



Environment
Canada

Environnement
Canada

*Loi canadienne sur la protection
de l'environnement (1999)*

**Recommandations fédérales pour la qualité
de l'environnement
*Hexabromocyclododécane (HBCD)***

Environnement et Changement climatique Canada

Date de publication :

Mai 2016

Recommandations fédérales pour la qualité de l'environnement Hexabromocyclododécane (HBCD)

Introduction

Les Recommandations canadiennes pour la qualité de l'environnement (RFQE) établissent des points de référence relatifs à la qualité de l'environnement. Ces RFQE sont établies uniquement en fonction des effets ou des risques toxicologiques des substances ou des groupes de substances précis. En effet, elles ont trois fonctions. En premier lieu, les RFQE peuvent servir d'outil de prévention de la pollution en fournissant des objectifs acceptables pour la qualité de l'environnement. En deuxième lieu, elles peuvent aider à évaluer l'importance des concentrations des substances chimiques retrouvées actuellement dans l'environnement (surveillance des eaux, des sédiments et des tissus biologiques). Et en troisième lieu, elles peuvent servir de mesures de rendement des activités de gestion des risques. Le recours aux RFQE est volontaire, à moins que celles-ci ne soient prévues par un permis ou d'autres outils de réglementation. Par conséquent, ces RFQE, qui s'appliquent à l'environnement ambiant, ne constituent pas des limites d'effluents ou des valeurs « à ne jamais dépasser », mais elles peuvent être utilisées dans le calcul de ces limites. L'élaboration des RFQE relève de la responsabilité du ministre fédéral de l'Environnement et Changement climatique, conformément à la *Loi canadienne sur la protection de l'environnement (1999)* [LCPE] (Canada, 1999). L'objectif est d'élaborer des RFQE pour appuyer l'évaluation et la gestion des risques des produits chimiques d'intérêt prioritaire recensés dans le Plan de gestion des produits chimiques (PGPC) ou d'autres initiatives fédérales. La présente fiche d'information décrit les Recommandations fédérales pour la qualité des eaux, des sédiments et de l'alimentation des mammifères sauvages afin de protéger la vie aquatique et des mammifères qui en consomment des effets nocifs de l'hexabromocyclododécane (HBCD) (tableau 1). Cette fiche d'information a été largement basée sur le rapport d'évaluation préalable publié dans le cadre du Plan de gestion des produits chimiques du Canada. Elle se fonde notamment sur des données et des renseignements relevés jusqu'à juillet 2010 (Gouvernement du Canada, 2011).

Tableau 1. Recommandations fédérales pour la qualité de l'environnement visant l'HBCD

Eau (µg/L)	Tissus des poissons (mg/kg en poids humide)	Sédiments* (mg/kg en poids sec)	Régime alimentaire des mammifères et de la faune (mg/kg en poids humide de nourriture)
0,56	8,5	1,6	40
* Valeurs normalisées selon un contenu en carbone organique de 1 %. ** La Recommandation sur l'alimentation des mammifères sauvages vise la protection des mammifères qui consomment le biote aquatique. Elle est la concentration du HBCD dans le biote aquatique, exprimé sur la base du poids corporel humide qui pourrait être consommé par la faune terrestre ou semi-aquatique.			

Identité de la substance

L'hexabromocyclododécane (HBCD) ($C_{12}H_{18}Br_6$) est un bromure cycloaliphatique anthropique qui est produit par la bromation du cyclododécatriène (Mack, 2004). L'hexabromocyclododécane est une poudre blanche ou blanche cassée de température ambiante et d'un poids moléculaire de 641,7 g/mol (Centre canadien d'hygiène et de sécurité au travail, 1999). Le mélange commercial d'HBCD se compose de trois stéréo-isomères alpha (α ; n° CAS : 134237-50-6), beta (β ; n° CAS : 134237-51-7) et gamma (γ ; n° CAS : 134237-52-8) dans les proportions respectives de 8 à 9 %, 6 % et 80 à 85 %, (ACCBFRIP, 2005). Sur la base du rapport d'évaluation préalable (REP) (Gouvernement du Canada, 2011), il est conclu que l'HBCD pénètre ou peut pénétrer dans l'environnement en une quantité, à une concentration ou dans des conditions qui ont ou peuvent avoir un effet nuisible immédiat ou à long terme sur l'environnement ou sa diversité biologique. L'HBCD répond aux critères de persistance et de potentiel de bioaccumulation énoncés dans le *Règlement sur la persistance et la bioaccumulation* (Gouvernement du Canada, 2000). Ainsi, l'HBCD a été ajouté à la Liste des substances toxiques à l'annexe 1 de la LCPE le 12 novembre 2011.

Recommandations fédérales pour la qualité de l'environnement Hexabromocyclododécane (HBCD)

Utilisations

L'HBCD n'est pas fabriqué au Canada. Toutefois, de 100 000 à 1 000 000 kg de cette substance ont été importés en 2000 (Gouvernement du Canada, 2011). La substance a été ajoutée à divers produits de plastique et de polystyrène en tant que produits ignifugeants pour la fabrication de matériaux et de produits d'isolation thermique. L'HBCD est principalement utilisé comme ignifugeant dans les mousses de polystyrène expansé et les mousses de polystyrène extrudé pour la fabrication de matériaux d'isolation thermique destinés à être utilisés dans les secteurs résidentiel et industriel (Gouvernement du Canada, 2011). Les produits courants d'utilisation finale comprenaient les meubles, les garnitures de véhicules, les rideaux et les revêtements muraux (FRCA, 1998). Cette substance peut aussi être ajoutée au polystyrène choc employé dans l'équipement électrique et électronique, comme l'équipement audiovisuel (BSEF, 2003). L'HBCD est un ignifugeant de type additif, qui est combiné physiquement avec le matériau polymère hôte, plutôt que de s'y lier par réaction chimique. Par conséquent, une migration de l'HBCD est possible à partir de la matrice polymérique dans l'environnement durant l'utilisation et l'élimination de produits contenant la substance (US NRC, 2000).

Devenir, comportement et répartition dans l'environnement

Étant donné la faible pression de vapeur de l'HBCD ($6,27 \times 10^{-5}$ Pa à 21 °C), la constante de la loi d'Henry (0,14 à 68,8 Pa m³/mol), et solubilité ($3,4 \times 10^{-3}$ mg/L à 25 °C), mais de ses coefficients de partage élevés ($\log K_{oc} = 5,62$ à 5,81; $\log K_{ow} = 5,10$), l'HBCD rejeté dans l'environnement ne devrait pas se répartir dans l'air ou demeurer dans l'eau. Cependant, il peut pénétrer dans les sédiments ou le sol (Gouvernement du Canada, 2011). Les données modélisées laissent entendre que lorsque l'HBCD est libéré dans l'eau, 17% et 83% de l'HBCD se répartit dans l'eau et les sédiments respectivement (EQC, 2003).

L'HBCD est persistant dans l'environnement, et en raison du manque de groupements fonctionnels hydrolysables, l'hydrolyse ne constitue pas une voie de dégradation importante (Harris, 1990; American Chemistry Council, 2002). Sur une période de 28 jours, seulement 1 % de l'HBCD s'est biodégradé lors d'essais en laboratoire (MITI, 1992). Similairement, les demi-vies dans l'eau et le sol variaient de 182 jours à 5 ans (American Chemistry Council, 2002). Le taux de dégradation de l'HBCD dans les carottes de sédiments varie d'années à des décennies (Remberger *et al.*, 2004; Minh *et al.*, 2007; Kohler *et al.*, 2008; Tanabe, 2008). En revanche, la biodégradation rapide de l'HBCD par l'intermédiaire de la débromation par étapes a été observée dans un digesteur de boues d'usine de traitement des eaux usées, avec une demi-vie d'environ 0,6 jour (Gerecke *et al.*, 2006).

L'HBCD est bioaccumulable. Un facteur de bioconcentration (FBC) de 18 100 a été déclaré pour la tête-de-boule, et les facteurs de bioconcentration chez la truite arc-en-ciel variaient entre 4 650 et 12 866 (Veith *et al.*, 1979). Tomy *et al.* (2004) ont constaté une forte corrélation entre la concentration tissulaire d'HBCD dans le biote et le niveau trophique dans le réseau alimentaire pélagique du lac Ontario, avec des facteurs de bioamplification normalisés pour les lipides supérieurs à 1 pour la plupart des relations alimentaires. Des facteurs de bioamplification de 9,2, 4,3 et 7,2 ont été relevés pour l'hexabromocyclododécane α , β et γ , respectivement, entre la truite arc-en-ciel et le régime alimentaire (Law *et al.*, 2006a, b). Se trouvant généralement dans les corps de poissons, l'HBCD α prédomine (entre 65 et 70 %), suivi de l'HBCD β (entre 14 et 20 %) et de l'HBCD γ (entre 9 et 15 %) en abondance relative. L'interconversion de ces stéréoisomères dans certains poissons a également été documentée (CMABFRIP 2001).

Concentrations ambiantes

L'HBCD est omniprésent dans l'environnement. Une quantité totale d'HBCD variant de <0,075 à 3,7 ng/g en poids sec a été détectée dans des sédiments de la rivière Détroit du côté canadien (Marvin *et al.*, 2004). Law *et al.* (2006a) ont déclaré une concentration de 0,011 ng/L d'HBCD α dans l'eau de surface du bassin austral du lac Winnipeg en 2004. Dans le bassin des Grands Lacs, une concentration d'HBCD allant jusqu'à 35 ng/L a été relevée dans la neige (Backus *et al.*, 2005). Les concentrations moyennes totales d'HBCD

Recommandations fédérales pour la qualité de l'environnement Hexabromocyclododécane (HBCD)

chez les poissons du lac Winnipeg en 2000-2002, exprimées en tant que poids lipidique (pl), étaient de 3 ng/g chez le grand corégone, de 8 ng/g chez le meunier noir, de 12 ng/g chez le doré jaune, et de 65 ng/g chez la lotte (Law *et al.*, 2006a). Dans le lac Ontario, on a relevé les concentrations moyennes totales de 40 et de 92 ng/g en poids lipidique chez le doré jaune et le grand corégone, respectivement (Tomy *et al.*, 2004), et de 4,5 ng/g en poids humide (ph) chez la truite (Davis *et al.*, 2006). Dans l'Arctique canadien, on a relevé une concentration totale d'HBCD de 2,1 ng/g en poids lipidique chez la Mouette blanche sur l'île Seymour en 2004 (Braune *et al.*, 2007), et les concentrations totales d'HBCD dans le réseau trophique marin de l'Arctique variaient de 0,6 pg/g en poids lipidique chez la morue à 3,9 ng/g en poids lipidique chez le narval dans l'est de l'Arctique (Tomy *et al.*, 2008).

Mode d'action

L'HBCD est perturbateur endocrinien agissant sur la thyroxine (T₄), la triiodothyronine (T₃) et les hormones thyroïdales, cependant, son mode d'action n'est pas bien compris. L'HBCD a causé une expression de l'ARN messenger du récepteur T₄ à la surface de cellules hépatiques de rats, ce qui a entraîné une absorption accrue par le foie de la thyroxine (T₄) (van der Ven *et al.*, 2006) et a également reproduit l'action de la triiodothyronine (T₃) qui augmente la prolifération des cellules (Yamada-Okabe *et al.*, 2005). On a observé des effets de l'HBCD sur la thyroïde chez des animaux traités, cependant, en raison du manque de cohérence entre les deux sexes, le mécanisme de l'effet sur la thyroïde n'a été proposé que pour les femelles; ainsi, selon ce mécanisme, l'induction par l'HBCD des enzymes hépatiques augmente le métabolisme des hormones thyroïdales, ce qui entraîne, à son tour, une réduction des concentrations d'hormones thyroïdales dans le sang. Cette hypothèse est appuyée par les conclusions selon lesquelles l'HBCD a provoqué une stimulation des isoenzymes à cytochromes propres au sexe (Germer *et al.*, 2006). En outre, l'HBCD a été défini comme inhibant l'absorption par la membrane plasmique de la dopamine (neurotransmetteur) dans le cerveau de rats, et affectant directement le fonctionnement normal du cerveau (Mariussen et Fonnun, 2003).

Détermination des Recommandations fédérales pour la qualité de l'environnement

Recommandation fédérale pour la qualité des eaux

Il est préférable d'élaborer les Recommandations fédérales pour la qualité des eaux (RFQEx) à l'aide des protocoles du Conseil canadien des ministres de l'environnement (CCME, 2007). Dans le cas de l'HBCD, il était nécessaire d'établir une concentration estimée sans effet pour l'évaluation écologique préalable (CESE) ainsi que la RFQEx, même si l'on ne disposait pas de suffisamment de données sur la toxicité chronique pour satisfaire aux exigences de données minimales des recommandations¹ de type A ou type B du CCME. La RFQEx et la concentration estimée sans effet définissent toutes les deux des concentrations qui ne devraient pas être nocives pour l'environnement. La RFQEx élaborée dans le présent document définit des points de référence pour les écosystèmes aquatiques, dont l'objectif est de protéger toutes les formes de vie aquatique durant des périodes d'exposition indéfinies. La RFQEx s'applique à l'eau douce et à l'eau de mer, à moins que l'on puisse démontrer que la toxicité diffère significativement entre ces deux milieux (p. ex. en raison de l'ionisation).

Tableau 2. Toxicité aquatique chronique pour HBCD (Source: Gouvernement du Canada, 2011)

Espèces	Groupe	Paramètre	Concentration (µg/L)	Référence
Cladocère	●	CME0 après	5,6	CMABFRIP (1998)

¹ Le CCME (2007) propose deux approches pour élaborer des recommandations sur la qualité de l'eau, en fonction de la disponibilité et la qualité des données disponibles. L'approche privilégiée est d'utiliser la distribution statistique de toutes les données acceptables pour développer des recommandations de type A. La deuxième approche est basée sur une extrapolation à partir du plus faible, acceptable critère d'effet toxicologique pour élaborer des recommandations de type B. Pour plus de détails sur les exigences minimales relatives aux exigences du CCME voir CCME (2007).

Recommandations fédérales pour la qualité de l'environnement Hexabromocyclododécane (HBCD)

(<i>Daphnia magna</i>)		21 jours (croissance)		
Algues marines <i>Skeletonema costatum</i>	▲	CE ₅₀ après 3 jours (croissance)	9,3	Walsh et al. (1987)
Algues marines (<i>Thalassiosira pseudonana</i>)	▲	CE ₅₀ après 3 jours (croissance)	50	Walsh et al. (1987)

Légende : ● = Invertébré; ▲ = Végétaux

Le Gouvernement du Canada (2011) a évalué les données de toxicité aquatique pour HBCD (tableau 2). La concentration estimée sans effet (CESE) et la RFQEx sont basées sur la valeur critique de toxicité (VCT) de 5,6 µg/L qui découle d'une concentration minimale avec effet observé après 21 jours pour *Daphnia magna* (CHABFRIP, 1998) causant une croissance limitée, ainsi que sur un facteur d'application de 10 afin de tenir compte des variations interspécifiques et intraspécifiques et de l'extrapolation des conditions en laboratoire aux conditions sur le terrain. Cette RFQEx représente la concentration au-dessous de laquelle la probabilité d'effets nocifs sur la vie aquatique est faible ou nulle. Outre cette recommandation, deux autres gammes de concentration, qui doivent être utilisées dans le cadre de la gestion des risques, sont fournies (figure 1). À des concentrations supérieures à la RFQEx de 0,56 µg/L et à la valeur critique de toxicité de 5,6 µg/L, il y a un risque modéré d'effets nocifs pour la vie aquatique. Les concentrations supérieures à 5,6 µg/L présentent un risque plus élevé de causer des effets nocifs pour la vie aquatique. Il se peut que les gestionnaires des risques trouvent utiles ces niveaux de concentration additionnels pour définir des objectifs de gestion des risques à court terme ou provisoires, lors d'une planification de gestion des risques par étapes. On peut également se servir de niveaux de concentration moyens à élevés pour fixer des objectifs provisoires visant une moindre protection lorsque les eaux sont déjà fortement dégradées ou lorsque des considérations d'ordre socioéconomique rendent difficile le respect de la RFQEx.

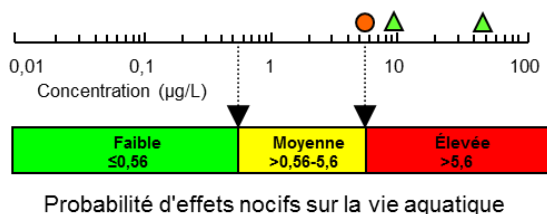


Figure 1. Probabilité relative des effets nocifs de l'HBCD pour la vie aquatique. La RFQEx (0,56 µg/L) et la VCT (5,6 µg/L) sont marquées par des flèches

Recommandations fédérales sur la qualité des sédiments

La Recommandation fédérale sur la qualité des sédiments (RFQS) vise à protéger les animaux vivant dans les sédiments ainsi que les animaux pélagiques lesquels bioaccumulent l'HBCD provenant sédiments (Tableau 1) La RFQS se rapporte à des périodes d'exposition indéfinies à des sédiments en eau douce ou en milieu marin, et elle précise la concentration d'HBCD se trouvant dans la masse des sédiments (en poids sec), qui ne devrait pas entraîner d'effets nocifs. Il n'est peut-être pas approprié d'évaluer l'incidence de l'HBCD présent dans les sédiments sur les plantes.

Tout comme dans le rapport d'évaluation préalable (Gouvernement du Canada, 2011), la concentration minimale avec effet observé après 28 jours de 29,25 mg/g en poids sec (1,8 % de carbone organique) pour le ver d'eau douce *Lumbriculus variegatus* (Oetken *et al.*, 2001) a été sélectionnée comme la valeur critique de toxicité pour calculer les RFQS. La valeur critique de toxicité a été ajustée à un 1 % de carbone organique dans les sédiments (16 mg/kg en poids sec) et un facteur d'application de 10 a été appliqué. La valeur obtenue de 1,6 mg/kg en poids sec est la RFQS. En plus de la RFQS, trois plages de concentrations

Recommandations fédérales pour la qualité de l'environnement Hexabromocyclododécane (HBCD)

représentant les risques relatifs d'effets nocifs pour les organismes marins, soit faibles, moyens et élevés, ont été définies pour faciliter la gestion des risques associés à l'HBCD (figure 2). À des concentrations égales ou inférieures à la RFQS (1,6 mg/kg en poids sec), il y a un risque faible d'effets nocifs pour la vie aquatique. À des concentrations supérieures à la RFQS et à la valeur critique de toxicité de 16 mg/kg en poids sec, il y a un risque modéré d'effets nocifs pour la vie aquatique. Les concentrations supérieures à 16 mg/kg en poids sec présentent un risque plus élevé de causer des effets nocifs pour la vie aquatique. Comme c'est le cas pour la gestion des eaux douces, il se peut que les gestionnaires des risques trouvent que ces échelles de concentrations supplémentaires sont utiles pour la planification de gestion des risques. On peut également se servir de niveaux de concentration moyens à élevés pour fixer des objectifs provisoires visant une moindre protection lorsque les eaux sont déjà fortement dégradées ou lorsque des considérations d'ordre socioéconomique rendent difficile le respect de la RFQS.

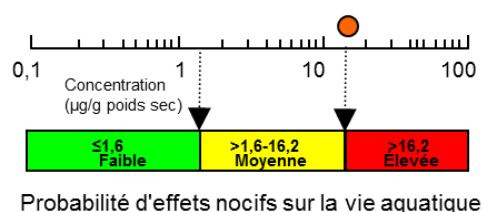


Figure 2. Probabilité relative aux effets nocifs de l'HBCD pour les organismes benthiques dans les sédiments aquatiques. La RFQS (1,6 mg / kg de poids sec) et la VCT (16,2 mg / kg de poids sec) sont indiquées par des flèches.

Recommandations fédérales sur les tissus des poissons

Les Recommandations fédérales sur les tissus des poissons (RFTP) constituent des points de référence pour les écosystèmes aquatiques, dont l'objectif est de protéger les poissons des effets nocifs directs (tableau 1). Ces RFTP s'ajoutent à celles relatives à la qualité des eaux, étant donné qu'elles proposent d'autres critères pour déterminer les effets nocifs potentiels. Les RFTP s'appliquent autant aux espèces de poissons marins et d'eau douce et elles précisent la concentration d'HBCD trouvée dans les tissus de poissons entiers (poids humide) qui ne devrait pas avoir des effets nocifs sur les poissons. Ces RFTP pourraient ne pas être appropriées pour évaluer les répercussions de l'HBCD trouvé dans des biotes aquatiques non représentés (amphibiens, invertébrés ou plantes dans le cas présent).

À l'heure actuelle, il n'existe pas de données de toxicité directes sur l'HBCD qui sont fondées sur les charges tissulaires des poissons. Les RFTP sont donc basées sur les charges tissulaires des poissons estimées à partir des concentrations d'HBCD dans l'eau et sur le degré auquel il y a une accumulation d'HBCD dans l'eau (c.-à-d., facteur de bioconcentration). Des concentrations d'HBCD égales ou inférieures de l'eau devraient causer des effets nocifs chez les poissons. En multipliant la RFQEx par le facteur de bioconcentration de l'HBCD, nous avons estimé une concentration tissulaire qui ne devrait pas entraîner d'effets nocifs chez les poissons. Cette concentration tissulaire chez les poissons constitue la RFTP. Tandis que Veith *et al.* (1979) ont trouvé un facteur de bioconcentration de 18 100 L/kg en poids humide à l'état stable chez la tête-de-boule (*Pimephales promelas*) exposée à une concentration aqueuse d'HBCD, une valeur plus faible de 12 866 L/kg en poids humide a été déclarée pour la truite arc-en-ciel (CMABFRIP, 2000). En prenant une moyenne géométrique de ces facteurs de bioconcentration (15 260 L/kg en poids humide), la RFTP a été établie à 8 546 µg/kg en poids humide (0,56 µg/L x 15 260 L/kg) ou 8,5 mg/kg en poids humide.

Recommandations fédérales pour la qualité de l'environnement Hexabromocyclododécane (HBCD)

Recommandations fédérales sur le régime alimentaire de la faune

Ces Recommandations fédérales sur le régime alimentaire de la faune (RFRAF) ont pour objectif de protéger les consommateurs mammifères non humains de biote aquatique. Il s'agit de concentrations repères de substances toxiques dans le biote aquatique (corps entier, poids humide) consommées par la faune terrestre et semi-aquatique. Par ailleurs, ces RFRAF pour les mammifères pourraient ne pas être appropriées pour extrapoler les répercussions du HBCD sur d'autres consommateurs terrestres (p. ex. oiseaux ou reptiles).

La RFRAF est basée sur la concentration estimée sans effet (CESE) liée aux organismes terrestres pour l'HBCD, tel qu'elle est établie par le gouvernement du Canada (2011). La concentration estimée sans effet est, quant à elle, basée sur une concentration minimale avec effet nocif observé de 101,6 mg/kg p.c. par jour liée à la toxicité pour la reproduction sur deux générations chez des rats (Ema *et al.*, 2008). On a appliqué la transposition inter-espèces en vue d'extrapoler la concentration minimale avec effet nocif observé en tant que dose journalière admissible chez des rats à la concentration d'aliments chez le vison *Mustela*, une espèce sauvage substitut. En supposant que toute l'exposition à la substance s'effectue par l'intermédiaire d'aliments et que la substance est complètement biodisponible pour l'absorption par l'organisme, le calcul a utilisé le poids corporel typique d'un adulte (p.c.; 0,6 kg) et un taux d'ingestion quotidien de nourriture (TIQ : 0,143 kg en poids humide par jour) d'un vison femelle pour estimer la valeur critique de toxicité chez le vison sur la base d'une exposition par des aliments (CCME 1998). Voici ce calcul : $VCT_{\text{nourriture}} = (VCT_{\text{TIQ chez des rats}} \times p.c.\text{-vison}) / FI_{\text{vison}} = (101 \text{ mg/kg p.c. par jour} \times 0,6 \text{ kg p.c.}) \div 0,143 \text{ kg en poids humide par jour} = 423 \text{ mg HBCD kg en poids humide de nourriture}$. On a ensuite appliqué un coefficient d'échelle allométrique de 0,94 (Sample et Arenal, 1999) à cette VCT, afin de tenir compte de la sensibilité élevée observée chez de plus gros animaux (p. ex. vison) par rapport à de plus petits (p. ex. rat). La VCT finale incorporant les transpositions inter-espèces et allométriques est par conséquent de 398 mg/kg d'aliments (poids humide). Un facteur d'application de 10 a été appliqué pour tenir compte de l'extrapolation des conditions de laboratoire à celles sur le terrain, et la RFRAF finale (la CESE) a été établie à 40 mg/kg en poids humide d'aliments.

Références

- [ACC] American Chemistry Council. 2002. Robust summaries and test plans: Cyclododecane. HPV test plan. Document préparé par l'American Chemistry Council (ACC) Brominated Flame Retardant Industry Panel (BFRIP). Washington (DC) : Environmental Protection Agency des États-Unis. [consulté le 23 août 2007]. Accès : <http://www.epa.gov/chemrtk/pubs/summaries/cyclodod/c13459tc.htm>
- [ACCBFRIP] American Chemistry Council Brominated Flame Retardant Industrial Panel. 2005. HPV data summary and test plan for hexabromocyclododecane (HBCD). CAS No. 3194556. 20 décembre 2001. Mis à jour en septembre 2003 et en mars 2005. Arlington (VA) : American Chemistry Council Brominated Flame Retardant Industry Panel. 52 p.
- Backus, S., Batchelor, S., Alae, M., Ueno, D., Hewitt, L.M. 2005. Isomer-specific determination of hexabromocyclododecane in abiotic and biotic samples by high performance liquid chromatography/atmospheric pressure photoionization tandem mass spectrometry. Résumé de Dioxin 2005, du 21 au 26 août, Toronto (Ont.) p. 240-243.
- Braune, B.M., Mallory, M.L., Gilchrist, H.G., Letcher, R.J., Drouillard, K.G. 2007. Levels and trends of organochlorines and brominated flame retardants in ivory gull eggs from the Canadian Arctic, 1976 to 2004. *Sci. Total Environ.* 378:403-417.
- [BSEF] Bromine Science and Environmental Forum. 2003. Fiche d'information. HBCD. Hexabromocyclododecane. Édition 2003. Bruxelles (Belgique) : Bromine Science and Environmental Forum. 4 p.
- Canada. 1999. *Loi canadienne sur la protection de l'environnement (1999)*. L.C., 1999, ch. 33. *Gazette du Canada*, Partie III, vol. 22, n° 3. Accès : <http://laws-lois.justice.gc.ca/fra/lois/C-15.31/>
- Canada. 2000. *Loi canadienne sur la protection de l'environnement (1999) : Règlement sur la persistance et la bioaccumulation*. C.P. 2000-348, 29 mars 2000, DORS/2000-107. Accès : <http://publications.gc.ca/gazette/archives/p2/2000/2000-03-29/pdf/g2-13407.pdf>.
- Canada. 2008. Évaluation préalable finale pour le Défi concernant le Phénol, 4,4' -(1-méthyléthylidène)bis (Bisphénol-A).
- Canada. 2011. Rapport d'évaluation préalable. Registre environnemental de la LCPE – Hexabromocyclododécane (HBCD). Septembre 2009. Accès : <http://www.ec.gc.ca/lcpe-cepa/default.asp?lang=Fr&n=A27E7A60-1&offset=1&toc=show>

Formatted: French (Canada)

Recommandations fédérales pour la qualité de l'environnement Hexabromocyclododécane (HBCD)

- [CCHST] Centre canadien d'hygiène et de sécurité au travail. 1999. Fiche signalétique – hexabromocyclododécane. Accès : <http://ccinforeweb2.ccohs.ca/msds/Action.lasso?-database=msds&-layout=Display&-response=detail.html&-op=eq&MSDS+RECORD+NUMBER=4631160&-search>
- [CCME] Conseil canadien des ministres de l'environnement. 1998. Protocole d'élaboration de recommandations pour les résidus dans les tissus en vue de protéger les espèces fauniques consommant le biote aquatique au Canada. Winnipeg (Man.) : Conseil canadien des ministres de l'environnement. [réimpression dans *Recommandations canadiennes pour la qualité de l'environnement*, chapitre 8, Conseil canadien des ministres de l'environnement, 1999, Winnipeg]. 19 p.
- [CCME] Conseil canadien des ministres de l'environnement. 2007. Protocole d'élaboration des recommandations pour la qualité des eaux en vue de protéger la vie aquatique. In: *Recommandations canadiennes pour la qualité des eaux*, 1999. Winnipeg (Man.) : Conseil canadien des ministres de l'environnement.
- [CCOHS] Canadian Centre for Occupational Health and Safety. 1999. Material Safety Data Sheet (MSDS) for hexabromocyclododecane. Available from: <http://ccinforeweb2.ccohs.ca/msds/Action.lasso?-database=msds&-layout=Display&-response=detail.html&-op=eq&MSDS+RECORD+NUMBER=4631160&-search>
- [CMABFRIP] Chemical Manufacturers Association Brominated Flame Retardant Industry Panel. 1998. Hexabromocyclododecane (HBCD): A flow-through life-cycle toxicity test with the cladoceran (*Daphnia magna*). Easton (MD): Wildlife International, Ltd. Project No. 439A-108. 78 pp.
- [CMABFRIP] Chemical Manufacturers Association Brominated Flame Retardant Industry Panel. 2000. Hexabromocyclododecane (HBCD): A flow-through bioconcentration test with the rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*). Easton (MD) : Wildlife International Ltd. Project No. 439A-11.
- [CMABFRIP] Chemical Manufacturers Association Brominated Flame Retardant Industry Panel. 2001. A 90-day oral (gavage) toxicity study of HBCD in rats. Ashland (OH) : WIL Research Laboratories, Inc. Study No. WIL-186012. 1527 p.
- Davis, J.W., Gonsior, S.J., Markham, D.A., Friederich, U., Hunziker, R.W., Ariano, J.M. 2006. Biodegradation and product identification of [¹⁴C] hexabromocyclododecane in wastewater sludge and freshwater aquatic sediment. *Environ. Sci. Technol.* 40:5395-5401.
- Ema, M., Fujii, S., Hirata-Koizumi, M., Mastumoto, M. 2008. Two-generation reproductive toxicity study of the flame retardant hexabromocyclododecane in rats. *Reprod. Toxicol.* 25:335-351.
- [EQC] Equilibrium Criterion Model. 2003. Version 2.02. Peterborough (ON): Trent University, Canadian Environmental Modelling Centre. <http://www.trentu.ca/academic/aminss/envmodel/models/EQC2.html>
- [FRCA] Fire Retardant Chemicals Association. 1998. Textile flame retardant applications by product classes for 1997 within and outside of the United States. Document présenté à la United States Consumer Product Safety Commission. [cité dans Gardner, D., Walker, B. (éd.) 2000. *Toxicological risks of selected flame retardants*. Washington (DC) : National Academy Press].
- Gerecke, A.C., Giger, W., Hartmann, P.C., Heeb, N.V., Kohler, H.E., Schmid, P., Zennegg, M., Kohler, M. 2006. Anaerobic degradation of brominated flame retardants in sewage sludge. *Chemosphere* 64:311-317.
- Germer, S., Piersma, A.H., van der Ven, L., Kamyschnikov, A., Fery, Y., Schmitz, H.J., Schrenk, D. 2006. Subacute effects of the brominated flame retardants hexabromocyclododecane and tetrabromobisphenol A on hepatic cytochrome P450 levels in rats. *Toxicol.* 218:229-236.
- Harris, J.C. 1990. Rate of hydrolysis. In: Lyman, W.J., Reehl, W.F., Rosenblatt, D.H. (éd.) *Handbook of Chemical Property Estimation Methods*. Washington (DC) : American Chemical Society. p. 7-1-7-46.
- Kohler, M., Zennegg, M., Bogdal, C., Gerecke, A.C., Schmid, P., Heeb, N.V., Sturm, M., Vonmont, H., Kohler, H.E., Giger, W. 2008. Temporal trends, congener patterns, and sources of octa-, nona-, and decabromodiphenyl ethers (PBDE) and hexabromocyclododecanes (HBCD) in Swiss lake sediments. *Environ. Sci. Technol.* 42:6378-6384.
- Law, K., Halldorson, T., Danell, R., Stern, G., Gewurtz, S., Alae, M., Marvin, C., Whittle, M., Tomy, G. 2006a. Bioaccumulation and trophic transfer of some brominated flame retardants in a Lake Winnipeg (Canada) food web. *Environ. Toxicol. Chem.* 25:2177-2186.
- Law, K., Palace, V.P., Halldorson, T., Danell, R., Wautier, K., Evans, B., Alae, M., Marvin, C., Tomy, G.T. 2006b. Dietary accumulation of hexabromocyclododecane diastereoisomers in juvenile rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*). I. Bioaccumulation parameters and evidence of bioisomerization. *Environ. Toxicol. Chem.* 25:1757-1761.
- Mack, A.G. 2004. Flame retardants, halogenated. In: *Kirk-Othmer Encyclopedia of Chemical Technology*. Accès : <http://www.mrw.interscience.wiley.com/> [réserve de consultation].
- Mariussen, E., Fonnum, F. 2003. The effect of brominated flame retardants on neurotransmitter uptake into rat brain synaptosomes and vesicles. *Neurochem. Int.* 43:533-542.
- Marvin, C.H., Tomy, G.T., Alae, M., MacInnis, G. 2004. Distribution of hexabromocyclododecane in Detroit River suspended sediments. Résumé du Third International Workshop on Brominated Flame Retardants. Atelier tenu du 6 au 9 juin, à Toronto, Canada. p. 137-140.
- Minh, N.H., Isobe, T., Ueno, D., Matsumoto, K., Mine, M., Kajiwara, N., Takahashi, S., Tanabe, S. 2007. Spatial distribution and vertical profile of polybrominated diphenyl ethers and hexabromocyclododecanes in sediment core from Tokyo Bay, Japan. *Environ. Pollut.* 148:409-417.
- [MITI] Ministry of International Trade and Industry (Japon). 1992. Biodegradation and bioaccumulation data of existing chemicals based on the CSCL Japan. Tokyo (Japon) : Japan Chemical Industry Ecology-Toxicology and

Field Code Changed

Formatted: English (U.S.)

Recommandations fédérales pour la qualité de l'environnement Hexabromocyclododécane (HBCD)

Information Centre.

- Oetken, M., Ludwichowski, K., Nagel, R. 2001. Validation of the preliminary EU-concept of assessing the impact of chemicals to organisms in sediment by using selected substances. Dresden (Allemagne) : Federal Environmental Agency. Mars 2001. 97 p.
- Remberger, M., Sternbeck, J., Palm, A., Kaj, L., Strömberg, K., Brorström-Lundén, E. 2004. The environmental occurrence of hexabromocyclododecane in Sweden. *Chemosph.* 54:9-21.
- Sample, B.E., Arenal, C.A. 1999. Allometric models for interspecies extrapolation of wildlife toxicity data. *Bull. Environ. Contam. Toxicol.* 62:653-663.
- Tanabe, S. 2008. Temporal trends of brominated flame retardants in coastal waters of Japan and South China: retrospective monitoring study using archived samples from es-Bank, Ehime University, Japan. *Mar. Pollut. Bull.* 57:267-274.
- Tomy, G.T., Budakowski, W., Halldorson, T., Whittle, D.M., Keir, M.J., Marvin, C., MacInnis, G., Alae, M. 2004. Biomagnification of α - and γ -hexabromocyclododecane isomers in a Lake Ontario food web. *Environ. Sci. Technol.* 38:2298-2303.
- Tomy, G.T., Pleskach, K., Oswald, T., Halldorson, T., Helm, P.A., MacInnis, G., Marvin, C.H. 2008. Enantioselective bioaccumulation of hexabromocyclododecane and congener-specific accumulation of brominated diphenyl ethers in an eastern Canadian Arctic marine food web. *Environ. Sci. Technol.* 42:3634-3639.
- [USNRC] United States National Research Council. 2000. Toxicological risks of selected flame-retardant chemicals. Washington (DC) : National Academy Press. 534 p.
- van der Ven, L., Verhoef, A., van de Kuil, T., Slob, W.P., Leonards, P., Visser, T., Hamers, T., Hakansson, H., Olausson, H., Piersma, A. 2006. A 28-day oral dose toxicity study enhanced to detect endocrine effects of hexabromocyclododecane in Wistar rats. *Toxicol. Sci.* 94:281-292.
- Veith, G.D., DeFoe, D.L., Bergstedt, B.V. 1979. Measuring and estimating the bioconcentration factor of chemicals in fish. *J. Off. Rech. Pêch. Can.* 36:1040-1048.
- Walsh, G.E., Yoder, M.J., McLaughlin, L.L., Lores, E.M. 1987. Responses of marine unicellular algae to brominated organic compounds in six growth media. *Ecotoxicol. Environ. Saf.* 14:215-222.
- Yamada-Okabe, T., Sakai, H., Kashima, Y., Yamada-Okabe, H. 2005. Modulation at a cellular level of the thyroid hormone receptor-mediated gene expression by 1,2,5,6,9,10-hexabromocyclododecane (HBCD), 4,4'-diiodobiphenyl (DIB), and nitrofen (NIP). *Toxicol. Lett.* 155:127-133.

Liste des acronymes et des abréviations

- AI: p.c. – Rapport apport alimentaire-poids corporel
CAS – Chemical Abstracts Service
CESE – Concentration estimée sans effet
CMEO – Concentration minimale avec effet observé
DJA – Dose journalière admissible
DMEO – Dose minimale avec effet observé
DSEO – Dose sans effet observé
FA – Facteur d'application
FBAm – Facteur de bioamplification
FBC – Facteur de bioconcentration
HBCD – Hexabromocyclododécane
IB – Ignifugeant bromé
K_{co} – Coefficient de partage carbone organique-eau
K_{oc} – Coefficient de partage octanol-eau
p.s. = poids sec
PGPC – Plan de gestion des produits chimiques
ph – poids humide
pl – poids lipidique
REP – Rapport d'évaluation préalable
RFQE – Recommandations fédérales pour la qualité de l'environnement
RFQEx – Recommandations fédérales pour la qualité des eaux
RFQS – Recommandations fédérales sur la qualité des sédiments
RFRAF – Recommandations fédérales sur le régime alimentaire de la faune
RFTP – Recommandations fédérales sur les tissus des poissons
VCT – Valeur critique de toxicité