évaluer l'évolution de la production et de la consommation de pentaBDE dans les pays qui n'ont pas interdit ces pratiques.

# PENTABROMODIPHENYLEETHERS

## 7 LISTE DES ABREVIATIONS

APP	Polyphosphate d'ammonium
BDE	Bromodiphényléther
CE	Communauté Européenne
c-pentaBDE	Formule commerciale du pentaBDE, pentabiphényléther
ECB	European Chemicals Bureau
EEE	Equipements Electriques et Electroniques
EHESP	Ecole des Hautes Etudes en Santé Publique
EPA	Environmental Protection Agency
JRC	Joint Research Center
NQE	Norme de Qualité Environnementale
NQEp	Norme de Qualité Environnementale provisoire
OECD	(OCDE)
PATLD	Convention sur la pollution atmosphérique transfrontalière à longue distance (ou CLRTAP)
PBDE	Polybromobiphényléther
PCB	PolyChloroBiphenyles
PentaBDE	Pentabromobiphényléther
POP	Polluant Organique Persistant
PVC	Polychlorure de vinyle
REACH	Registration, Evaluation, Authorisation and Restriction of Chemical substances
	REACH est le règlement sur l'enregistrement, l'évaluation, l'autorisation et les restrictions des substances chimiques. Il est entré en vigueur le 1 <sup>er</sup> juin 2007. REACH rationalise et améliore l'ancien cadre réglementaire de l'Union européenne sur les produits chimiques.
SDAGE	Schéma Directeur d'Aménagement et de Gestion des Eaux
SGH	Système Général Harmonisé. Afin d'unifier les différents systèmes nationaux de classification et étiquetages des produits chimiques dangereux, le Système Général Harmonisé ou SGH (Globally Harmonised System of Classification and Labelling of Chemicals ou GHS) à été créé. Il est rentré en vigueur en France (et dans tout les pays de l'Union Européenne) le 20/01/2009.
SNPA	Syndicat national des plastiques alvéolaires
TBBE	Tétrabromobenzoate
TCPP	Tri(2-chloroisopropyl)phosphate
UE	Union Européenne

# PENTABROMODIPHENYLETHERS

---

UNEP

United Nation Environmental Programme (PNUÉ en français)

# PENTABROMODIPHENYLEETHERS

## 8 BIBLIOGRAPHIE

Agrell, C., A. F. H. ter Schure, J. Sveder, A. Bokenstrand, P. Larsson and B. N. Zegers (2004). Polybrominated diphenyl ethers (PBDEs) at a solid waste incineration plant. I: atmospheric concentrations. *Atmos. Environ.* 38, 5139-5148.

Alaee, M., Luross, M.J., Whittle, M.D. and Sergeant D.B. (2002). Bioaccumulation of polybrominated diphenyl ethers in the Lake Ontario pelagic food web. *Organohalogen Compounds* 57: 427-430.

AMAP Assessment (2002): Persistent organic pollutants in the Arctic. Arctic monitoring and assessment program, Oslo 2004.

AMAP (2005). Fact sheet: Brominated flame retardants in the Arctic.

Betts, K. (2006). PBDEs and PCBs in computers, cars, and homes. *Environ. Sci. Technol.* 40: 7452.

Burreau, S., Broman, D. and Zebühr Y. (1999). Biomagnification quantification of PBDEs in fish using stable nitrogen isotopes. *Organohalogen Compounds* 40: 363 - 366.

Burreau, S., Zebühr, Y., Ishaq, R. and Broman D., (2000). Comparison of biomagnification of PBDEs in food chains from the Baltic Sea and the Northern Atlantic Sea. *Organohalogen Compounds* 47: 253-255.

Covaci, A., Gheorghe, A., Steen Redeker, E., Blust, R. and Schepens, P. (2002). Distribution of organochlorine and organobromine pollutants in two sediment cores from the Scheldt estuary (Belgium). *Organohalogen Compounds* 57: 239-242.

Danish EPA, (1999), Brominated Flame Retardants. Substance Flow Analysis and Assessment of Alternatives

Dungey S, (2001), Environmental risk assessment of octa- and decabromodiphenyl ether, in "Abstracts Brominated Flame Retardants 2001" ([http://www.bfr2004.com/BFR2001\\_del1.pdf](http://www.bfr2004.com/BFR2001_del1.pdf))

EHESP (2010). Projet d'évaluation des risques sanitaires. Les polybromo diphenyl éthers

Environnement Canada, (2004), Rapport d'évaluation environnementale préalable des polybromodiphényléthers (PBDE), Loi canadienne sur la protection de l'environnement de 1999

Environmental International Reporter (2006). Electronics firms worldwide pledge to meet EU Directive banning use of some chemicals. Vol. 29, No 5.

EPA (2005).US EPA. Future Flame Retardant Partnership: Environment Profiles of Chemical Flame-retardant Alternatives for Low Density Polyurethane Foam. Chemical Hazard Reviews, Vols. 1&2. [www.epa.gov/dfe/pubs/flameret/ffr-alt.htm](http://www.epa.gov/dfe/pubs/flameret/ffr-alt.htm).

# PENTABROMODIPHENYLEETHERS

Fängström, B., Strid, A. and Bergman, Å. (2005). Rapport til Naturvårdsverket för projektet "Analys av polybromerade difenyletrar (PBDE) och hexabromcyklododekan (HBCDD) i human mjölk från Stockholm - en tidstrend studie. (Dnr 721-2653-05Mm) Stockholm 2005-11-23.

Fjeld, E., M. Schlabach, J. A. Berge, T. Eggen, P. Snilsberg, G. Källberg, S. Rognerud, A. Borgen and H. Gundersen (2003). Screening of selected new organic contaminants - brominated flame retardants, chlorinated paraffins, bisphenol A and triclosan. SFT-report 4809/2004.

Fjeld, E., M. Schlabach, J. A. Berge, N. Green, T. Eggen, P. Snilsberg, C. Vogelsang, S. Rognerud, G. Kjellberg, E. K. Enge, C. A. Dye and H. Gundersen (2004). Screening of selected new organic contaminants 2004. Brominated flame retardants, alkylated substances, irganol, diuron, BHT and dicofol. SFT-report 927/2005. Freedonia Group Inc. (2005): World flame retardants. R154-1365 (<http://www.mindbranch.com>).

Geyer, H. J., Schramm, K.W., Darnerud, P.O., Aune, M., Henkelmann, B., Lenoir, D., Schmid, P. and McDonald, T.A., (2004). Terminal elimination half-lives of the brominated flame retardants TBBPA, HBCD and lower brominated PBDEs in humans. Organohalogen compounds 66:3820-3825.

Hale, R. C., M.J. La Guardia, E. Harvey and T.M. Mainor (2002). Potential role of fire retardant-treated polyurethane foam as a source of brominated diphenyl ethers to the US environment. Chemosphere 46: 729-735.

Hassanin, A., Breivik, K., Meijer, S.N., Steinnes, E., Thomas, G.O. and Jones, K.C. (2004). PBDEs in European Background Soils: Levels and Factors Controlling Their Distribution. Environ. Sci. Technol. 38: 738-745.

Hayakawa K, Takatsuki H, Watanabe I. and Sakai S. (2004). Polybrominated diphenyl ethers (PBDEs), polybrominated dibenzo-p-dioxins/dibenzofurans (PBDD/Fs) and monobromo-polychlorinated dibenzofurans (MoBPXDD/Fs) in the atmosphere and bulk deposition in Kyoto, Japan. Chemosphere 57: 343-356.

Hazrati, S. and S. Harrad (2006). Causes of Variability in Concentrations of Polychlorinated Biphenyls and Polybrominated Diphenyl Ethers in Indoor Air. Environ. Sci. Technol. 40: 7584-7589.

Jaward, F.M., Farrar, N.J., Harner, T., Sweetman, A.J. and Jones, K.C. (2004). Passive Air Sampling of PCBs, PBDEs, and Organochlorine Pesticides Across Europe. Environ. Sci. Technol. 38: 34-41.

JRC. (2001). European Union Risk Assessment Report, Diphenylether, Pentabromo deriv.

JRC. (2002). European Union Risk Assessment Report, Bis(pentabromodiphenyl)ether.

JRC. (2003). European Union Risk Assessment Report, Diphenylether, Octabromo deriv.

Knudsen, L. B., Gabrielse, G. W., Verreault, J., Barrett, R., Skåre, J.U., Polder, A. and Lie, E. (2005). Temporal trends of brominated flame retardants, cyclododeca-1,5,9-triene and mercury in eggs of four seabird species from Northern Norway and Svalbard. SFT-report 942/2005.

# PENTABROMODIPHENYLEETHERS

Law, R. J., Alae, M., Allchin, C.R., Boon, J.P., Lebeuf, M., Lepom, P. and Stern, G.A. (2003). Levels and trends of polybrominated diphenylethers and brominated flame retardants in wildlife. *Environment International* 29: 757-770.

Law, R.J., C. R. Allchin, J. de Boer, A. Covaci, D. Herzke, P. Lepom, S. Morris, J. Tronczynski and C. A. de Wit (2005). Levels and Trends of Brominated Flame Retardants in European and Greenland Environments. *Chemosphere* 64: 187 - 208.

Leisewitz, A., H. Kruse and E. Schramm (2000). German Federal Ministry of the Environment, Nature Conservation and Nuclear Safety, Substituting Environmentally Relevant Flame Retardants: Assessment Fundamentals. Research report 204 08 642 or 207 44 542.

Lithner, G., Holm, K. and Ekström, C. (2003). Metaller och organiska miljögifter i vattenlevande organismer och deras miljö i Stockholm 2001. ITM Rapport 108, 87 pp., Institute of Applied Environmental Research (ITM), Stockholm University, Stockholm, Sweden, ISBN 91-631-3758-5

Muir, D.C.G., Backus, S., Derocher, A.E., Dietz, R., Evans, T.J., Gabrielsen, G.W., Nagy, J., Norström, R.J., Sonne, C., Stirling, I., Taylor, M.K. and Letcher, R. J. (2006). Brominated flame retardants in polar bears (*Ursus maritimus*) from Alaska, the Canadian Arctic, East Greenland, and Svalbard. *Environ. Sci. Technol.* 40: 449-455.

Norwegian EPA (2003). Bruken av bromerte flammehemmere i produkter. Materialstrømsanalyse. (The use of brominated flame retardants in products. A material flow analysis) TA-1947/2003. (In Norwegian only).

Nylund, K., Asplund, L., Jansson, B., Jonsson, P., Litzén, K. and Sellström, U. (1992). Analysis of some polyhalogenated organic pollutants in sediments and sewage sludge. *Chemosphere*, 24: 1721-1730.

OSPAR Commission. (2001). Certain Polybrominated flame retardants - Polybrominated diphenylethers, Polybrominated biphenyls, Hexabromo Cyclododecane, Ospar Priority Substances Series.

Palm, A. (2001). The Environmental Fate of Polybrominated Diphenyl Ethers in the centre of Stockholm - Assessment of Using a Multimedia Fugacity Model. Master of Science Thesis, Umeå Universitat.

Palm, A., Cousins, I.T., Mackay, D., Tysklind, M., Metcalf, C. and Alae, M. (2002). Assessing the Environmental Fate of Chemicals of Emerging Concern: A Case Study of the PBDEs. *Environ. Poll.* 117: 195-213.

Peltola et al. (2000), Pentabromodiphenyl ether as a global POP, Finnish Environment Institute

Rahman et al. (2001). Polybrominated diphenyl ether (PBDE) flame retardants. *The Science of the Total Environment*, 275 (2001) pp. 1-17.

RPA (2000). Risk Reduction Strategy and Analysis of Advantages and Drawbacks for Pentabromodiphenyl Ether. Stage 4 Report. Risk & Policy Analysis Limited, London.

Santé Canada, (2004), Polybromodiphenyléthers, Rapport d'évaluation préalable - Santé.

Troitzsch, J. 2002. Flame retardants, trends and innovation. *KU Kunststoffe plast europe*, vol. 92, pp. 18-20.

# PENTABROMODIPHENYLEETHERS

Sellström, U. (1996). PBDEs in the Swedish environment. Licentiate Thesis, Institute of Applied Research, Stockholm University.

SFT 2009. Statens forurensningstilsyn. Guidance on alternative flame retardants to the use of commercial pentabromodiphenylether (c-PentaBDE). Table 4 Overview of use of alternative flame retardants to PentaBDE in several materials and applications. ([http://chm.pops.int/Portals/0/docs/POPRC4/intersession/Substitution/pentaBDE\\_revised\\_Stefan\\_Posner\\_final%20version.pdf](http://chm.pops.int/Portals/0/docs/POPRC4/intersession/Substitution/pentaBDE_revised_Stefan_Posner_final%20version.pdf)).

Shoeib, M., Harner, T., Ikonou, M. and Kannan, K. (2004). Indoor and Outdoor Concentrations and Phase Partitioning of Perfluoroalkyl Sulfonamides and Polybrominated Diphenyl Ethers. Environ. Sci. Technol. 38: 1313-1320.

Sørmo, E.G., Salmer, M.P., Jenssen, B.M., Hop, H., Bæk, K., Kovacs, K.M., Lydersen, C., Falk-Pettersen, S., Gabrielsen, G.W., Lie, E. and Skaare, J.U. (2006). Biomagnification of brominated flame retardants in the polar bear food chain in Svalbard, Norway. Accepted for publication in Environmental Toxicology and Chemistry.

Stapleton, H.M., Dodder, N.G., Offenber, J.H., Schantz, M.M. and Wise, S.A. (2005). Polybrominated Diphenyl Ethers in House Dust and Clothes Dryer Lint. Environ. Sci. Technol. 39: 925-931.

ter Schure, A.F.H., C. Agrell, A. Bokenstrand, J. Sveder, P. Larsson and B. N. Zegers (2004). Polybrominated diphenyl ethers at a solid waste incineration plant II: atmospheric deposition. Atmos. Environ. 38, 5149-5155.

Thomsen, C., Liane, V., Frøshaug, M. and Becher, G. (2005). Levels of brominated flame retardants in human samples from Norway through three decades. Organohalogen Compounds. 67: 658-661.

UE. (2000). Risk Assessment of Diphenyl Ether, Pentabromoderivative (Pentabromodiphenyl Ether). CAS Number: 32534-81-9, EINECS Number: 251-084-2. Final Report of August 2000, Commission of the European Communities. Rapporteur: United Kingdom.

UNEP (2006). Risk profile: pentabromodiphenyl ether. Stockholm Convention on Persistent Organic Pollutants: Persistent Organic Pollutants Review Committee, Second Meeting, Geneva 6-10 November, 2006. UNEP/POPS/POPRC.2/17, Addendum 1.

UNEP (2007). Rapport du Comité d'étude des polluants organiques persistants sur les travaux de sa troisième réunion : Evaluation de la gestion des risques liés au pentabromodiphényléther commercial

Van der Goon, D., M. van het Bolscher, A.J.H. Visschedijk and P.Y.J. Zandveld (2005). Study of the effectiveness of the UNECE persistent organic pollutants protocol and cost of possible additional measures. Phase I: Estimation of emission reduction resulting from the implementation of the POP protocol. TNO-report 2005/194.

Vorkamp, K., Thomsen, M., Falk, K., Leslie, H., Møller, S. and Sørensen, P.B. (2005). Temporal Development of Brominated Flame Retardants in Peregrine Falcon (Falco peregrinus) Eggs from South Greenland (1986-2003). Environ. Sci. Technol 39: 8199-8206.

# PENTABROMODIPHENYLEETHERS

Vulykh, N., Dutchak, S., Mantseva, E. and Shatalov, V. (2004). EMEP contribution to the preparatory work for the review of the CLRTAP protocol on persistent organic pollutants. New Substances: Model assessment of potential for long-range transboundary atmospheric transport and persistence of PentaBDE. EMEP MSC-E Information Note 10/2004. Metrological Synthesizing Centre-East.

Washington State (2006). Polybrominated Diphenyl Ether (PBDE) Chemical Action Plan: Draft Final Plan, December 1, 2005.

Wilford, B.H., M. Shoeib, T. Harner, J. Zhu and Jones, K.C. (2005). Polybrominated Diphenyl Ethers in Indoor Dust in Ottawa, Canada: Implications for Sources and Exposure. Environ. Sci. Technol. 39(18): 7027-7035.

Zegers, B.N., Lewis, W.E. and Boon, J.P. (2000). Levels of Some Polybrominated Diphenyl Ether (PBDE) Flame Retardants in Dated Sediment Cores. Organohalogen Compounds, 47: 229-232.

Zegers, B.N., Lewis, W.A., Booij, K., Smittenberg, R.H., Boer, W., de Boer, J. and Boon, J.P. (2003). Levels of polybrominated diphenyl ether flame retardants in sediment cores from Wester(n) Europe. Environ. Sci. Technol. 37: 3803-3807.