

ANTHRACÈNE

Dernière mise à jour : 25/05/2005

RESPONSABLE DU PROGRAMME

A. PICHARD : annick.pichard@ineris.fr

EXPERTS AYANT PARTICIPÉ A LA RÉDACTION

M. BISSON - G. HEUZE - G. LACROIX - J.P. LEFEVRE - H. MAGAUD -
L. MALLERET

DOCUMENTATION

C. GILLET

Afin d'avoir une meilleure compréhension de cette fiche, les lecteurs sont invités à se référer à la méthodologie de renseignements.

Cette fiche a été examinée et discutée avec le Docteur Alain Baert, Benoît Hervé Bazin et le Professeur Jean-Marie Haguenoer.

ANTHRACÈNE

ANTHRACÈNE

SOMMAIRE

1. GÉNÉRALITÉS	6
1.1 Identification/caractérisation	6
1.2 Principes de production	6
1.3 Utilisations	6
1.4 Principales sources d'exposition	7
2. PARAMÈTRES D'ÉVALUATION DE L'EXPOSITION	8
2.1 Paramètres physico-chimiques	8
2.2 Comportement	10
2.2.1 Dans l'eau	10
2.2.2 Dans les sols	10
2.2.3 Dans l'air	10
2.3 Persistance	11
2.3.1 Dégradation abiotique	11
2.3.2 Biodégradation	11
2.4 Bio-accumulation et métabolisme	11
2.4.1 Organismes aquatiques	11
2.4.2 Organismes terrestres y compris les végétaux	11
3. DONNÉES TOXICOLOGIQUES	11
3.1 Devenir dans l'organisme	12
3.2 Toxicologie aiguë	13
3.3 Toxicologie chronique	14
3.3.1 Effets systémiques	14
3.3.2 Effets cancérigènes	15

ANTHRACÈNE

3.3.3 Effets sur la reproduction et le développement	17
3.4 Valeurs toxicologiques de référence	17
3.4.1 Valeurs toxicologiques de référence de l'ATSDR, l'US EPA et l'OMS	18
3.4.2 Valeurs toxicologiques de référence de Santé Canada, du RIVM et de l'OEHHA	19
4. DONNÉES ÉCOTOXICOLOGIQUES	19
4.1 Paramètres d'écotoxicité aiguë	20
4.1.1 Organismes aquatiques	20
4.1.2 Organismes terrestres	20
4.2 Paramètres d'écotoxicité chronique	20
4.2.1 Organismes aquatiques	20
4.2.2 Organismes terrestres	21
5. VALEURS SANITAIRES ET ENVIRONNEMENTALES	21
5.1 Étiquetage - Milieu de travail	21
5.2 Nomenclature Installations classées (IC)	21
5.3 Valeurs utilisées en milieu de travail - France	21
5.4 Valeurs utilisées pour la population générale	21
5.4.1 Qualité des eaux de consommation	21
5.4.2 Qualité de l'air	22
5.4.3 Valeurs moyennes dans les milieux biologiques	22
5.5 Concentrations sans effet prévisible pour l'environnement (PNEC).	22
Propositions de l'INERIS	22
5.5.1 Compartiment aquatique	22
5.5.2 Compartiment sédimentaire	22
5.5.3 Compartiment terrestre	23
6. MÉTHODES DE DÉTECTION ET DE QUANTIFICATION DANS L'ENVIRONNEMENT	23
6.1 Familles de substances	23
6.2 Principes généraux	23
6.2.1 Eau	23
6.2.2 Air	25

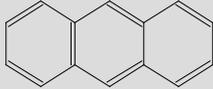
ANTHRACÈNE

6.2.3 Sols	26
6.3 Principales méthodes	27
6.3.1 Présentation des méthodes	27
6.3.3 Tableau de synthèse	34
7. BIBLIOGRAPHIE	35

ANTHRACÈNE

1. GÉNÉRALITÉS

1.1 Identification/caractérisation

Substance chimique	N° CAS	N° EINECS	Synonymes	Forme physique (*)
ANTHRACENE $C_{14}H_{10}$ 	120-12-7	204-371-1	paranaphtalène anthracin	solide cristallisé sous forme de feuillets

(*) dans les conditions ambiantes habituelles

Impuretés (HSDB, 2001):

- phénantrène
- carbazole
- chrysène
- pyridine : < 0,2 %
- fer : < 0,03 %

1.2 Principes de production

La distillation des goudrons de charbon permet de recueillir de l'huile d'anthracène, riche en anthracène dans la fraction correspondant à des températures d'ébullition comprises entre 300 et 360 °C .

Le phénantrène et le carbazole, également présents dans l'huile d'anthracène, sont éliminés par des distillations et des cristallisations successives, ou par extraction avec des solvants appropriés permettant d'obtenir de l'anthracène pur à 95 %.

De l'anthracène très pur peut être préparé à partir d'antraquinone de synthèse.

1.3 Utilisations

L'anthracène est utilisé comme intermédiaire chimique pour la préparation de matières colorantes et pour la formation de polyradicaux destinés à la fabrication de résines.

ANTHRACÈNE

Il est principalement employé pour la fabrication de l'antraquinone (intermédiaire pour la fabrication de teintures).

Il est utilisé comme diluant des produits de protection du bois, comme insecticide et comme fongicide.

Il est d'autre part employé pour synthétiser l'agent chimiothérapeutique "Amsacrine®".

Il fait partie des photoconducteurs organiques cristallisés utilisés en électrophotographie.

Dans sa forme la plus pure, l'anthracène est fréquemment employé en physique nucléaire comme substance scintillante pour la détection des radiations de haute énergie.

1.4 Principales sources d'exposition

L'anthracène est naturellement présent dans les combustibles fossiles (12 g/kg de charbon).

Il est présent dans le fioul (100 à 300 mg/L), dans l'essence (1,55 mg/L, voire 2,6 mg/L pour les essences à indice d'octane élevé)(Verschueren, 1996).

Les principales sources anthropiques d'exposition sont :

- les échappements des moteurs d'automobiles (0,02 à 6,45 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (OMS IPCS, 1998),
- la cokéfaction et la gazéification du charbon et plus généralement les émissions des fours à charbon et des fours à fioul,
- le raffinage du pétrole,
- l'utilisation des huiles d'imprégnation pour le traitement du bois,
- la préparation de l'asphalte pour les revêtements routiers,
- la fumée de charbon de bois,
- la combustion de déchets de pneumatiques (caoutchouc).

D'une manière générale, l'anthracène est présent dans les fumées émises lors de combustions incomplètes.

ANTHRACÈNE

Concentrations ubiquitaires

Milieu	Concentration
Air	< 0,1 ng/m ³ (1)
Eau	
-Eau de surface	(2)
-Eau de pluie	< 20 ng/L(3)
-Eau souterraine	< 0,1 µg/L(3)
Sols	≅10 µg/kg (4)
Sédiments	(5)

(1) Estimé sur la base de données fournies par HSDB (2001), IUCLID (2000), OMS IPCS (1998) et Verschuieren (1996) concernant des sites européens.

(2) Les données européennes disponibles relatives aux eaux douces de surface, fournies par HSDB (2001) et IUCLID (2000), sont très dispersées : 6 à 10 000 pg/L . Pour les eaux de surface, l' ATSDR (1995) cite d'autre part une évaluation < 10 µg/L pour 15 HAP, dont l'anthracène. Pas de données européennes disponibles pour l'eau de mer et l'eau de pluie.

(3) OMS IPCS (1998).

(4) Estimé sur la base de données concernant l'Angleterre fournies par HSDB (2001) et IUCLID (2000) et sur la base de données américaines fournies par l'ATSDR (1995).

(5) Les données disponibles ne permettent pas de fixer une valeur.

2. PARAMÈTRES D'ÉVALUATION DE L'EXPOSITION

2.1 Paramètres physico-chimiques

Paramètre	Valeur	Etendue	Référence
Facteur de conversion (dans l'air à 20 °C)	1 ppm = 7,4 mg/m ³ 1 mg/m ³ = 0,13 ppm		
Seuil olfactif (ppm)	Non disponible		
Masse molaire (g/mol)	178,23(1)		HSDB (2001), Lide (1997), Merck (1996), Verschuieren (1996), Weiss (1986)
Point d'ébullition (°C) (à pression normale)	340,9(2)	339,9 - 342	HSDB (2001), IUCLID (2000), Lide (1997), Merck (1996), Ullmann (1996), Verschuieren (1996), Weiss (1986)
Pression de vapeur (Pa)	(3)	3,6.10 ⁻⁴ à 1,1.10 ⁻¹ à 25 °C	HSDB (2001), IUCLID (2000), OMS IPCS(1998)

ANTHRACÈNE

Densité -vapeur (par rapport à l'air)	6,15		HSDB (2001), Verschueren (1996)
-solide	$d_{4}^{25} = 1,28$		IUCLID (2000), Lide (1997)
Tension superficielle (N/m)	Non concerné		
Viscosité dynamique (Pa.s)	Non concerné		
Solubilité (mg/L) dans l'eau	1,29 à 25 °C ⁽⁴⁾		HSDB (2001), Verschueren (1996)
Log Kow	4,45 ⁽¹⁾	3,45 à 4,8	ATSDR (1995), Hempfling <i>et al.</i> (1997), HSDB (2000), OMS IPCS (1998), IUCLID (1996,2000), STF (1991), US EPA (1996), Verschueren (1996), CHEMFATE (2001)
Koc (L/kg)	25 700 ⁽⁵⁾	2 600 à 725 000	ATSDR (1995), Hempfling <i>et al.</i> (1997), HSDB (2000), OMS IPCS (1998), STF 1991), CHEMFATE (2001)
Coefficient de partage sol-eau : Kd (L/kg)	⁽⁶⁾		
Coefficient de partage sédiments-eau : Kd (L/kg)	⁽⁶⁾		
Coefficient de partage Matière en Suspension- eau : Kd (L/kg)	⁽⁶⁾		
Constante de Henry (Pa.m ³ /mol)	5,04 ⁽⁷⁾	1,76 à 72,9	ATSDR (1995), Hempfling <i>et al.</i> (1997), HSDB (2000), OMS IPCS (1998), STF (1991), US EPA (1996), CHEMFATE (2001)
Coefficient de diffusion dans l'air (cm ² /s)	4,28.10 ⁻² ⁽²⁾	3,24.10 ⁻² et 5,4.10 ⁻²	STF (1991), US EPA (1996)
Coefficient de diffusion	6,72.10 ⁻⁶ ⁽²⁾	5,70.10 ⁻⁶ et	STF (1991), US EPA (1996)

ANTHRACÈNE

dans l'eau (cm ² /s)		7,74.10 ⁻⁶	
Coefficient de diffusion à travers le PEHD (m ² /j)	5.10 ⁻⁷		Veerkamp et ten Berge (1994)
Perméabilité cutanée à une solution aqueuse (cm/h)	Non disponible		

Choix des valeurs :

- (1) Valeur la plus fréquemment rencontrée.
- (2) Moyenne arithmétique des valeurs.
- (3) Données très dispersées traduisant toutes une tension de vapeur très faible.
- (4) Dans l'eau distillée. Des valeurs de 0,021 et 0,032 mg/L à 20 °C sont d'autre part citées par IUCLID (2000) pour des eaux de mer.
- (5) Moyenne de mesures sur plusieurs sols.
- (6) La valeur pourra être calculée à partir de l'expression suivante : $K_d = f_{oc} \times K_{oc}$ (suivant l'hypothèse d'une adsorption sur la seule fraction organique du sol, du sédiment ou des matières en suspension, ce qui revient à négliger l'adsorption sur la fraction minérale et qui conduit à majorer le transfert du sol vers l'eau ou l'air). La valeur de f_{oc} est issue de mesure de terrain ou par défaut une valeur issue de la littérature, par exemple celle du TGD (CE, 1996), de 0,02 pour f_{oc_sol} , de 0,05 pour f_{oc_sed} , de 0,1 pour f_{oc_mes} .
- (7) Moyenne arithmétique de toutes les valeurs prises en compte. La valeur la plus importante n'a pas été incluse car trop différente des autres.

2.2 Comportement

2.2.1 Dans l'eau

Il s'adsorbe facilement sur la matière en suspension. Cependant, étant donné sa constante de Henry, il peut aussi se volatiliser. Ces deux phénomènes sont donc concurrents (HSDB, 2001).

2.2.2 Dans les sols

L'anthracène est peu à pas mobile dans les sols (HSDB, 2001).

L'anthracène peut facilement se volatiliser à partir des sols humides, son adsorption importante sur la matière organique peut cependant atténuer ce phénomène. Par contre, il ne se volatilise que très peu à partir des sols secs (HSDB, 2001).

2.2.3 Dans l'air

L'anthracène se présente dans l'atmosphère sous vapeur ou adsorbée sur la matière particulaire. Plus de 78 % de l'anthracène présent dans l'atmosphère peut l'être sous forme vapeur (HSDB, 2001).

ANTHRACÈNE

2.3 Persistance

2.3.1 Dégradation abiotique

Dans de l'eau distillée et exposé à la lumière naturelle, l'anthracène est dégradé par photolyse en quelques heures (Callahan *et al.*, 1979). Dans de l'eau aérée, les produits de dégradation sont l'endopéroxyde et le 9,10-anthraquinone. Dans de l'eau peu oxygénée, les produits de dégradation sont les trois isomères du 10,10'-dihydroxy-9,9',10,10'-tétrahydro-9,9'-bianthryl (Sigman *et al.*, 1991).

Dans l'atmosphère, sa demi-vie due aux réactions avec les radicaux hydroxyles est de 3,4 h pour une concentration de $5 \cdot 10^5$ radicaux hydroxyles/cm³ (Atkinson, 1989).

2.3.2 Biodégradation

Le test MITI I modifié (ligne directrice OCDE 301 C) a été réalisé. Le résultat est qu'après 28 jours seulement 1,9 % de la substance a été dégradée. On peut donc dire que la substance n'est pas facilement biodégradable CITI (1992).

2.4 Bio-accumulation et métabolisme

2.4.1 Organismes aquatiques

Espèces	BCF	Remarques	Références
<i>Lepomis macrochirus</i>	900 ^a		Spacie <i>et al.</i> , 1983
<i>Oncorhynchus mykiss</i>	9 000 ^a		Linder <i>et al.</i> , 1985
<i>Cyprinus carpio</i>	903 - 2 820	Ligne Directrice OCDE 305C	CITI, 1992
<i>Utterbackia imbecilis</i>	346	Moules (poids humide)	Weinstein et Polk, 2001

a) Rapport des cinétiques d'absorption et d'élimination. Pour *Lepomis macrochirus*, l'exposition est de 0,7 µg/L avec une durée d'absorption de 4 h et une durée d'élimination de 60 h. Quant à *Oncorhynchus mykiss*, l'exposition est de 50 µg/L avec une durée d'absorption de 72 h et une durée d'élimination de 144 h.

L'anthracène est donc bioaccumulable.

2.4.2 Organismes terrestres y compris les végétaux

Aucun résultat d'essai valide permettant de dériver des facteurs de bioconcentration dans les végétaux n'a pu être trouvé dans la littérature.

3. DONNÉES TOXICOLOGIQUES

L'ensemble des informations et des données toxicologiques provient de diverses monographies publiées par des organismes reconnus pour la qualité scientifique de leurs documents (IARC, 1983 ; ATSDR, 1995 ; OMS IPCS, 1998). Les références bibliographiques aux

ANTHRACÈNE

auteurs sont citées pour permettre un accès direct à l'information scientifique mais n'ont généralement pas fait l'objet d'un nouvel examen critique par les rédacteurs de la fiche.

En l'absence de certaines données spécifiques sur la toxicité de l'anthracène, ou à défaut de données générales sur les hydrocarbures aromatiques polycycliques, il peut être utile de se reporter à la fiche sur le benzo[a]pyrène, ce dernier étant l'hydrocarbure aromatique polycyclique le plus étudié.

Nous invitons également le lecteur à lire le rapport INERIS 'Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques (HAPs) : Evaluation de la relation dose-réponse pour des effets cancérigènes : Approche substance par substance (facteurs d'équivalence toxique - FET) et approche par mélange ; évaluation de la relation dose-réponse pour des effets non cancérigènes : Valeurs Toxicologiques de Référence (VTR)' (Doornaert et Pichard, 2003). Ce rapport est disponible sur le site Internet de l'INERIS (<http://www.ineris.fr>) et sur le portail substances chimiques (<http://chimie.ineris.fr>).

3.1 Devenir dans l'organisme

Études chez l'homme

Chez l'homme, les principales voies de pénétration des hydrocarbures aromatiques polycycliques sont l'inhalation, la voie orale et la voie dermique. Une application cutanée de goudron de houille chez le volontaire sain pendant 8 heures, 2 jours consécutifs, montre que l'anthracène passe la barrière cutanée (ATSDR, 1995 ; Storer *et al.*, 1984).

Il n'existe pas de données chez l'homme relatives à la distribution des hydrocarbures aromatiques polycycliques dans l'organisme. Cependant, l'analyse toxicologique à partir de foie et de graisses prélevés au cours d'autopsie montre la présence d'anthracène (110 à 240 ppt et 25 à 575 ppt) (Obana *et al.*, 1981).

Le caractère lipophile des hydrocarbures aromatiques polycycliques leur confère une grande facilité à franchir les membranes cellulaires et leur permet d'être stockés dans les différents tissus. Les hydrocarbures aromatiques polycycliques sont métabolisés en composés plus hydro-solubles ce qui facilite leur élimination. La plupart des hydrocarbures aromatiques polycycliques sont excrétés dans les fèces et les urines.

Études chez l'animal

Des rats ingérant de la nourriture contenant 0,2 à 1,0 % d'anthracène ou 200 mg par gavage éliminent 43 à 84 % de la dose dans les fécès en 2 à 3 jours (Chang, 1943). Le taux d'absorption intestinale est influencé par la présence de bile : en cas de dérivation de la bile par canulation de la vésicule biliaire, l'absorption n'est plus que de 70,8 % (Rahman *et al.*, 1986).

ANTHRACÈNE

Par voie cutanée, seuls 1,3 % de la dose d'anthracène marqué au carbone 14 ($9,3 \mu\text{g}/\text{cm}^2$) sont détectés dans les tissus, essentiellement le foie et les reins, chez le rat, 6 jours après l'administration (Yang *et al.*, 1986).

Suite à une instillation intra-trachéale unique d'anthracène marqué au carbone 14, 99,7 % de la radioactivité est éliminée des poumons très rapidement (demi vie de 0,1 heure) et 0,3 % lentement (demi-vie de 25,6 heures) (Bond *et al.*, 1985).

L'injection sous-cutanée d'anthracène chez la souris gestante montre un passage transplacentaire (US EPA, 1990).

Le 1,2-dihydrodiol a été identifié comme étant le principal métabolite de l'anthracène lors d'une incubation de préparation de foie de rat en présence d'anthracène (Akhtar *et al.*, 1979). *In vivo*, le 1,2-dihydrodiol, le 9,10-anthraquinone, 9,10-dihydrodiol et le 2,9,10-trihydroxyanthracène ont été identifiés comme étant des métabolites de l'anthracène présents dans les urines de rats exposés (Sims, 1964).

Les données relatives au métabolisme et à l'excrétion spécifiques de l'anthracène correspondent à celles de Boyland et Lévi (1935, 1936a, b) et celles de Sims (1964).

3.2 Toxicologie aiguë

Études chez l'homme

Des effets photo-sensibilisants de l'anthracène sont rapportés lors de son utilisation dans le traitement du psoriasis (en solution dans un mélange de N-méthyl-2-pyrrolidone, d'éthanol et de propylène glycol) (Urbanek, 1980 ; Walter, 1980).

Études chez l'animal

Une dose unique de 1,47 ou 2,44 g/kg d'anthracène commercial ou de 17 g/kg d'anthracène pur n'est pas létale chez la souris (Nagorny, 1969).

Chez le rat, l'administration par voie orale d'une dose de 100 mg/kg/j pendant 4 jours induit une augmentation de 13 % de l'activité carboxylestérase de la muqueuse intestinale (Nousiainen *et al.*, 1984) et une faible augmentation de l'activité de l'aldéhyde déshydrogénase hépatique (Torronen *et al.*, 1981).

Il n'est pas observé de stimulation de la régénération hépatique chez des rats hépatectomisés partiels nourris avec 514 mg/kg/j d'anthracène pendant 10 jours (Gershbein, 1975).

Une administration par voie orale de 50 mg d'anthracène dans l'huile de maïs suivie d'une exposition aux ultra violets de 1 heure entraîne une kératite de la peau exposée (Dayhaw-Barker *et al.*, 1985).

L'anthracène est un irritant de la peau, des yeux, des muqueuses et du tractus respiratoire. L'exposition à la concentration de $4,7 \text{ mg}/\text{m}^3$ induit une irritation cutanée moyenne chez 50 % des souris (Montizaan *et al.*, 1989). La valeur moyenne d'activité d'irritation cutanée chez la

ANTHRACÈNE

souris (ID₅₀) est de $6,6 \cdot 10^{-4}$ mmol soit 118 µg/oreille (Brune *et al.*, 1978). L'anthracène est un photosensibilisant (Gerarde, 1960 ; Lovell et Sanders, 1992 ; Forbes *et al.*, 1976 ; Burnham et Rahman, 1992) ; toutefois ce n'est pas un agent sensibilisant (Old *et al.*, 1963).

3.3 Toxicologie chronique

3.3.1 Effets systémiques

Études chez l'homme

A notre connaissance, il n'existe pas de donnée disponible.

Études chez l'animal

Chez les souris mâles et femelles exposées par gavage à l'anthracène aux doses de 0, 250, 500 et 1 000 mg/kg/j pendant au moins 90 jours les paramètres analysés sont la mortalité, les signes cliniques, le poids corporel, la consommation de nourriture, les effets ophtalmiques et hématologiques, les poids de différents organes, et l'histo-pathologie (US EPA, 1989). Dans cette étude, aucun effet n'est observé, même pour la dose la plus élevée. Un NOEL de 1 000 mg/kg/j est défini.

Dans une autre étude pratiquée chez le rat, l'exposition à l'anthracène a été réalisée par ajout dans la nourriture à la dose quotidienne de 5 à 15 mg par animal pendant environ 450 jours pour une dose cumulée de 4,5 g. L'observation est réalisée jusqu'à la mort de l'animal ; le temps moyen de survie est de 700 jours. Certains animaux survivent au delà de 450 jours après la fin de l'exposition. Aucun effet lié à l'exposition n'a été observé, cependant aucune analyse des paramètres hématologiques n'a été effectuée (Schmähl, 1955).

Enfin, une injection sous cutanée hebdomadaire de 0,25 mg d'anthracène pratiquée chez la souris pendant 40 semaines induit un dépôt de fer dans les ganglions lymphatiques et une diminution du nombre de cellules lymphoïdes (Hoch-Ligeti, 1941).

L'injection intra-péritonéale d'anthracène (500 mg/kg/j) n'entraîne pas la mort des animaux. L'injection de 160 mol/kg d'anthracène pendant 14 jours n'entraîne pas de modifications immunitaires chez la souris B6C3T1 (White *et al.*, 1985).

Effets systémiques

Substance Chimique	Voies d'exposition	Taux d'absorption		Organe cible	
		Homme	Animal	Principal	Secondaire
Anthracène	Inhalation	Non déterminé	53 à 74 %	Pas d'organe cible	
	Ingestion	Non déterminé	53 à 74 %	Pas d'organe cible	
	Cutanée	Non déterminé	53 à 74 %	Pas d'organe cible	

ANTHRACÈNE

3.3.2 Effets cancérigènes

- - Classification

L'Union Européenne

Non déterminé : l'antracène n'a pas fait l'objet d'un examen par l'Union Européenne.

CIRC - IARC

Groupe 3 : l'agent (ou le mélange) ne peut être classé pour sa cancérogénicité pour l'homme (1983).

US EPA (IRIS)

Classe D : substance non classifiable quant à sa cancérogénicité pour l'homme (1991).

- - Études principales

Études chez l'homme

3 cas d'épithéliomes de la main, de la joue et du poignet sont observés chez des salariés manipulant de l'antracène non raffiné. Il est à noter que deux des salariés étaient employés depuis 30 ans ou plus et que par ailleurs des salariés manipulant de l'antracène purifié n'ont pas développé de tumeurs (Kennaway, 1924a, b).

Études chez l'animal

Les effets cancérigènes de l'antracène ont été évalués au cours de différentes études effectuées chez la souris en **application cutanée** et dans des modèles d'initiation-promotion cutanés. Ces différentes études révèlent l'absence d'effet cancérigène ou d'effet d'initiation.

Aucune tumeur cutanée n'est rapportée chez 100 souris exposées par application cutanée d'une suspension d'antracène à 40 % dans la lanoline. Dans cette étude, 55 souris meurent après 6 mois de traitement (Kennaway, 1924a, b). Une autre étude de même type montre l'absence de tumeur (Mainsin *et al.*, 1926, 1927). Des résultats similaires sont rapportés dans une étude où l'antracène est appliqué en solution dans le benzène ou de l'huile de sésame (Pollia, 1939). Dans une autre étude, pratiquée chez la souris par applications cutanées d'antracène en solution à 10 % dans l'acétone 3 fois par semaine pendant toute la vie de la souris, aucune tumeur n'est observée (Wynder et Hoffman, 1959). La mort des souris survient entre 10 et 20 semaines après le début du traitement. Dans cette même étude, des solutions de 0,01, 0,005 ou 0,001 % de benzo[a]pyrène induisent des papillomes et des carcinomes cutanés avec une incidence de 95 % et 95 % respectivement pour le groupe exposé à la dose la plus élevée et de 43 % et 3 % respectivement pour le groupe exposé à la dose la plus faible.

Des effets similaires sont rapportés lors de l'exposition cutanée à l'antracène de 20 souris mâles C3H/HeJ, préalablement rasées (Warshawsky *et al.*, 1993). Cette exposition a été

ANTHRACÈNE

pratiquée pendant 6 mois, à la dose hebdomadaire de 0,05 mg d'anthracène dans du toluène. Aucune tumeur n'est observée chez les 14 animaux exposés uniquement à l'anthracène, en revanche une co-exposition avec du benzo[a]pyrène (0,05 mg) induit la formation d'un papillome chez un des 13 animaux exposés après une période de latence de 85 semaines.

Dans des études d'initiation-promotion cutanées chez la souris, 20 applications de 0,3 mL à 0,5 % d'anthracène dans l'acétone, suivies par 18 autres applications contenant différentes concentrations d'huile de croton sont réalisées. Des papillomes sont observés en nombre identique à la fois chez les lots témoins et exposés (Salaman et Roe, 1956). Dans un autre modèle d'initiation-promotion, les souris reçoivent une seule exposition à l'anthracène en solution dans du benzène suivie, une semaine après, par une exposition au 12-O-tétradécanoylphorbol-13-acétate (TPA) deux fois par semaine pendant 34 semaines. Dans cette étude, une légère augmentation des papillomes cutanés est rapportée (Scribner, 1973). Dans une autre étude d'initiation-promotion utilisant le TPA, il a été montré que l'anthracène n'était pas un initiateur tumoral (LaVoie *et al.*, 1983 et 1985).

Chez le rat, des études par voie orale ou par implantation intra-pulmonaire ont été réalisées. Les résultats de ces études montrent l'absence d'effet cancérigène de l'anthracène.

Les 28 rats sont exposés **par voie orale** à des doses d'anthracène initialement de 5 mg puis de 15 mg en solution dans l'huile, 6 jours par semaine pendant 78 semaines, pour une dose totale de 4,5 g par rat. Seuls deux animaux développent des tumeurs malignes : un sarcome du foie après 18 mois et un adénome de l'utérus après 25 mois. Dans cette étude, il n'y a pas de groupe témoin (Schmähl, 1955).

Dans une autre étude, pratiquée chez le rat au moyen d'une seule **instillation intra-pulmonaire** d'un mélange de 0,05 mL de cire d'abeilles et de glycéryl de tricaprilate (tricapriline) (1 :1) contenant 0,5 mg d'anthracène aucune tumeur pulmonaire n'est rapportée 1 an après l'injection, alors que l'administration de 3-méthylcholanthrène dans les mêmes conditions induit de nombreux carcinomes épidermoïdes (Stanton *et al.*, 1972).

Une **co-exposition cutanée** à l'anthracène et au rayonnements ultra-violet induit des résultats contradictoires chez la souris. Chez la souris, une solution à 5 % d'anthracène dans un mélange d'huile d'olive et de vaseline, appliquée sur les oreilles 3 fois par semaine pendant toute la vie induit après onze mois de traitement la mort de 43 souris sur 44 traitées (Miescher, 1942). Dans un autre lot (44 souris) exposé à l'anthracène dans les mêmes conditions puis 2 heures après aux ultra-violets pendant 40 à 60 minutes, aucune tumeur cutanée n'est rapportée. Dans ce groupe, seules 5 souris sont encore en vie 7 mois après le début du traitement. La dernière souris meurt à 9 mois. Des résultats similaires sont observés pour un même schéma expérimental au cours duquel l'exposition aux ultra-violets est de 90 minutes. Dans ce lot, la mortalité est encore plus élevée que dans les autres lots.

Une autre étude a été également réalisée chez la souris pour une exposition à une solution d'anthracène à 10 % dans un mélange de vaseline et d'huile d'olive suivie d'une exposition aux ultra-violets et/ou à la lumière visible. Une augmentation des tumeurs cutanées est

ANTHRACÈNE

observée dès 5 à 8 semaines après le début du traitement. Les tumeurs sont de type carcinome et certaines sont métastasées. Aucune tumeur n'est observée chez les différents lots témoins (Heller, 1950).

Un autre auteur a évalué l'activité photo-carcinogène de l'anthracène chez la souris. Les animaux sont exposés par application cutanée de 40 µL de méthanol contenant 4 µg d'anthracène une fois par jour, 5 jours par semaine, pendant 38 semaines et suivie par une exposition de deux heures aux ultraviolets (300 J/m²) (Forbes *et al.*, 1976). Dans cette étude un lot témoin positif (4 µg de 8-méthoxypsoralène) et négatif sont inclus. Le délai de survenue des tumeurs n'est pas statistiquement différent entre le lot témoin négatif et le lot exposé à l'anthracène, alors qu'il l'est pour le témoin positif. Les tumeurs observées sont de type carcinome épidermoïde.

Caractère génotoxique : l'anthracène n'a pas fait l'objet d'un examen par l'Union Européenne.

3.3.3 Effets sur la reproduction et le développement

Études chez l'homme

A notre connaissance, il n'existe pas de donnée disponible.

Études chez l'animal

Les différences de concentrations mesurées chez le fœtus dépendent de l'absorption gastro-intestinale de chacun des hydrocarbures aromatiques polycycliques ; elles ne reflètent pas les différences de passage placentaire.

L'analyse des effets de l'anthracène sur des cultures cellulaires primaires obtenues à partir de cellules embryonnaires de reins de souris montre que l'injection sous cutanée de 8 mg d'anthracène en solution dans de l'huile de tournesol au cours de la dernière semaine de la gestation induit plus de changements morphologiques qu'une administration intra-stomacale de la même dose alors que la survie cellulaire est écourtée (Shabad *et al.*, 1972).

3.4 Valeurs toxicologiques de référence

Une Valeur Toxicologique de Référence (VTR) est un indice qui est établi à partir de la relation entre une dose externe d'exposition à une substance dangereuse et la survenue d'un effet néfaste. Les valeurs toxicologiques de référence proviennent de différents organismes dont la notoriété internationale est variable.

L'INERIS présente en première approche les VTR publiées par l'ATSDR, l'US EPA et l'OMS. En seconde approche, les VTR publiées par d'autres organismes, notamment Santé Canada, le RIVM et l'OEHHA, peuvent être retenues pour la discussion si des valeurs existent.

ANTHRACÈNE

3.4.1 Valeurs toxicologiques de référence de l'ATSDR, l'US EPA et l'OMS

Valeurs toxicologiques de référence pour des effets avec seuil

Substances chimiques	Source	Voie d'exposition	Facteur d'incertitude	Valeur de référence	Année de révision
Anthracène	ATSDR	Orale (intermédiaire)	100	MRL = 10 mg/kg/j	1995
Anthracène	US EPA	Orale	3000	RfD = 0,3 mg/kg/j	1993

Valeurs toxicologiques de référence pour des effets sans seuil

Non disponibles.

Justification scientifique des valeurs toxicologiques de référence

L'ATSDR a établi un MRL de 10 mg/kg/j pour une exposition sub-chronique par voie orale (1995).

Cette valeur est établie à partir de la même étude expérimentale chez la souris que celle décrite précédemment (US EPA, 1989). Un NOAEL de 1 000 mg/kg/j est établi ; en l'absence d'atteinte hépatique.

Facteurs d'incertitude : un facteur de 100 est appliqué ce qui correspond à un facteur de 10 pour prendre en compte la variabilité inter-espèces et à un facteur de 10 pour prendre en compte la variabilité intra-espèces.

L'US EPA (IRIS) propose une RfD de 0,3 mg/kg/j (1993)

Cette valeur est établie à partir de l'étude expérimentale pratiquée chez la souris (US EPA, 1989). Les animaux mâles et femelles sont exposés à l'anthracène par gavage aux doses de 0, 250, 500 et 1 000 mg/kg/j pendant au moins 90 jours. Les effets observés sont la mortalité, les signes cliniques, le poids corporel, la consommation de nourriture, les effets ophtalmologiques et hématologiques, les poids des différents organes, et l'histopathologie. Dans cette étude, aucun effet n'est observé, même pour la dose la plus élevée. Un NOEL de 1 000 mg/kg/j est défini.

Facteurs d'incertitude : un facteur de 3 000 est appliqué ce qui correspond à un facteur de 10 pour prendre en compte la variabilité inter-espèces, à un facteur de 10 pour prendre en compte la variabilité intra-espèces et un facteur de 30 pour prendre en compte à la fois

ANTHRACÈNE

l'extrapolation d'une exposition sub-chronique à chronique et l'absence de données sur le développement et la reproduction sur une deuxième espèce.

3.4.2 Valeurs toxicologiques de référence de Santé Canada, du RIVM et de l'OEHTA

Valeurs toxicologiques de référence pour des effets avec seuil

Substances chimiques	Source	Voie d'exposition	Facteur d'incertitude	Valeur de référence	Année de révision
Anthracène	RIVM	Orale	-	TDI = $4 \cdot 10^{-2}$ mg/kg/j	2001

Valeurs toxicologiques de référence pour des effets sans seuil

Non disponibles.

Justification scientifique des valeurs toxicologiques de référence

Le RIVM propose un TDI de $4 \cdot 10^{-2}$ mg/kg/j pour une exposition chronique par voie orale (Baars *et al.*, 2001).

Cette valeur a été élaborée pour les hydrocarbures aromatiques comportant de 10 à 16 carbones et qui ne sont pas considérés comme cancérigènes (Baars *et al.*, 2001).

La méthodologie ayant conduit à cette valeur de risque (et aussi à celles correspondant à d'autres fractions du pétrole) est issue des travaux réalisés en 1997 par le TPHCWG (Total Petroleum Hydrocarbons Criteria Working Group). Elle est explicitée dans le document du RIVM.

4. DONNÉES ÉCOTOXICOLOGIQUES

L'objectif de ce document est d'estimer les effets à long terme sur la faune et la flore, les résultats nécessaires à cette évaluation sont présentés. Lorsqu'un nombre suffisant de résultats d'écotoxicité chronique est disponible, les résultats d'écotoxicité aiguë ne sont pas fournis. Lorsque l'écotoxicité chronique n'est pas suffisamment connue, les résultats d'écotoxicité aiguë sont présentés et peuvent servir de base pour l'extrapolation des effets à long terme.

ANTHRACÈNE

4.1 Paramètres d'écotoxicité aiguë

4.1.1 Organismes aquatiques

	Espèce	Critère d'effet	Valeur (µg/L)	Référence
Algues	<i>Selenastrum capricornutum</i>	CE ₅₀	16,1	Gala et Giesy, 1994
	<i>Selenastrum capricornutum</i>	CE ₅₀ (22 h)	37,4	Gala et Giesy, 1992
Invertébrés	<i>Daphnia magna</i>	CE ₅₀ (48h)	> 25	Vindimian, 2000
	<i>Daphnia magna</i>	CL ₅₀ (48 h)	95	Munoz et Tarazona, 1993
	<i>Utterbackia imbecilis</i>	CL ₅₀ (24 h)	1,93	Weinstein et Polk, 2001
	<i>Nereis arenaceodentata</i>	CE ₅₀ (96 h)	51	Emery et Dillon, 1996
Poissons	<i>Lepomis macrochirus</i>	CE ₅₀ (96 h)	8	McCloskey et Oris, 1991

L'anthracène est une substance qui présente une toxicité plus importante en présence de radiations ultraviolettes (UV). Weinstein et Polk (2001) ont testé l'anthracène sur *Utterbackia imbecilis* en présence d'ultraviolet (UV-A = 70 µW/cm²) ou en absence d'ultraviolet (i.e. en lumière ambiante de laboratoire). Les CL₅₀ (24 h) obtenues à partir de ces tests étaient respectivement 1,93 µg/L et > 16,6 µg/L.

Pour simple comparaison, il a été relevé une intensité de 4 038 µW/cm² dans des conditions climatiques ensoleillées au Texas le 14 juillet 1999 à midi heure solaire (Weinstein et Polk, 2001). Par conséquent, le test réalisé en présence d'UV peut être validé puisque l'intensité des UV appliqués est réaliste.

4.1.2 Organismes terrestres

	Espèce	Critère d'effet	Valeur (mg/kg poids sec)	Référence
Végétaux	<i>Avena sativa</i>	CE ₅₀	30	Mitchell <i>et al.</i> , 1988
	<i>Cucumis sativus</i>	CE ₅₀	720	Mitchell <i>et al.</i> , 1988

4.2 Paramètres d'écotoxicité chronique

4.2.1 Organismes aquatiques

	Espèce	Critère d'effet	Valeur (µg/L)	Référence
Algues	<i>Pseudokirchneriella subcapitata</i>	CE ₁₀ (72 h)	7,8	Vindimian, 2000
	<i>Selenastrum capricornutum</i>	NOEC (22 h)	3	Gala et Geisy, 1992
Crustacés	<i>Ceriodaphnia dubia</i>	CE ₁₀ (7 j)	> 3,4	Vindimian, 2000
	<i>Daphnia magna</i>	NOEC (21 j)	2,1	Foran <i>et al.</i> , 1991

ANTHRACÈNE

	<i>Daphnia magna</i>	NOEC (21 j)	0,63	Holst et Giesy, 1989
Poissons	<i>Pimephales promelas</i>	NOEC (42 j)	6	Hall et Oris, 1991

4.2.2 Organismes terrestres

Aucune donnée long terme sur organismes terrestres n'est disponible.

5. VALEURS SANITAIRES ET ENVIRONNEMENTALES

5.1 Étiquetage - Milieu de travail

France : Arrêté du 20 avril 1994 relatif à la déclaration, la classification, l'emballage et l'étiquetage des substances chimiques complété jusqu'à la directive européenne 2004/73/CE de la Commission du 29 avril 2004 portant la 29^e adaptation au progrès technique de la directive 67/548/CEE.

Non concerné.

5.2 Nomenclature Installations classées (IC)

France : Décret n° 53-578 du 20 mai 1953 modifié relatif à la nomenclature des installations classées pour la protection de l'environnement mise à jour par le Ministère de l'écologie et du développement durable « Nomenclature des installations classées pour la protection de l'environnement » (2002).

La liste des rubriques mentionnées est indicative et ne se veut pas exhaustive.

Rubriques : Non concerné.

5.3 Valeurs utilisées en milieu de travail - France

Notes documentaires INRS ND 2098 (2004) "Valeurs limites d'exposition professionnelle aux agents chimiques en France" et ND 2190-191-03 "Indices biologiques d'exposition".

- Air : Non concerné.
- Indices biologiques d'exposition : Non concerné.

5.4 Valeurs utilisées pour la population générale

5.4.1 Qualité des eaux de consommation

France : Décret n° 2001 - 1220 du 20 décembre 2001 relatif aux eaux destinées à la consommation humaine à l'exclusion des eaux minérales naturelles.

Non concerné.

ANTHRACÈNE

UE : Directive 98/83/CE du Conseil du 3 novembre 1998 relative à la qualité des eaux destinées à la consommation humaine (CE, 1998).

Pour l'ensemble des hydrocarbures aromatiques polycycliques 0,1 µg/L.

OMS : Directives de qualité pour l'eau de boisson (2004)

Non concerné.

5.4.2 Qualité de l'air

OMS : Directives de qualité pour l'air (2000).

L'OMS a établi un Excès de Risque Unitaire par inhalation (ERU_i) pour un mélange de HAPs. Cet ERU_i correspond à la probabilité de développer un cancer du poumon après une exposition vie entière à un mélange de HAPs. Les effets induits sont attribués au seul benzo[a]pyrène retenu alors comme indicateur. L'ERU_i établi par l'OMS est de $8,7 \cdot 10^{-2}$ par µg de benzo[a]pyrène par m³.

5.4.3 Valeurs moyennes dans les milieux biologiques

Milieux Biologiques	Valeurs de référence
Sang	Non disponible
Urine	Non disponible
Cheveux	Non disponible
Placenta	Non disponible

5.5 Concentrations sans effet prévisible pour l'environnement (PNEC). Propositions de l'INERIS

5.5.1 Compartiment aquatique

Des essais long-terme sont disponibles avec trois espèces de trois niveaux trophiques. Un facteur d'extrapolation de 10 peut être appliqué au résultat le plus faible de l'essai long-terme sur daphnies pour dériver la PNEC.

D'ou:

$$PNEC_{EAU} = 0,063 \mu\text{g/L}$$

5.5.2 Compartiment sédimentaire

Il n'existe pas d'essais d'écotoxicité sur organismes benthiques. Pour déterminer la PNEC_{SED}, on peut utiliser la méthode des coefficients de partage :

ANTHRACÈNE

$$PNEC_{SED} = (K_{SED-EAU}/RHO_{SED}) \times PNEC_{EAU} \times 1\,000$$

RHO_{SED} : densité des sédiments (humides) (valeur par défaut : 1 300 kg/m³)

$K_{SED-EAU}$: coefficient de partage entre les sédiments et l'eau (643,3 m³.m⁻³)

$$PNEC_{SED} = 31,2 \text{ } \mu\text{g/kg sédiment humide} = 81,1 \text{ } \mu\text{g/kg sédiment sec}$$

5.5.3 Compartiment terrestre

Pour déterminer la $PNEC_{SOL}$, seuls des tests aigus sur végétaux sont disponibles, c'est pourquoi un facteur d'incertitude 1 000 doit être utilisé sur la plus basse valeur :

$$PNEC_{SOL} = 30 \text{ } \mu\text{g/kg sol sec} = 26,5 \text{ } \mu\text{g/kg sol humide}$$

Puisque il n'existe pas de nombreux résultats d'essais d'écotoxicité sur organismes terrestres, on peut également calculer la $PNEC_{SOL}$ à partir de la méthode des coefficients de partage :

$$PNEC_{SOL} = K_{SOL-EAU}/RHO_{SOL} \times PNEC_{EAU} \times 1\,000$$

RHO_{SOL} : densité du sol (humide) (valeur par défaut : 1 700 kg/m³)

$K_{SOL-EAU}$: coefficient de partage sol eau (771,2 m³.m⁻³)

$$PNEC_{SOL} = 28,6 \text{ } \mu\text{g/kg sol humide} = 32,3 \text{ } \mu\text{g/kg sol sec}$$

Ces deux résultats sont comparables. Nous préférons ceux issus des résultats d'essais sur organismes terrestres.

6. MÉTHODES DE DÉTECTION ET DE QUANTIFICATION DANS L'ENVIRONNEMENT

6.1 Familles de substances

Hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP).

6.2 Principes généraux

6.2.1 Eau

Prélèvement

Les échantillons d'eau sont prélevés dans des flacons en verre brun munis de bouchons en téflon. Le volume prélevé doit être de 0,5 ou 1 L. Pour les eaux du robinet, il convient de laisser couler l'eau quelques minutes avant de remplir le flacon. Pour les eaux de surface, le flacon doit être immergé dans la masse d'eau et rempli en évitant de prélever la couche

ANTHRACÈNE

d'eau superficielle. Pour les échantillons d'eau chlorés, du thiosulfate doit être ajouté au moment du prélèvement. Les échantillons sont ensuite transportés et/ou stockés à environ + 4 °C et à l'abri de la lumière. L'extraction doit être effectuée dans les 24 heures suivant le prélèvement. Si tel n'est pas le cas, il est conseillé d'ajouter le solvant d'extraction directement dans la bouteille de prélèvement et d'agiter les deux phases. Ce pré-traitement permet d'allonger la durée de stockage avant extraction à 72 heures.

Extraction

Les HAP contenus dans 100 à 1 000 mL d'eau sont extraits en deux étapes successives par extraction liquide/liquide avec un solvant organique apolaire à peu polaire, tels que l'hexane, le cyclohexane ou le dichlorométhane. Pour des eaux usées (eaux de station d'épuration, eaux de rejet industriel) ou fortement concentrées en HAP, il est conseillé d'effectuer l'extraction sur l'échantillon d'eau dilué avec de l'eau distillée. L'extrait est ensuite séché sur sulfate de sodium anhydre et reconcentré à l'évaporateur rotatif, puis sous flux d'azote. Si nécessaire, pour des eaux de surface ou autres échantillons d'eaux contaminées, l'extrait est purifié sur micro-colonne phase alumine/sulfate de sodium ou gel de silice. Puis, en fonction de la technique choisie pour l'analyse et le dosage des solutés, après reconcentration des extraits, les HAP sont re-dissous dans un solvant approprié.

Remarque : les HAP étant des composés facilement adsorbés sur les matières en suspension (MES), lors de l'analyse d'eaux usées chargées en MES, la totalité de l'échantillon (i.e. eau non filtrée) doit être analysée. Dans le cas d'eaux de surface, une différenciation entre les concentrations en HAP dissous et non dissous peut s'avérer souhaitable. Ainsi pour une charge importante en matières en suspension (à titre indicatif, MES supérieures à 200 mg/L), il est recommandé de filtrer l'eau et d'extraire séparément la fraction dissoute et la fraction particulaire.

Dosage

L'analyse et le dosage des HAP sont effectués :

- Soit par chromatographie en phase liquide (sur phase inverse, colonne greffée C₁₈, phase mobile méthanol ou acétonitrile/eau en isocratique ou en gradient) couplée une détection par spectrophotométrie ultra-violet ou/et par fluorimétrie (CLHP/UV et/ou fluorimétrie), avec un dosage par étalonnage externe,
- Soit par chromatographie en phase gazeuse (colonne capillaire, phase stationnaire faiblement polaire) couplée à un détecteur à ionisation de flamme (CPG/FID), avec un dosage par étalonnage externe ou interne,
- Soit par chromatographie sur couche mince haute performance couplée à une détection par fluorimétrie (CCMHP/fluorimétrie).

ANTHRACÈNE

6.2.2 Air

Prélèvement

Air ambiant : Un échantillon d'air est directement prélevé à l'aide d'une pompe en propulsant l'air à un débit maximal de 225 L/min à travers un filtre à particules fines (diamètre 102 mm) puis à travers un piège à sorption constitué par de la mousse polyuréthane (PUF) ou de la résine polymère en polystyrène/divinylbenzène (XAD-2). Le volume d'air prélevé ne doit pas dépasser 350 m³.

Air des lieux de travail : L'atmosphère à étudier est aspirée au moyen d'une pompe à travers un dispositif de collecte constitué par un porte filtre et un filtre (de diamètre 25 ou 37 mm). Le prélèvement est effectué sur une durée de 4 heures ou plus à un débit généralement de 1 à 1,09 L/min.

Émission de sources fixes : Un échantillon d'air est prélevé de manière iso-cinétique (avec ou sans division de débit) ; la fraction particulaire est collectée sur un filtre (choisi en fonction de la température et de la nature physico-chimique des gaz échantillonnés), la fraction gazeuse est piégée dans un piège à vapeur par condensation et adsorption sur support solide constitué de résine polymère de polystyrène/divinylbenzène (XAD-2) ou tout autre support de performance équivalente.

Extraction

Les filtres et les cartouches d'adsorbant sont extraits par un solvant organique, généralement le dichlorométhane, dans un extracteur de type Soxhlet ou bien dans des cuves à ultrasons. L'extrait est ensuite concentré soit par Kuderna-Danish, soit à l'évaporateur rotatif, puis sous flux d'azote. Avant l'analyse, l'extrait est éventuellement purifié sur micro-colonne de silice ou bien par lavage à l'eau suivi d'une ré-extraction des analytes par un solvant.

Dosage

L'analyse et le dosage des HAP sont effectués :

- Soit par chromatographie en phase liquide (sur phase inverse, colonne greffée C₁₈, phase mobile méthanol ou acétonitrile/eau en isocratique ou en gradient) couplée une détection par spectrophotométrie ultra-violet ou/et par fluorimétrie (CLHP/UV et/ou fluorimétrie), avec un dosage par étalonnage externe,
- Soit par chromatographie en phase gazeuse (colonne capillaire, phase stationnaire faiblement polaire) couplée à un détecteur à ionisation de flamme (CPG/FID) ou à un spectromètre de masse (CPG/SM), avec un dosage par étalonnage externe ou interne (utilisation de HAP deutériés ou d'hydrocarbures paraffiniques ou polyaromatiques comme étalons internes).

ANTHRACÈNE

6.2.3 Sols

Prélèvement

Les échantillons de sols doivent être prélevés dans des bocaux hermétiques en verre, puis transportés et conservés à l'obscurité et au froid (4 ± 2 °C).

Extraction

Selon la technique d'analyse utilisée par la suite et selon le degré de pollution de l'échantillon étudié, les HAP contenus dans un sol sont extraits :

- Par un solvant d'extraction polaire (solution à base de méthanol ou acétone puis éther de pétrole) sous l'effet d'une agitation mécanique. Après filtration ou décantation, l'extrait est analysé. Ce type d'extraction convient pour des dosages immunoenzymatiques ou pour des sols faiblement pollués analysés ensuite par chromatographie en phase liquide. Dans ce dernier cas, préalablement à l'analyse, l'extrait est purifié (lavage à l'eau, séchage et reconcentration de la phase organique avant une éventuelle purification complémentaire sur micro-colonne).
- Par un solvant d'extraction faiblement polaire (toluène) dans un extracteur de type soxhlet pendant 4 à 8 heures, pour des sols fortement pollués analysés par la suite en chromatographie en phase liquide.
- Par extraction thermique directe opérée par chauffage de l'échantillon à 340°C pendant 3 min dans une chambre d'extraction thermique, les composés étant ensuite piégés par cryogénie en tête de colonne analytique puis analysés par chromatographie en phase gazeuse.

Dosage

L'analyse et le dosage des HAP sont effectués :

- Soit par chromatographie en phase liquide (sur phase inverse, colonne greffée C₁₈, phase mobile méthanol ou acétonitrile/eau en isocratique ou en gradient) couplée une détection par spectrophotométrie ultra-violet ou/et par fluorimétrie (CLHP/UV et/ou fluorimétrie), avec un dosage par étalonnage externe,
- Soit par chromatographie en phase gazeuse (colonne capillaire, phase stationnaire faiblement polaire) couplée à un spectromètre de masse (CPG/SM), avec un dosage par étalonnage interne,
- Soit par dosage immunoenzymatique.

ANTHRACÈNE

6.3 Principales méthodes

6.3.1 Présentation des méthodes

A / ISO/DIS 12884 (avril 2000) : Dosage des hydrocarbures aromatiques polycycliques en phase gazeuse et particulaire dans l'air ambiant - Prélèvement sur filtres à sorption et analyse par chromatographie gazeuse / spectrométrie de masse.

Domaine d'application

La présente norme internationale spécifie les procédures de prélèvement, d'extraction et d'analyse permettant de déterminer la concentration, dans l'air ambiant, de 22 HAP, dont l'anthracène. Elle décrit le prélèvement des phases gazeuse et particulaire de manière séparée puis leur analyse simultanée. Elle s'applique à l'étude de volumes importants d'échantillon (100 à 250 L/min) et permet d'atteindre des limites de détection de l'ordre de 0,5 ng/m³ pour un volume de prélèvement de 350 m³. Des tests de validation ont été conduits pour des périodes d'échantillonnage de 24 h (fidélité ± 25 %, incertitude globale ± 50 %).

Principe

Un échantillon d'air est directement prélevé à l'aide d'une pompe, la phase particulaire étant retenue sur des filtres et la phase gazeuse piégée sur des supports solides. Le filtre et la cartouche d'adsorbant sont extraits simultanément dans un extracteur de type Soxhlet. Après reconcentration, l'extrait est analysé par CPG/SM. Le dosage est effectué par étalonnage interne (étalons internes : 5 composés deutériés). La concentration combinée des HAP dans l'air répartis en phase gazeuse et en phase particulaire est ainsi mesurée.

Interférences

Les interférences susceptibles de perturber les performances de la méthode peuvent être liées aux réactifs, aux solvants ou à la verrerie et également à la matrice étudiée (co-extraction d'impuretés). Certains composés, tels que les HAP alkylés (notamment problème de coélution de l'acénaphène méthylique avec le fluorène) ou les HAP hétéroatomiques (quinoléine par exemple), peuvent plus particulièrement être gênants. L'exposition des échantillons à la chaleur, à l'ozone, au dioxyde d'azote ou aux rayonnements ultraviolets, à une étape quelconque du prélèvement, du stockage et de l'analyse, peut entraîner une dégradation des HAP recherchés. La fumée de tabac dans le laboratoire ou dans des parties contiguës peut être la cause d'une contamination des échantillons.

ANTHRACÈNE

B / US EPA Method TO-13A (janvier 1999) - Détermination of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in ambient air using gas chromatography/mass spectrometry (GC/MS).

Domaine d'application

Cette méthode spécifie les procédures de prélèvement, d'extraction et d'analyse permettant de déterminer la concentration, dans l'air ambiant, de 19 HAP, dont l'anthracène. Elle décrit le prélèvement des phases gazeuse et particulaire de manière séparée puis leur analyse simultanée. L'utilisation de techniques de prélèvement de grand volume (0,22 m³/min) est préconisée. Classiquement, le volume et la durée de prélèvement sont respectivement de 300 m³ et 24 heures.

Principe

Un échantillon d'air est directement prélevé à l'aide d'une pompe, la phase particulaire étant retenue sur un filtre et la phase gazeuse piégée sur un support solide (cartouche en mousse de polyuréthane). Le filtre et la cartouche d'adsorbant sont extraits simultanément dans un extracteur de type Soxhlet. Après reconcentration et purification sur micro-colonne de gel de silice, l'extrait est à nouveau reconcentré puis analysé par CPG/SM. Le dosage est effectué par étalonnage interne (utilisation de HAP deutériés comme étalons internes). La concentration combinée des HAP dans l'air répartis en phase gazeuse et en phase particulaire est ainsi mesurée.

Interférences

Les interférences susceptibles de perturber les performances de la méthode peuvent être liées aux réactifs, aux solvants ou à la verrerie et également à la matrice étudiée (co-extraction d'impuretés pouvant rendre nécessaire la purification supplémentaire de l'extrait). L'exposition des échantillons à la chaleur, à l'ozone, au dioxyde d'azote ou aux rayonnements ultraviolets, à une étape quelconque du prélèvement, du stockage et de l'analyse, peut entraîner une dégradation des HAP recherchés.

C / XP X 43-329 (avril 1995) : Émission des sources fixes - Prélèvement et mesure d'hydrocarbures aromatiques polycycliques et des goudrons à l'émission.

Domaine d'application

Cette méthode permet la détermination des HAP, dont l'anthracène, émis par les sources canalisées. Elle s'applique aux effluents gazeux plus ou moins chargés en poussières et en goudrons et peut être employée pour des niveaux de concentrations supérieurs à 0,1 µg/m³.

ANTHRACÈNE

Principe

L'échantillon d'air est prélevé de manière isocinétique (avec ou sans division de débit) ; la fraction particulaire est collectée sur un filtre et la fraction gazeuse est piégée sur un support solide. Le filtre et la cartouche d'adsorbant sont extraits simultanément dans un extracteur de type Soxhlet ou aux ultrasons. L'extrait est concentré, puis éventuellement purifié et repris dans un solvant adapté à la technique d'analyse choisie, qui peut être soit la CLHP/fluorimétrie, soit la CPG/FID.

Interférences

Non mentionnées.

D / NF ISO DIS 17993 (version de février 2000) : Qualité de l'eau - Détermination des 15 hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) dans l'eau par CLHP avec détection fluorescence.

Domaine d'application

Cette norme s'applique à l'analyse de 15 HAP, dont l'anthracène, dans les eaux potables et les eaux de surface. Elle peut être étendue à l'analyse d'autres HAP si des essais au laboratoire permettent de démontrer son applicabilité à ces composés supplémentaires. Les limites de détection mentionnées sont de 0,005 µg/L et de 0,01 µg/L, respectivement pour les eaux potables et pour les eaux de surface.

Principe

Les HAP sont extraits de l'eau par extraction liquide/liquide à l'hexane. Après séchage, reconcentration et éventuellement purification sur micro-colonne de silice, le solvant est échangé par du méthanol ou de l'acétonitrile et l'extrait est analysé par CLHP/fluorimétrie. Pour des eaux usées (STEP, eaux de rejet industriel) ou fortement concentrées en HAP, l'extraction est effectuée sur l'échantillon dilué au 1/2 avec de l'eau distillée.

Interférences

Les interférences peuvent être liées à l'échantillonnage et à l'extraction. Les récipients d'échantillonnage et de stockage doivent être constitués de matériaux inertes tels que verre ou acier. Il est recommandé de ne pas utiliser de matières plastiques ou toute autre matière organique à cause de leur capacité d'adsorption générant des pertes en HAP. De même pour les échantillonneurs automatiques, il convient d'éviter l'emploi de tubes en silicone ou en caoutchouc. L'évaporation à sec des extraits peut générer des pertes sévères en HAP à 2 ou 3 noyaux.

D'autres interférences peuvent résulter de l'analyse par CLHP. Ainsi tout composé donnant lieu à ou atténuant la fluorescence et ayant des propriétés chromatographiques similaires à celles des HAP recherchés peut interférer. En particulier, on signalera des interférences liées

ANTHRACÈNE

à la présence d'autres HAP : problème de séparation pour le naphthalène et le phénanthrène et pour le dibenzo[ah]anthracène et l'indéno[1, 2, 3-cd]pyrène, pics incomplètement résolus. De même, le pérylène est incomplètement résolu du benzo[b]fluoranthène, mais à une longueur d'onde adéquate le pic du pérylène peut être supprimé. Les résidus de solvants employés pour le prétraitement de l'échantillon (hexane, acétone, dichlorométhane) interfèrent sur la qualité de la séparation chromatographique (pic plus large, voire dédoublement de pics) surtout pour les HAP à 2 à 3 noyaux). La présence d'oxygène dissous dans la phase mobile ou éluant peut réduire l'intensité de fluorescence de certains HAP ; il faut donc maintenir la teneur en oxygène dissous la plus faible et la plus constante possible en dégazant l'éluant avec de l'hélium ou sous vide.

Enfin, au cours du prélèvement, de l'extraction et de l'analyse, les échantillons doivent être protégés de l'exposition à la lumière directe du soleil, qui peut entraîner la dégradation des HAP.

E / US EPA method 610 - Methods for organic chemical analysis of municipal and industrial wastewater : Polynuclear aromatic hydrocarbons.

Domaine d'application

Cette méthode s'applique à l'analyse de 16 HAP, dont l'anthracène, dans les eaux de rejet municipales ou industrielles. Pour l'anthracène, le rendement de la méthode est de l'ordre de 63 %, la limite de détection est de 660 ng/L.

Principe

Les HAP sont extraits de l'eau par extraction liquide/liquide au dichlorométhane, les extraits sont ensuite séchés puis reconcentrés. L'analyse est effectuée soit par CLHP/UV et fluorimétrie, soit par CPG/FID. En fonction des échantillons étudiés, une procédure de purification des extraits sur gel de silice est également décrite.

Interférences

Des interférences peuvent être liées aux réactifs, aux solvants ou à la verrerie. La matrice étudiée peut également être source d'interférence. De plus, même si les méthodes chromatographiques ont été optimisées pour la détection des HAP, des problèmes d'interférences ou de co-élution peuvent être rencontrés lors de l'analyse de certains échantillons.

ANTHRACÈNE

F / US EPA method 8100 (septembre 1986) - Polynuclear aromatic hydrocarbons

Domaine d'application

Cette méthode s'applique à l'analyse de 24 HAP, dont l'anthracène, à des concentrations de l'ordre du µg/L, dans les eaux et les sols.

Principe

La méthode décrit la séparation et l'analyse des HAP par CPG/FID. Cette analyse requiert la mise en œuvre préalable d'une étape d'extraction appropriée (US EPA méthode 3510 ou 3520 pour les eaux et méthode 3540 ou 3550 pour les sols). Avant dosage, il est recommandé de confirmer l'identité des composés détectés par CPG/SM.

Interférences

Des problèmes d'interférences peuvent être dus aux solvants, aux réactifs ou à la verrerie. Les réactifs et solvants doivent être de haute pureté. Il peut être nécessaire de distiller les solvants pour les purifier. Il convient de montrer par l'analyse de blanc de verrerie que tout le matériel utilisé est exempt d'interférence.

Des interférences peuvent également provenir de la matrice particulière analysée. Il est alors possible de recourir à une purification complémentaire soit classique soit spécifique en fonction du problème rencontré.

G / US EPA method 8310 (septembre 1986) - Polynuclear aromatic hydrocarbons.

Domaine d'application

Cette méthode s'applique à l'analyse, dans les eaux et les sols, de 16 HAP, dont l'anthracène, à des limites de concentrations variant de la dizaine de ng/L à la dizaine de µg/L selon la matrice (eau de boisson ou souterraine, sol). Des essais interlaboratoires sur des eaux de référence, des eaux potables, des eaux de surface et des eaux de rejet industriel ont montré que la précision et la justesse de la méthode étaient davantage dépendantes du niveau de concentration analysé sur une gamme variant de 0,1 à 500 µg/L que de la matrice testée.

Principe

La méthode décrit la séparation et l'analyse des HAP par CLHP/UV et fluorimétrie. Cette analyse requiert la mise en œuvre préalable d'une étape d'extraction appropriée (US EPA méthode 3510 ou 3520 pour les eaux et méthode 3540 ou 3550 pour les sols).

Interférences

Des problèmes d'interférences peuvent être dus aux solvants, aux réactifs ou à la verrerie. Les réactifs et solvants doivent être de haute pureté. Il peut être nécessaire de distiller les

ANTHRACÈNE

solvants pour les purifier. Il convient de montrer par l'analyse de blanc de verrerie que tout le matériel utilisé est exempt d'interférence.

Des interférences peuvent également provenir de la matrice particulière analysée. Il est alors possible de recourir à une purification complémentaire soit classique soit spécifique en fonction du problème rencontré. Les autres HAP présents ainsi que les artéfacts liés à la matrice peuvent interférer sur l'analyse.

H / FD X 31-610 (novembre 1997) - Qualité du sol : Méthode de détermination semi-quantitative des hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) dans les sols - Guide de sélection et d'utilisation des kits de dosage immunoenzymatiques.

Domaine d'application

Cette méthode s'applique à la détermination des 16 HAP de la liste US EPA, dont l'anthracène, dans des échantillons de sols. Il s'agit d'une méthode de criblage rapide sur le terrain afin de positionner les échantillons relativement à un ou plusieurs seuils préétablis (par rapport au bas de gamme qui est 1 mg/kg et en général également par rapport à des concentrations de 10 et 100 mg/kg). Cette technique constitue donc un indicateur rapide de la présence éventuelle de HAP dans un sol. Les résultats obtenus sont semi-quantitatifs et doivent être par la suite confirmés ou précisés par des analyses plus fines en laboratoire.

Principe

La méthode décrit la collecte des échantillons, puis leur extraction par agitation dans une solution d'extraction (solution à base de méthanol) suivie d'une filtration et d'une dilution. La concentrations en HAP dans les échantillons est ensuite évaluée par dosage immunoenzymatique (double réaction immunologique et enzymatique). Le dosage se fait en comparant la réponse obtenue pour l'échantillon à celle donnée par des étalons de HAP. Le résultat s'exprime en référence à un intervalle de concentrations défini en fonction des étalons.

Interférences

Parmi les interférences signalées figurent les acides humiques, le fer, le pH, les matières en suspension. La probabilité d'avoir de faux résultats négatifs est non négligeable car l'étape d'extraction est parfois limitante du fait d'une faible efficacité. A l'inverse, de faux résultats positifs peuvent aussi être obtenus en fonction de la plus ou moins grande spécificité des kits et de leurs affinités notamment pour des HAP substitués ou des composés aromatiques chlorés. Aucune information n'est disponible sur l'affinité de ces kits vis à vis des intermédiaires de dégradation biologique des HAP.

ANTHRACÈNE

I / US EPA method 4035 (décembre 1996) - Soil screening for polynuclear aromatic hydrocarbons by immunoassay.

Domaine d'application

Cette méthode s'applique à la détermination des 16 HAP de la liste US EPA, dont l'anthracène, dans des échantillons de sols. Il s'agit d'une méthode de criblage rapide sur le terrain permettant de déterminer rapidement si la concentration en HAP est supérieure ou inférieure à 1 mg/kg.

Principe

La méthode décrit la collecte des échantillons, puis leur extraction et le dosage immunoenzymatique (double réaction immunologique et enzymatique) des HAP par comparaison de la réponse obtenue pour l'échantillon à celle donnée par des étalons de HAP.

Interférences

Tout composé ayant une structure chimique proche de celle des HAP (alkyl HAP, HAP halogénés, HAP substitués) est susceptible d'interférer dans la mesure. Les alkyl HAP, les composés aromatiques chlorés ainsi que d'autres composés aromatiques interagissent aussi sur les anticorps et contribuent donc à générer des faux résultats positifs. Les kits sont optimisés pour réagir avec les HAP à 3 à 4 noyaux. La sensibilité des kits vis à vis des autres HAP est assez variable.

J / US EPA method 8275A (décembre 1996) - Semivolatile organic compounds (PAHs and PCBs) in soils/sludges and solid wastes using thermal extraction/gas chromatography/mass spectrometry (TE/GC/MS).

Domaine d'application

Il s'agit d'une méthode de détermination quantitative rapide des HAP, dont l'anthracène, contenus dans un sol. La limite de quantification est estimée à 1 mg/kg et la limite de détection est de l'ordre de 0,01 à 0,5 mg/kg.

Principe

La méthode consiste en une extraction thermique directe des HAP contenus dans le sol suivie d'un piégeage cryogénique et d'une analyse par CPG/SM. Le dosage est effectué par étalonnage interne (utilisation de HAP deutériés ou marqués au ¹³C comme étalons).

Interférences

Il convient de vérifier l'absence d'interférence dans les blancs, les échantillons, les standards et les étalons internes. L'analyse d'échantillons de haute concentration peut entraîner l'apparition de pics fantômes (contamination du système) par saturation de la colonne

ANTHRACÈNE

analytique. Dans ce cas, il est nécessaire de reconditionner la colonne analytique et d'analyser à nouveau des blancs.

K / NF ISO 13877 (avril 1999) - Qualité du sol : Dosage des hydrocarbures aromatiques polycycliques - Méthode par chromatographie liquide haute performance

Domaine d'application

Cette norme décrit deux méthodes de détermination quantitative des HAP contenus dans un sol selon que l'échantillon est faiblement ou fortement pollué. La gamme de concentration couverte est de l'ordre de 1 à 100 voire 1 000 mg/kg.

Principe

Pour les échantillons faiblement pollués, l'extraction est effectuée sur sol humide par mise en contact de celui-ci avec un solvant d'extraction polaire (ajout en deux étapes d'acétone puis d'éther de pétrole) sous agitation mécanique. Après décantation les composés polaires et l'acétone sont éliminés par lavage de l'extrait à l'eau. La phase organique est ensuite séchée sur sulfate de sodium et reconcentrée, éventuellement une purification complémentaire sur phase alumine est opérée. L'éluat est concentré et l'éther de pétrole est totalement échangé avec de l'acétonitrile. Pour les échantillons fortement pollués, l'extraction est effectuée sur sol séché, avec du toluène, dans un extracteur de type soxhlet pendant 4 à 8 heures. Dans les deux cas, l'analyse et le dosage sont réalisés par CLHP/UV ou fluorimétrie. Le dosage est réalisé par étalonnage externe.

Interférences

Les performances de l'extraction peuvent être diminuées pour des sols contenant une quantité élevée de matières organiques. En fonction de la matrice, des interférences chromatographiques peuvent également apparaître. Il convient d'optimiser les conditions de séparation au cas par cas en fonction des échantillons analysés et de ne pas se fier uniquement à la qualité de la séparation obtenue pour l'analyse d'étalons.

6.3.3 Tableau de synthèse

	Air	Eaux	Sols
Prélèvement et pré-traitement	A, B, C	D, E,	H, I, J
Extraction	A, B, C	D, E	H, I, J, K
Dosage	A, B, C	D, E, F, G	F, G, H, I, J, K

ANTHRACÈNE

7. BIBLIOGRAPHIE

Akhtar M.N., Hamilton J.G., Boyd D.R., Braunstein A., Seifried H.E. and Jerina D.M. (1979) - Anthracene 1,2-oxide: Synthesis and role in the metabolism of anthracene in mammals. *J Chem Soc Perkin*, 1, 1422-1446, (cited in US EPA, 1987).

Atkinson R. (1989) - Kinetic and mechanisms of the Gas-phase reactions of the hydroxyl radical with organic compounds. *J Phys Chem Ref Data*, **Monograph 1**, 246.

ATSDR (1995) - Toxicological profiles for Polycyclic Aromatic Hydrocarbons. Agency for Toxic Substances and Disease Registry, Atlanta, GA: US department of Health and Human Services, Public Health Services. <http://www.atsdr.cdc.gov/toxpro2.html>.

Baars A.J., Theelen R.M.C., Janssen P.J.C.M., Hesse J.M., van Apeldoorn M.E., Meijerink M.C.M., Verdam L. and Zeilmaker M.J. (2001) - Re-evaluation of human-toxicological maximum permissible risk levels RIVM, Rijnsinstituut voor volksgezondheid en milieu. report 711 701 025.

Bond J.A., Baker S.M. and Bechtold W.E. (1985) - Correlation of the octanol/water partition coefficient with clearance halftimes of intratracheally instilled aromatic hydrocarbons in rats. *Toxicology*, **36**, 285-295.

Boyland E. and Levi A.A. (1935) - Metabolism of polycyclic compounds. I. Production of dihydroxydihydroanthracene from anthracene. *Biochem J*, **29**, 2679-2683.

Boyland E. and Levi A.A. (1936a) - Metabolism of polycyclic compounds. II. Production of dihydroxydihydroanthracene glucuronic acid from anthracene. *Biochem J*, **30**, 728-731.

Boyland E. and Levi A.A. (1936b) - Metabolism of polycyclic compounds. III. Anthrylmercapturic acid. *Biochem J*, **30**, 1225-1227.

Brune K., Kalin H., Schmidt R. and Hecker E. (1978) - Inflammatory, tumor initiating and promoting activities of polycyclic aromatic hydrocarbons and diterpene esters in mouse skin as compared with their prostaglandin releasing potency *in vitro*. *Cancer Lett*, **4**, 333-342.

Burnham K. and Rahman M. (1992) - Effects of petrochemicals and ultraviolet radiation on epidermal IA expression *in vitro*. *J Toxicol Environ Health*, **35**, 175-185.

Callahan M.A., Slimak M.W., Gabel N.W., May I.P., Fowler C.F., Freed J.R., Jennings P., Durfee R.L., Whitmore F.C., Maestri W.R., Mabey B.R. and Holt B.R. (1979) - Water-related environmental fate of 129 priority pollutants Volume II.

Halogenated aliphatic hydrocarbons, halogenated ethers, monocyclic aromatics, phthalates esters, polycyclic aromatic hydrocarbons, nitrosamines, miscellaneous compounds. United States Environmental Protection Agency. Washington, DC. EPA-440/4-79-029b.

CE (1996) - Technical guidance document in support of Commission Directive 93/67/EEC on risk assessment for new notified substances and Commission Regulation (EC) N° 1488/94 on

ANTHRACÈNE

risk assessment for existing substances Office for Official Publications of the European Commission. Luxembourg.

CE (1998) - Directive 98/83/CE du Conseil du 3 novembre 1998 Communauté Européenne. Bruxelles, Belgique.

Chang L.H. (1943) - The fecal excretion of polycyclic hydrocarbons following their administration to the rat. *J Biol Chem*, **151**, 93-99.

CHEMFATE (2001) - Environmental Fate Data Base: anthracene. <http://esc.syrres.com/efdb.htm>.

CITI (1992) - Biodegradation and Bioaccumulation data of existing chemicals based on the CSCL Japan. Chemicals Inspection and Testing Institute. Japan. October 1992.

Dayhaw-barker P., Sambuco C.P., Forbes P.D. *et al.*, (1985) Development of an animal model to study the phototoxic effects of anthracene and UV in skin and ocular tissues. *In: 13th, Annual Meeting of the American Society for Photobiology*, New Orleans, LA, P. Photobiol, 122S.

Doornaert B. and Pichard A. (2003) - HAPs - Evaluation de la relation dose-réponse pour des effets cancérogènes : approche substance par substance (facteurs d'équivalence toxique - FET) et approche par mélanges. Evaluation de la relation dose-réponse pour des effets non cancérogènes : Valeurs Toxicologiques de Référence (VTR). Institut National de l'Environnement Industriel et des Risques. Verneuil en Halatte.64 pp.

Emery V.L. and Dillon T.M. (1996) - Chronic toxicity of phenanthrene to the marine polychaete worm, *nereis* (neanthes) *arenaceodentata*. *Bull Environ Contam Toxicol*, **56**, 265-270.

Foran J.A., Holst L.L. and Giesy J.P. (1991) - Effects of photoenhanced toxicity of anthracene on ecological and genetic fitness of *Daphnia magna*: e reappraisal. *Environ Toxicol Chem*, **10**, 425-427.

Forbes P.D., Davies R.E. and Urbach F. (1976) - Phototoxicity and photocarcinogenesis : Comparative effects of anthracene and 8-methoxypsoralen in the skin of mice. *Food Cosmet Toxicol*, **14**, 303-306.

Gala W.R. and Geisy J.P. (1994) - Flow cytometric determination of the photoinduced toxicity of anthracene to the green alga *Selenastrum capricornutum*. *Environ Toxicol Chem*, **13**, 5, 831-840.

Gala W.R. and Giesy J.P. (1992) - Photo-induced toxicity of anthracene to the green alga, *Selenastrum capricornutum*. *Arch Environ Contam Toxicol*, **23**, 316-323.

Gerarde H.W. (1960) - Toxicology and biochemistry of aromatic hydrocarbons. Elsevier monographs on toxic agents. Amsterdam, Elsevier Publishing Co, pp. 240-231.

ANTHRACÈNE

Gershbein L.L. (1975) - Liver regeneration as influenced by the structure of aromatic and heterocyclic compounds. *Res Commun Chem Pathol Pharmacol*, **11**, 445-466.

Hall A.T. and Oris J.T. (1991) - Anthracene reduces reproductive potential and is maternally transferred during long-term exposure in fathead minnow. *Aquat Toxicol*, **19**, 3, 249-264.

Heller W. (1950) - Experimental study on tumours produced by light. Tumours produced by light through photosensibilisation. *Strahlentherapie*, **81**, 529-548.

Hempfling R., Doetsch P., Stubenrauch S., Mahr A., Bauer D., Koschmieder H.J. and Grünhoff D. (1997) - USM-System zur Atlantenbeurteilung - Instrumente für die pfadübergreifende Abschätzung und Beurteilung von atlasverdächtigen Flächen Institut Fresenius, Erlangen et Focon-Ingenieurgesellschaft, Aachen.

Hoch-Ligeti C. (1941) - Studies on the changes in the lymphoid tissue of mice treated with carcinogenic and noncarcinogenic hydrocarbons. *Cancer Res*, **1**, 484-488.

Holst L.L. and Giesy J.P. (1989) - Chronic effects of the photoenhanced toxicity of anthracene on *Daphnia magna* reproduction. *Environ Toxicol Chem.*, **8**, 933-942.

HSDB (2000) - Polycyclic Aromatic Hydrocarbons - Anthracene. Hazardous Substances Data Bank, National Library of Medicine. <http://www.toxnet.nlm.nih.gov>.

HSDB (2001) - Polycyclic Aromatic Hydrocarbons - Anthracene. Hazardous Substances Data Bank, National Library of Medicine. <http://www.toxnet.nlm.nih.gov>.

IARC (1983) - Polynuclear aromatic compounds. Part 1: Chemical, environmental and experimental data. Monographs on the Evaluation of the Carcinogenic Risk of Chemicals to Humans. Lyon, France, IARC, vol 32.

IUCLID (1996) - Polycyclic Aromatic Hydrocarbons - Anthracene. International Uniform Chemical Information Database, European Commission ISPRA. CD-ROM.

IUCLID (2000) - Polycyclic Aromatic Hydrocarbons - Anthracene. International Uniform Chemical Information Database, European Commission ISPRA. CD-ROM.

Kennaway E.L. (1924a) - On cancer-producing tars and tar-fractions. *J Ind Hyg*, **5**, 462-488.

Kennaway E.L. (1924b) - On cancer-producing tars. *Br Med J*, **1**, 564-567.

LaVoie E.J., Coleman D.T., Rice J.E., Geddie N.G. and Hoffmann D. (1985) - Mutagenicity, tumor initiating activity and metabolism of methylated anthracenes. *Carcinogenesis*, **6**, 10, 1483-1488.

LaVoie E.J., Coleman D.T. and Tonne R.L. (1983) Mutagenicity, tumor initiating activity and metabolism of methylated anthracenes. In: *Seventh International Symposium*, Columbus, M. Cooke and A. J. Dennis Eds, 785-798.

Lide D.R. (1997) - Polycyclic Aromatic Hydrocarbons - Anthracene. Handbook of Chemistry and Physics. New York, CRC Press. 78th Ed.

ANTHRACÈNE

Linder G., Bergman H. and Meyer J. (1985) - Anthracene bioconcentration in rainbow-trout during single-compound and complex-mixture exposures. *Environ Toxicol Chem*, **4**, 549-558.

Lovell W.W. and Sanders D.J. (1992) - Phototoxicity testing in guinea-pigs. *Food Chem Toxicol*, **30**, 155-160.

Maisin J., Rome M. and Jacqmin L. (1926) - Method for obtaining non-carcinogenic tars. *C R Soc Biol*, **94**, 767-769.

Maisin J., Desmedt P. and Jacqmin L. (1927) - Carcinogenic action of carbazole. *C R Soc Biol*, **96**, 1056-1058.

Mc Closkey J.T. and Oris J.T. (1991) - Effect of water temperature and dissolved oxygen concentration on the photo-induced toxicity of anthracene to juvenile bluegill sunfish (*Lepomis macrochirus*). *Aquat Toxicol*, **21**, 3,4, 145-146.

Merck (1996) - Polycyclic Aromatic Hydrocarbons - Anthracène. The Merck Index- An Encyclopedia of Chemicals, Drugs, and Biologicals. Ralway, N.J., USA, Merck and co. 12th Ed., p 721.

Miescher G. (1942) - Experimental studies on the formation of tumours by photosensitization (Ger.). *Schweiz Med Wochenschr*, **72**, 1082-1084.

Mitchell R.L., Burchett M.D., Pulkownik A. and McCluskey L. (1988) - Effects of environmentally hazardous chemicals on the emergence and early growth of selected Australian plants. *Plant Soil*, **112**, 195-199.

Montizaan G.K., Kramers P.G.H., Janus J.A. and Posthumus R. (1989) - Integrated criteria document PAH: Effects of 10 selected compounds. National Institute of public Health and Environmental Protection. Bilthoven. 758474011/758447007.

Munoz M.J. and Tarazona J.V. (1993) - Synergistic effect to two- and four-component combinations of the polycyclic aromatic hydrocarbons: phenanthrene, anthracene, naphthalene, and acenaphthene on *Daphnia magna*. *Bull Environ Contam Toxicol*, **50**, 3, 363-368.

Nagorny P.A. (1969) - Comparative study of toxicity in pure and commercial anthracene. *Gif Tr Prof Zabol*, **13**, 59-61.

Nousiainen U., Torronen R. and Hanninen O. (1984) - Differential induction of various carboxylesterases by certain polycyclic aromatic hydrocarbons in the rat. *Toxicology*, **32**, 3, 243-251.

Obana H., Ori S., Kashimoto T. and Kunita N. (1981) - Polycyclic aromatic hydrocarbons in human fat and liver. *Bull Environ Contam Toxicol*, **27**, 1, 23-27.

Old L.J., Benacerraf B. and Carswell E. (1963) - Contact reactivity to carcinogenic polycyclic hydrocarbons. *Nature*, **198**, 1215-1216.

ANTHRACÈNE

OMS (2000) - Air Quality Guidelines for Europe. World Health Organization. Copenhagen. 2nd Ed.

OMS (2004) - Guidelines for drinking-water quality. World Health Organization. Geneva. 3rd Ed.

OMS IPCS (1998) - Environmental Health Criteria 202: Selected Non-Heterocyclic Polycyclic Aromatic Hydrocarbons. World Health Organisation, International Programme on Chemical Safety. <http://www.inchem.org/fullist.htm>.

Pollia J.A. (1939) - Investigations on the carcinogenic effect of anthracene and chrysene and some of their compounds. I. The effect of painting on the skin of mice. *J Ind Hyg Toxicol*, **21**, 219-220.

Rahman A., Barrowman J.A. and Rahimtula A. (1986) - The influence of bile on the bioavailability of polynuclear aromatic hydrocarbons from the rat intestine. *Can J Physiol Pharmacol*, **64**, 9, 1214-1218.

Salaman M.H. and Roe F.J.C. (1956) - Further tests for tumour-initiating activity: *N,N*-Di-(2-chloroethyl)-*p*-aminophenyl-butyric acid (CB1348) as an initiator of skin tumour formation in the mouse. *Br J Cancer*, **10**, 363-378.

Schmähl D. (1955) - Examination of the carcinogenic action of naphthalene and anthracene in rats (GER.). *Z Krebsforsch*, **60**, 697-710.

Scribner J.D. (1973) - Brief communication: Tumor initiation by apparently noncarcinogenic polycyclic aromatic hydrocarbons. *J Natl Cancer Inst*, **50**, 1717-1719.

Shabad L.M., Sorokina J.D., Golub N.I. and Bogovski S.P. (1972) - Transplacental effect of some chemical compounds on organ cultures of embryonic kidney tissue. *Cancer Res*, **32**, 617-627.

Sigman M.E., Zingg S.P., Pagni R.M. and Burns J.H. (1991) - Hotochemistry of anthracene in water. *Tetrahedron Lett*, **32**, 41, 5737-5740.

Sims P. (1964) - Metabolism of polycyclic compounds. 25. The metabolism of anthracene and some related compounds in rats. *Biochem J*, **92**, 621-631.

Spacie A., Landrum P. and Lerversee G. (1983) - Uptake, depuration, and biotransformation of anthracene and benzo[a]pyrene in bluegill sunfish. *Ecotoxicol Environ Saf*, **7**, 330-341.

Stanton M.F., Miller E., Wrench C. and Blackwell R. (1972) - Experimental induction of epidermoid carcinoma in the lungs of rats by cigarette smoke condensate. *J Natl Cancer Inst*, **49**, 867-877.

STF (1991) - Soil Transport and Fate Database and Model Management:anthracene. Environmental Systems and Technologies, Blacksburg (USA).

ANTHRACÈNE

Storer J.S., DeLeon I., Millikan L.E., L. L.J. and Griffing C. (1984) - Human absorption of crude coal tar products. *Arch Dermatol*, **120**, 874-877.

Torronen R., Nousiainen U. and Hanninen O. (1981) - Induction of aldehyde dehydrogenase by polycyclic aromatic hydrocarbons in rats. *Chem Biol Interact*, **36**, 33-44.

Ullmann (1996) - Polycyclic Aromatic Hydrocarbons - Anthracene. Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry, VCH. 5th Ed, vol A2, pp. 343-345.

Urbaneck R.W. (1980) - Side effects of anthracene. *J Am Acad Dermatol*, **2**, 240.

US EPA (1989) - Subchronic toxicity in mice with anthracene. Hazelton Laboratories America, Inc prepared for the Office of Solid Waste. Washington.
<http://www.epa.gov/epahome/search.html>.

US EPA (1990) - Drinking water criteria document for polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs). Final draft. Prepared by the Office of Health and Environmental Assessment Criteria and Assessment Office, Cincinnati, OH for the Office of Drinking Water, Washington, DC. Cincinnati, OH. ECAO-CIN-D010.

US EPA (1996) - Soil Screening Guidance: technical background document. Office of Emergency and Remedial Response. Washington. 9355.4-17A.
<http://www.epa.gov/epahome/search.html>.

US EPA (IRIS) (1991) - Anthracene - Carcinogenicity Assessment. U.S. Environmental Protection Agency - Integrated Risk Information System - Carcinogenicity Assessment for lifetime exposure. <http://www.epa.gov/ngispgm3/iris/>.

US EPA (IRIS) (1993) - Anthracene - Oral RfD Assessment. U.S. Environmental Protection Agency - Integrated Risk Information System - Carcinogenicity Assessment for lifetime exposure. <http://www.epa.gov/ngispgm3/iris/>.

Veerkamp W. and ten Berge W.F. (1994) - The concepts of HESP. Reference manual. Human exposure to soil pollutants. Version 2.10a. Shell Internationale Petroleum Maatschappij. The Hague, pp. 1-66.

Verschueren K. (1996) - Anthracene. Handbook of Environmental Data on Organic Chemicals. New York, Van Nostrand Reinhold Co. 3rd Ed, pp. 214-217

Vindimian E., Bisson M., Dujardin R., Flammarion P., Garric J., Babut M., Lamy M.H., Porcher J.M. and Thybaud E. (2000) - Complément au SEQ-Eau : méthode de détermination des seuils de qualité pour les substances génotoxiques. INERIS. Verneuil-en-Halatte. Rapport final.

Walter J.F. (1980) - Side effects of antracene (Reply). *J Am Acad Dermatol*, **2**, 240-243.

Warshawsky D., Barkley W. and Bingham E. (1993) - Factors affecting carcinogenic potential of mixtures. *Fundam Appl Toxicol*, **20**, 376-382.

ANTHRACÈNE

Weinstein J.E. and Polk K.D. (2001) - Phototoxicity of anthracene and pyrene to glochidia of the freshwater mussel *Utterbackia imbecillis*. *Environ Toxicol Chem*, **20**, 9, 2021-2028.

Weiss G. (1986) - Polycyclic Aromatic Hydrocarbons - Anthracene. Hazardous Chemicals Data Book. Park Ridge New Jersey, Noyes Data Corporation. 2nd Ed, pp125.

White K.L., Lysy H.H. and Holsapple M.P. (1985) - Immunosuppression by polycyclic aromatic hydrocarbons. A structure-activity relationship in B6C3F₁ mice and DBA/2 mice. *Immunopharmacology*, **9**, 155-164.

Wynder E.L. and Hoffman D. (1959) - A study of tobacco carcinogenesis VII. The role of higher polycyclic hydrocarbons. *Cancer*, **12**, 1079-1086.

Yang J.J., Roy T.A. and Mackerer C.R. (1986) - Percutaneous absorption of anthracene in the rat: comparison of *in vivo* and *in vitro* results. *Toxicol Ind Health*, **2**, 79-84.