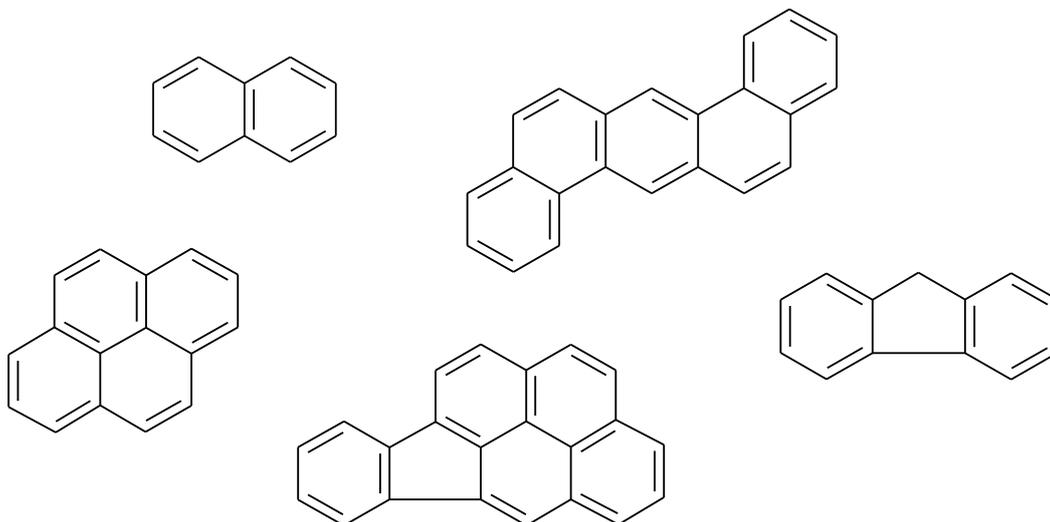


## Chimie - Exposé

# Les Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques



<b>Introduction .....</b>	<b>3</b>
<b>Les Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques (HAP).....</b>	<b>4</b>
<b>I. Définitions .....</b>	<b>4</b>
<b>1. Les hydrocarbures .....</b>	<b>4</b>
<b>2. Notion d'aromaticité .....</b>	<b>4</b>
Définition théorique d'un composé aromatique .....	4
Propriétés générales.....	4
NB : Délocalisation des électrons sur des liaisons covalentes.....	4
<b>3. Caractère polycyclique .....</b>	<b>4</b>
<b>4. Récapitulation .....</b>	<b>4</b>
<b>5. Classification .....</b>	<b>5</b>
<b>II Exemples .....</b>	<b>5</b>
<b>III Propriétés des HAP .....</b>	<b>5</b>
<b>1. Apparence .....</b>	<b>5</b>
<b>2. Propriétés physiques .....</b>	<b>5</b>
Solubilité dans l'eau / bioaccumulation.....	5
Adsorption.....	6
Pas de gaz à effet de serre.....	6
Grande stabilité thermodynamique.....	6
<b>3. Présence dans l'environnement.....</b>	<b>6</b>
<b>4. Polluants organiques persistants.....</b>	<b>7</b>
<b>Les sources d'hydrocarbures aromatiques polycycliques .....</b>	<b>8</b>
<b>I Les sources naturelles .....</b>	<b>8</b>
Feux de forêt.....	8
Activité volcanique.....	8
Dégradation de matière organique par des bactéries .....	8
<b>II Les sources anthropiques .....</b>	<b>8</b>
Les sources industrielles.....	8
Les transports .....	8
Les sources domestiques .....	8
Le tabac .....	8
<b>III Les sources de HAP en France.....</b>	<b>9</b>
<b>Les risques pour la santé.....</b>	<b>11</b>
<b>I Les voies d'exposition .....</b>	<b>11</b>
L'inhalation d'air pollué.....	11
La fumée de cigarette .....	11
L'ingestion d'aliments et d'eau contaminés.....	11
Contact cutané .....	11
<b>II Les risques .....</b>	<b>11</b>
Cancers.....	12
Mutations génétiques.....	12
<b>Dégradation des HAP .....</b>	<b>13</b>
<b>I Aspects généraux des réactions de dégradation.....</b>	<b>13</b>
<b>Cas 1 : Action des bactéries à l'aide de dioxygénases .....</b>	<b>13</b>
<b>Cas 2 : Action des micro-organismes eucaryotiques à l'aide de monooxygénases .....</b>	<b>14</b>
<b>II Exemples de dégradation .....</b>	<b>15</b>
<b>Cas 1 : Le naphthalène.....</b>	<b>15</b>
Dégradation par des bactéries.....	15
Dégradation par des champignons.....	15
<b>Cas 2 : Le benzo[a]pyrène .....</b>	<b>16</b>
Oxydation par des bactéries.....	16
Oxydation par des champignons.....	17
<b>Conclusion .....</b>	<b>18</b>
<b>Bibliographie.....</b>	<b>19</b>

# Introduction

## Présentation rapide

Les hydrocarbures aromatiques polycycliques (ou HAP) sont des contaminants produits notamment dans les processus de combustion.

## Recherche

Leur caractère ubiquiste (faculté d'être présent en plusieurs lieux à la fois) et leur génotoxicité (variable selon l'espèce) sont à l'origine d'une recherche importante.

La microbiologie de la dégradation des HAP est un domaine de recherche en plein développement. Il s'agit d'étudier à la fois leur devenir dans l'environnement et l'utilisation de procédés microbiologiques de dépollution des sols industriels contaminés.

## Bref historique

1775 : découverte du rôle cancérigène des HPA par Percival Pott (cancer du scrotum chez les ramoneurs)

années 1930 : mise en évidence de la cancérogénicité du benzo[a]pyrène par application cutanée chez la souris

# Les Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques (HAP)

## I. Définitions

### 1. Les hydrocarbures

Les hydrocarbures sont des composés organiques constitués uniquement de **carbone** et d'**hydrogène**.

Ce sont les composés organiques (composés du carbone, provenant de tissus vivants ou de transformations subies par les produits extraits de matière vivante) les plus simples : on peut considérer que les autres composés organiques en sont dérivés.

### 2. Notion d'aromaticité

#### Définition théorique d'un composé aromatique

Un composé à caractère aromatique est une espèce chimique possédant un ou plusieurs cycles plans accolés avec les électrons  $\Pi$  délocalisés sur tous les atomes des cycles.

#### Propriétés générales

- grande stabilité thermodynamique grâce à la délocalisation des électrons  $\Pi$  sur tous les atomes
- réactions d'addition très difficiles (car perte de l'aromaticité)
- réactions de substitution électrophiles faciles
- en RMN, protons liés aux C des cycles très déblindés (ie la densité électronique autour des H est faible) : déplacement chimique de 6,5 à 8,5

#### NB : Délocalisation des électrons sur des liaisons covalentes

*Principe de la mésomérie* : toutes les représentations de Lewis qui ne diffèrent que par la répartition des électrons autour des noyaux définissent l'ensemble des formes mésomères.

La structure réelle d'une espèce chimique est intermédiaire entre toutes les représentations de Lewis les plus probables : c'est *l'hybride de résonance*.

### 3. Caractère polycyclique

Un composé polycyclique présente plusieurs cycles.

### 4. Récapitulation

Les HAP sont :

- des composés organiques
- contenant uniquement des atomes de carbone et d'hydrogène
- formés de plusieurs cycles plans accolés
- avec les électrons  $\Pi$  délocalisés sur tous les atomes des cycles

## 5. Classification

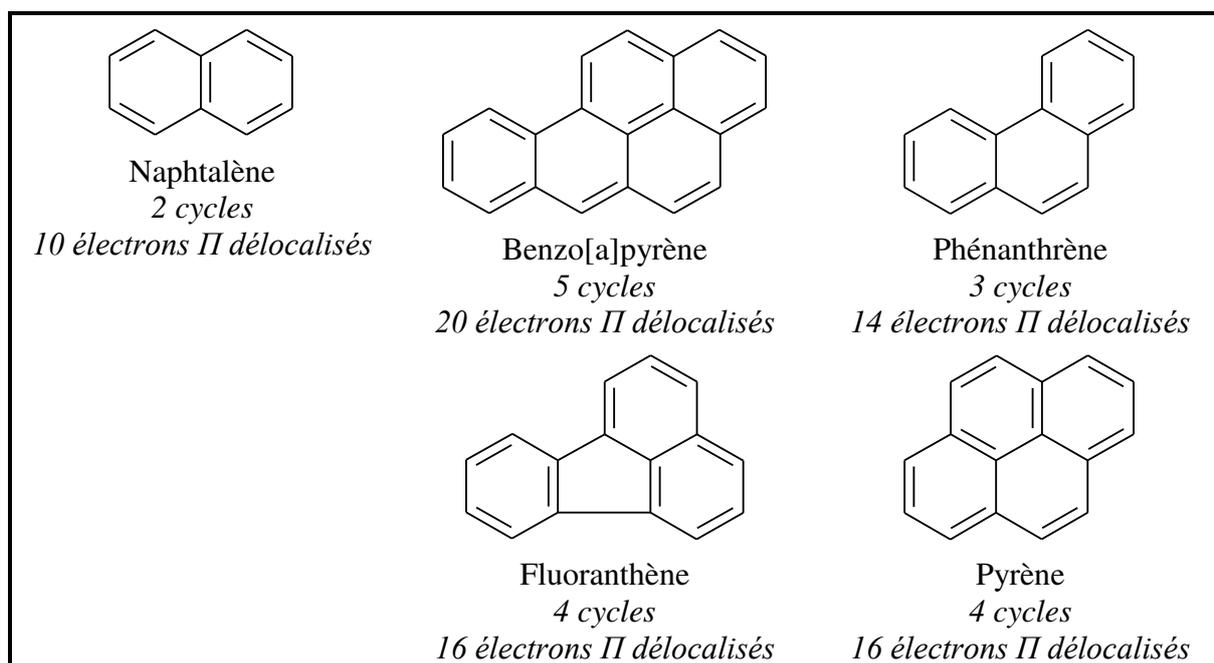
Les HAP sont divisés en 2 catégories :

- les composés à faible masse molaire (moins de 4 cycles)
- les composés à masse molaire élevée (4 cycles et plus)

## II Exemples

Il existe plus de 100 dérivés connus.

En voici quelques exemples :



## III Propriétés des HAP

### 1. Apparence

Les HAP purs sont des solides habituellement colorés, cristallins à la température ambiante.

### 2. Propriétés physiques

Les propriétés physiques des HAP diffèrent en fonction de leur masse molaire et de leur structure.

#### Solubilité dans l'eau / bioaccumulation

Sauf dans le cas du naphthalène, la solubilité des HAP est faible à très faible. Les HAP sont des molécules **lipophiles**.

Ils présentent un fort potentiel de **bioconcentration dans les organismes vivants et dans les sédiments**.

### Adsorption

Les HAP ont un fort potentiel d'adsorption sur les matières particulaires en suspension dans l'air et dans l'eau.

### Pas de gaz à effet de serre

Généralement, les HAP n'absorbent que faiblement les longueurs d'onde infrarouges entre 7 et 14  $\mu\text{m}$ , habituellement absorbées par les espèces influant sur le réchauffement climatique.

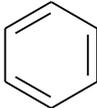
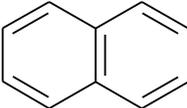
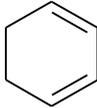
### Grande stabilité thermodynamique

En effet, le caractère aromatique des HAP se traduit par la délocalisation des électrons  $\Pi$  sur tous les atomes des cycles.

On définit pour caractériser la stabilisation énergétique due aux conjugaisons l'énergie de résonance  $E_R$  :

$$E_R = E_{\Pi} - E_{\Pi\text{Lewis}}$$

avec  $E_{\Pi}$  l'énergie totale des électrons  $\Pi$  calculée par la méthode de Hückel simple  
 $E_{\Pi\text{Lewis}}$  l'énergie totale des électrons  $\Pi$  s'ils n'étaient pas délocalisés

			
$ E_R  \text{ (kJ.mol}^{-1}\text{)}$	150	257	7,6

En raison de cette grande stabilité, les HAP sont **difficilement dégradables**.

### **3. Présence dans l'environnement**

Les HAP sont des composés qui ont la faculté d'être présents en plusieurs lieux à la fois : ils sont répartis sur la totalité du globe terrestre. Ce sont des composés **ubiquitaires** (ou **ubiquistes**).

Un composé est ubiquitaire si :

- il est très stable
- il est peu soluble dans l'eau
- il est émis dans l'environnement en quantité suffisante (évaluée à 50 000 tonnes par an au niveau mondial)

Les HAP sont présents dans l'environnement sous forme de mélanges complexes, difficiles à caractériser et à mesurer.

#### 4. Polluants organiques persistants

Avec les dioxines, les furannes, les HAP halogénés..., les HAP font partie des polluants organiques persistants (POP).

Les POP présentent des effets toxiques sur la santé humaine et sur la faune, et sont associés à une vaste gamme d'effets nuisibles : dégradation du système immunitaire, effets sur la reproduction et sur le développement et propriétés cancérogènes.

Les POP sont définis par 4 propriétés :

- toxicité : un ou plusieurs impacts prouvés sur la santé humaine
- persistance dans l'environnement (résistance aux dégradations biologiques naturelles)
- bioaccumulation : accumulation dans les tissus vivants et concentrations de plus en plus fortes le long de la chaîne alimentaire
- transport longue distance : de par leurs propriétés de persistance et de bioaccumulation, ces molécules ont tendance à se déplacer sur de très longues distances et se déposer loin des lieux d'émission, typiquement des milieux chauds (à forte activité humaine) vers les milieux froids (en particulier l'Arctique)

Catégorie	Nom	Particularité
Production non-intentionnelle (sous-produit de réaction)	Dioxines	Sous-produit de combustion ou d'autres procédés industriels
	Furannes	
	Hydrocarbures polycycliques aromatiques (HAP)	
	Hexachlorobenzène (HCB)	
Produits chimiques industriels	Polychlorobiphényles (PCB)	Utilisés comme isolant électrique, fluide caloporteur, additif dans les peintures et plastiques
	Hexachlorocyclohexane (HCH)	Produit intermédiaire de l'industrie chimique
	Hexachlorobenzène (HCB)	Utilisé dans la fabrication de munitions et de caoutchouc
Pesticides	Hexachlorobenzène (HCB)	Fongicide
	Endrine	Insecticides
	Aldrine	
	Dieldrine	
	Toxaphène	
	Mirex	
	Chlordane	
	Chlordécone	
	Heptachlore	
	DDT	
	Lindane	

# Les sources d'hydrocarbures aromatiques polycycliques

Les sources émettant des hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) peuvent être naturelles ou anthropiques (résultant de l'activité humaine).

De manière générale, les HAP proviennent de **combustions incomplètes** de matériaux organiques entre 500 et 900°C.

## I Les sources naturelles

- Feux de forêt
- Activité volcanique
- Dégradation de matière organique par des bactéries

## II Les sources anthropiques

Ces sources anthropiques peuvent être divisées en 4 catégories: les sources industrielles, les transports, les sources domestiques, le tabac.

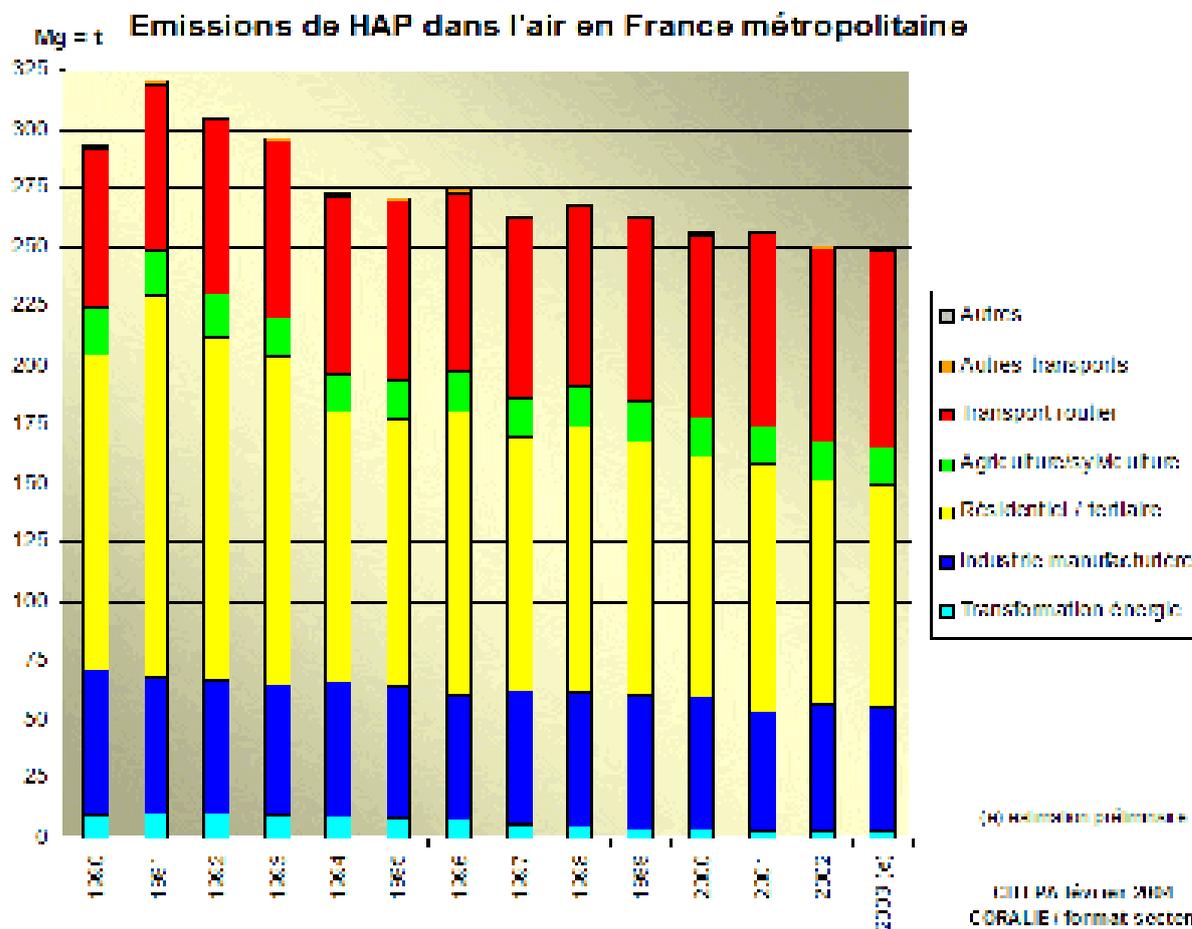
- Les sources industrielles  
Les industries émettant le plus de HAP sont les industries de la fonte, de la métallurgie et de production d'énergie (raffineries de pétrole, centrales thermiques...), les industries chimiques et activités de production de coke, produits chlorés, pâte à papier, ou encore d'insecticides, fongicides, antiseptiques et désinfectants.
- Les transports  
Les véhicules motorisés, particulièrement les véhicules diesel, contribuent beaucoup à l'émission de HAP dans l'air. Les HAP proviennent de la combustion incomplète de l'essence ou du gasoil. Les HAP émis par les véhicules diesel sont présents dans les particules et la phase gazeuse rejetées dans l'air. Les HAP avec une faible masse molaire (molécules contenant 2 ou 3 cycles) sont plutôt associés à la phase gazeuse tandis que ceux qui ont une masse molaire plus importante sont associés aux particules. Les avions ont également été identifiés comme source de HAP.
- Les sources domestiques  
Les sources domestiques sont principalement constituées de la cuisine (cuisson des aliments) et de l'incinération des déchets ménagers.  
Les sources alimentaires proviennent aussi bien des aliments eux-mêmes (sucres, céréales, huiles, graisses) que des modes de cuisson et en particulier du grillage des graisses. Quelques laboratoires étudient l'exposition aux HAP de la cuisine. Des chimistes ont ainsi montré que certaines cuissons font absorber en un repas plus de HAP que le fait de respirer pendant un an dans une ville telle que Paris.
- Le tabac

Chacune de ces sources émet certains HAP.

Combustion du charbon	Phénanthrène, fluoranthène, pyrène
Incinération	Pyrène, phénanthrène, fluoranthène
Combustion du bois	Benzo(a)pyrène, naphthalène, fluoranthène
Véhicules diesel et essence	Fluoranthène et pyrène avec une proportion importante de benzo(b)Fluoranthène et benzo(k)fluoranthène, et des composés de thiophène

### III Les sources de HAP en France

Les émissions de HAP représentaient **251t** en 2002. Les émissions sont globalement en baisse sur la période 1990-2002. Ainsi, les émissions totales en France métropolitaine étaient de 293t en 1990, soit une baisse en 2002 de 14%.

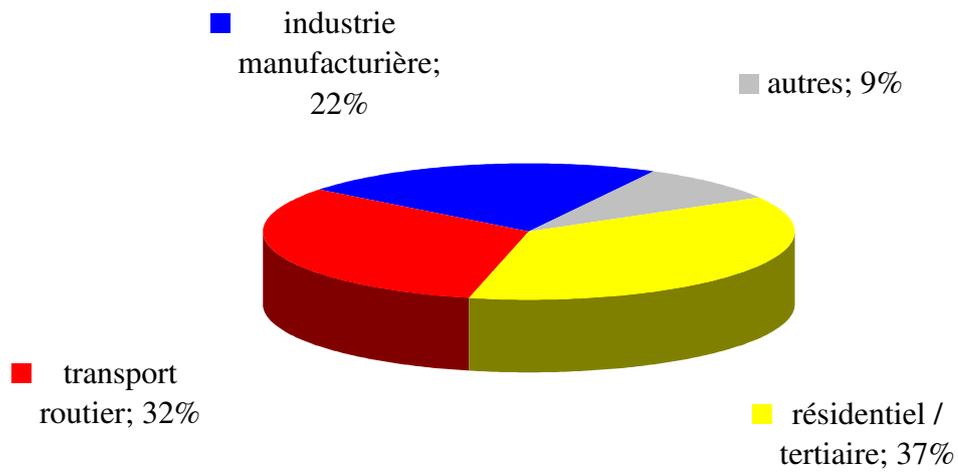


Les émissions proviennent principalement de trois secteurs:

- le résidentiel/tertiaire : 37%
- le transport routier (en particulier les véhicules diesel) : 32%
- l'industrie manufacturière : 22%

Les autres secteurs contribuent peu, voire pas, aux émissions de ce polluant.

### Sources de HAP en France en 2002



L'évolution de ces émissions suit d'assez près celle des conditions climatiques, traduisant ainsi le **lien entre les émissions et la consommation d'énergie**.

# Les risques pour la santé

## I Les voies d'exposition

L'homme est exposé aux HAP de diverses façons: inhalation d'air pollué, inhalation de tabac, ingestion d'aliments et d'eau contaminés, contact cutané.

- L'inhalation d'air pollué

C'est le mode d'exposition qui suscite le plus d'inquiétudes car l'exposition est continue et concerne une population très importante. L'absorption de HAP dépend évidemment de leur concentration dans l'air ainsi que de la taille des particules.

- La fumée de cigarette

La fumée de cigarette contient plus de 70 composés de HAP différents.

- L'ingestion d'aliments et d'eau contaminés

L'absorption digestive est rapide et facilitée par les aliments riches en graisses.

- Contact cutané

L'exposition par contact cutané n'a lieu qu'en présence de concentrations élevées. L'absorption cutanée s'effectue pour les composés lipophiles.

Quel que soit le mode d'absorption, la distribution dans l'organisme est rapide, quelques heures au plus. Ces molécules sont stockées dans le foie, les reins et les graisses.

Sources de HAP	Absorption			
	Non Fumeur		Fumeur	
	µg/jour	Total %	µg/jour	Total %
Nourriture	3	93.0	3	44.6
Air	0.16	4.9	0.16	2.4
Eau	0.006	0.2	0.006	<0.01
Terre (Ingestion accidentelle)	0.06	1.9	0.06	1.0
Cigarette	-	-	3.5	52
Total	3.22	100	6.72	100

## II Les risques

Les données expérimentales sont nombreuses mais ne concernent que quelques dérivés tels le benzo[a]pyrène. Des effets hématotoxiques, cancérigènes et immunosuppresseurs ont été observés chez le rat et la souris.

Il y a plusieurs dizaines de HAP dont la toxicité est très variable : certains sont faiblement toxiques, alors que d'autres, comme le benzo[a]pyrène, sont des cancérigènes reconnus depuis plusieurs années.

Les HAP peuvent interagir avec les mécanismes cellulaires, soit directement en se fixant sur les sites lipophiles, soit indirectement par liaison de leurs métabolites hydrophiles avec des structures cellulaires (protéines, ADN) provoquant ainsi des effets à long terme.

- Cancers

Le risque principal est le cancer. Les HAP sont classés cancérigènes pour l'homme (groupe 1 du CIRC).

Les cancers développés sont les cancers du poumon (tabagisme), les cancers de la peau (zones exposées au soleil) et les cancers des lèvres et de la sphère bucco-pharyngée. D'autres facteurs tels les facteurs génétiques, environnementaux et nutritionnels jouent un rôle important dans l'apparition de cancers.

- Mutations génétiques

Par exemple, le benzo[a]pyrène se lie à l'ADN et cause des mutations génétiques, des aberrations chromosomiques, des échanges de chromatides, des synthèses d'ADN supplémentaires.

Molécule	Toxicité	Cancérigène	Mutagène
Fluoranthène	Souris LD <sub>50</sub> = 500 ppm Rat LD <sub>50</sub> = 2000 ppm Lapin LD <sub>50</sub> = 3180 ppm	+/?	+
Pyrène	Souris LD <sub>50</sub> = 514-678 ppm	-/?	+/?
Naphtalène	Algue : 24h, -50% à 33 ppm Rat LD <sub>50</sub> = 306-600 ppm Lapin LD <sub>50</sub> = 800 ppm	-	-
Benzo(a)pyrène	Souris LD <sub>50</sub> = 250 mg/kg	+	+

Les relations entre la dose reçue et les effets sont mal connues et aucun seuil n'a été mis en évidence chez l'homme. Il est cependant nécessaire, pour le développement d'effets, que la durée d'exposition soit très prolongée.

# Dégradation des HAP

Certains HAP peuvent subir une **dégradation microbienne**.

En effet, les micro-organismes jouent un rôle important dans le recyclage des éléments : carbone, azote, phosphore, oxygène et soufre, et dans la dégradation de composés organiques en  $\text{CO}_2$ . Cette remarquable capacité de catalyse des réactions de dégradation est intéressante dans le cadre du traitement des polluants « organiques » en milieu aqueux, et plus spécialement des HAP.

Du fait du caractère cancérigène des HAP, vu précédemment, les possibilités de dégradation par voies microbiennes ont été bien étudiées.

De ces études, il ressort qu'une large variété de micro-organismes est capable de dégrader les HAP : des **bactéries**, des **champignons**, et des algues. Toutefois, elles ne peuvent dégrader entièrement que les HAP de 3 cycles aromatiques ou moins reliés entre eux (comme le naphthalène par exemple). En général, les réactions se produisent aux **interfaces eau/sédiments**, et les taux de dégradation peuvent être influencés par des facteurs environnementaux. De plus, le taux de dégradation est en général moins élevé pour les produits d'origine anthropique (synthétisés par l'homme) que pour les produits naturels.

Nous allons dans un premier temps étudier les schémas généraux de dégradation de HAP puis nous verrons plus précisément le cas de quelques HAP.

## I Aspects généraux des réactions de dégradation

Le but de la dégradation est de « casser » le cycle pour ôter le caractère aromatique de la molécule.

Considérons un noyau benzénique. Deux types d'enzymes peuvent agir sur ce noyau.

### Cas 1 : Action des bactéries à l'aide de dioxygénases

L'enzyme dioxygénase catalyse une réaction entre le cycle aromatique et  $\text{O}_2$  : on forme un diol en configuration cis (les 2 groupements alcools sont situés du même côté du plan moyen). Puis une autre enzyme, la déshydrogénase, catalyse une réaction de ré-aromatisation du cycle (voir Figure 1).

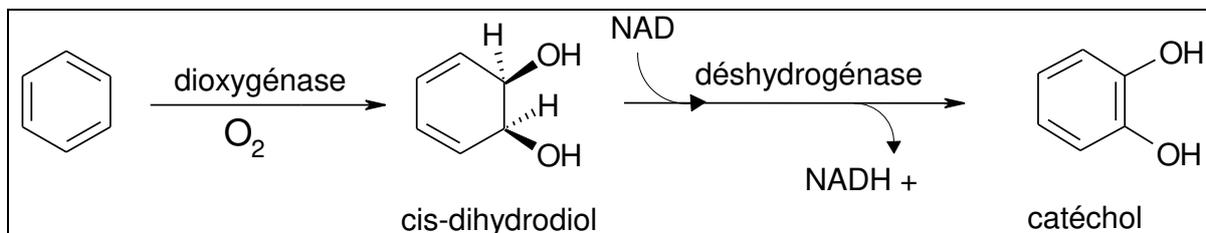
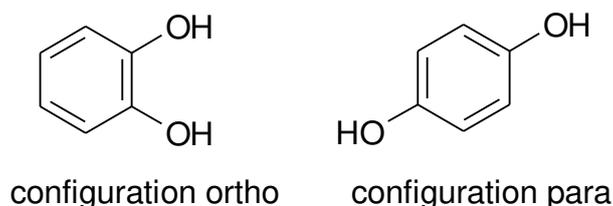


Figure 1 : Formation d'un produit intermédiaire par catalyse enzymatique.

Pour que la destruction du cycle aromatique puisse se faire, il est très important que les 2 groupes OH soient en position ortho ou para sur le cycle.



Nous allons étudier le cas où la configuration obtenue est ortho. La réaction de destruction du cycle à proprement parler se produit alors, à nouveau catalysée par des dioxygénases : il s'agit d'une réaction d'oxydation de l'une des doubles liaisons, avec formation de groupe acide carboxylique (-COOH).

Si la liaison cassée lors de l'oxydation est celle située entre les 2 groupes hydroxy on parle de fission ortho (c'est une cassure intradiol), si c'est l'une des liaisons adjacentes à l'un des 2 groupements, il s'agit d'une fission meta (cassure extradiol). (Voir fig. 2)

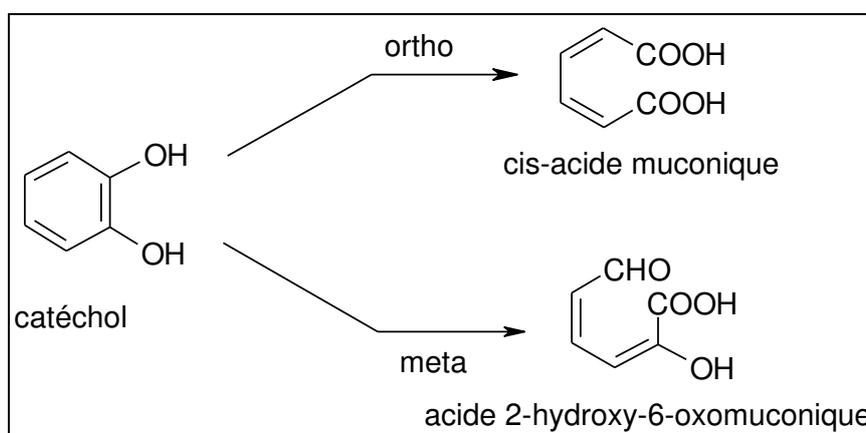


Figure 2 : Réaction de lyse du cycle aromatique catalysé par dioxygénases.

### Cas 2 : Action des micro-organismes eucaryotiques à l'aide de monooxygénases

Dans ce cas, l'enzyme cytochrome P-450 monooxygénase catalyse la formation d'un époxyde à partir d'une double liaison. A ce niveau, si aucune autre enzyme n'agit, il se produit naturellement une ré-aromatation (puisque le cycle aromatique est beaucoup plus stable), et il y a formation d'un phénol, qui par la suite se fixe sur les sulfates et les glucoses. C'est ainsi que la molécule aromatique se fixe dans le corps des poissons et des mammifères. Il n'y a alors pas destruction du cycle et la molécule reste toxique.

Toutefois, l'enzyme époxyde hydrolase peut catalyser une réaction dont le produit est cette fois un trans-dihydrodiol. A partir de ce dernier, on peut repasser au catéchol comme précédemment, et détruire le cycle. (voir fig. 3)

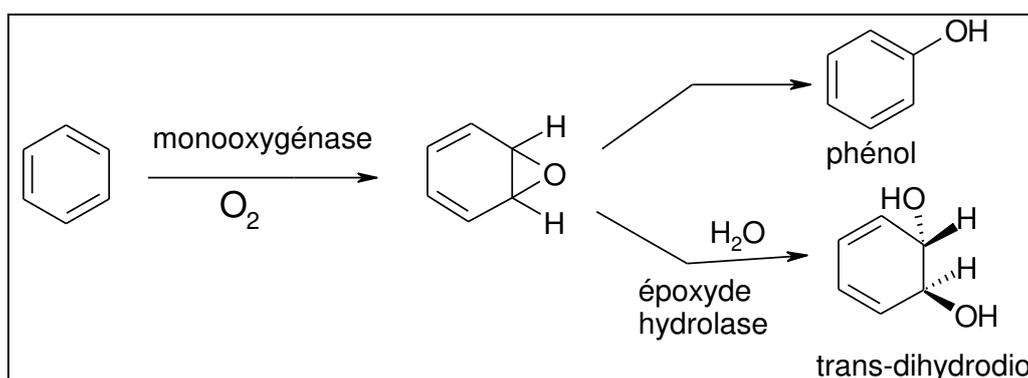


Figure 3 : Réaction d'oxydation catalysée par les monooxygénases.

Nous avons donc vu comment les micro-organismes peuvent casser un cycle aromatique non substitué. Dans le cas des HAP, il faudra effectuer ces cassures sur les différents noyaux benzéniques de façon successive.

## II Exemples de dégradation

### Cas 1 : Le naphthalène

Le naphthalène est composé de 2 noyaux benzéniques. Comme nous l'avons vu précédemment, 2 types de réactions sont possibles selon les micro-organismes utilisés.

#### Dégradation par des bactéries

La figure 4 présente un premier type de dégradation possible, en passant par les dioxygénases. Il se produit la réaction présentée dans le I.1, qui conduit à la substitution de 2 groupes OH sur un des cycles (1,2 dihydroxy-naphthalène). Après oxydation, on obtient un acide pyruvique qui est transformé en salicylaldéhyde par l'enzyme aldolase. Puis le produit est à nouveau oxydé jusqu'à former du catéchol. Ce dernier peut alors subir une fission ortho ou meta selon le type de bactéries.

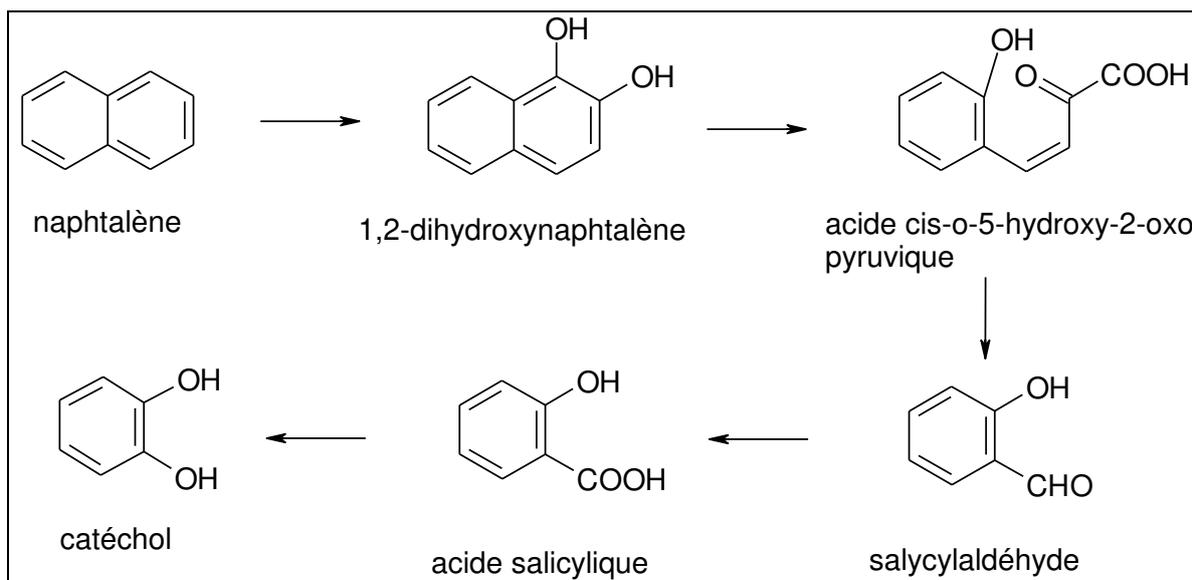


Figure 4 : Dégradation du naphthalène par des bactéries.

#### Dégradation par des champignons

La réaction est initiée par la P-450 monooxygénase et forme un époxyde. Par la suite, s'il n'y a pas intervention d'enzymes, il se produit un réarrangement de la molécule en 1-naphtol. Cette molécule peut réagir avec des glucides ou des sulfates par réaction de substitution pour donner du 1-naphtyl glucuronide ou du 1-naphtyl sulfate, ou elle peut s'oxyder.

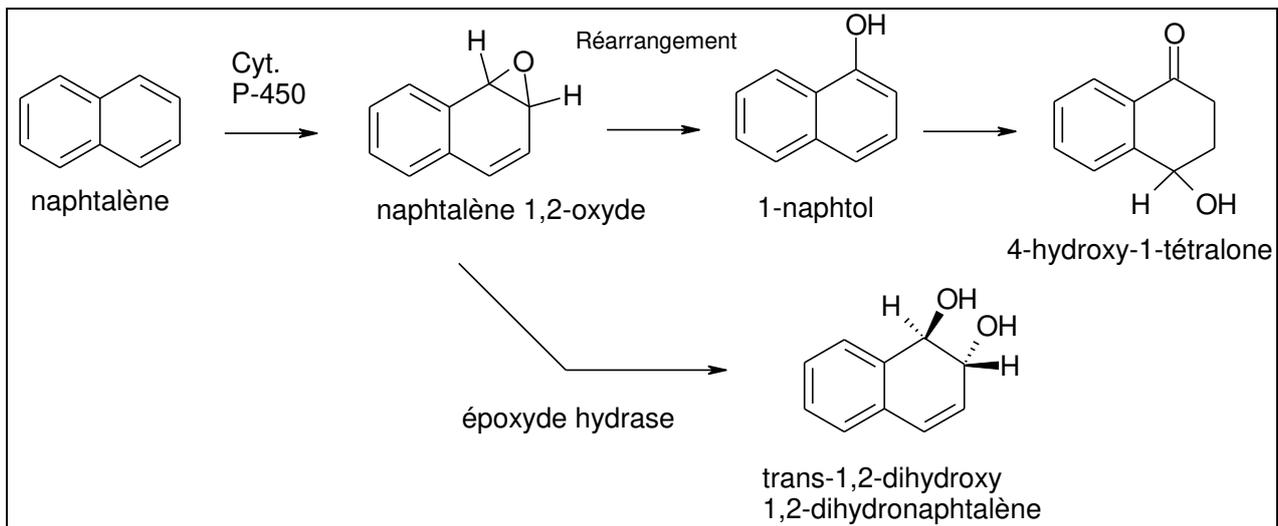


Figure 5 : Dégradation du naphtalène par des champignons

Si l'enzyme époxyde hydratase intervient, on aboutit à un diol de configuration trans.

## Cas 2 : Le benzo[a]pyrène

Cette molécule contenant 5 cycles, on ne connaît pas de micro-organismes qui puissent la dégrader entièrement. Toutefois, elle peut être partiellement oxydée et peut être transformée en molécules moins dangereuses pour la santé des êtres vivants. Tout comme dans le cas précédent, l'oxydation peut se faire par des bactéries ou par des champignons.

### Oxydation par des bactéries

Il a été prouvé qu'un type de bactéries pouvaient oxyder un des cycles du benzo[a]pyrène.

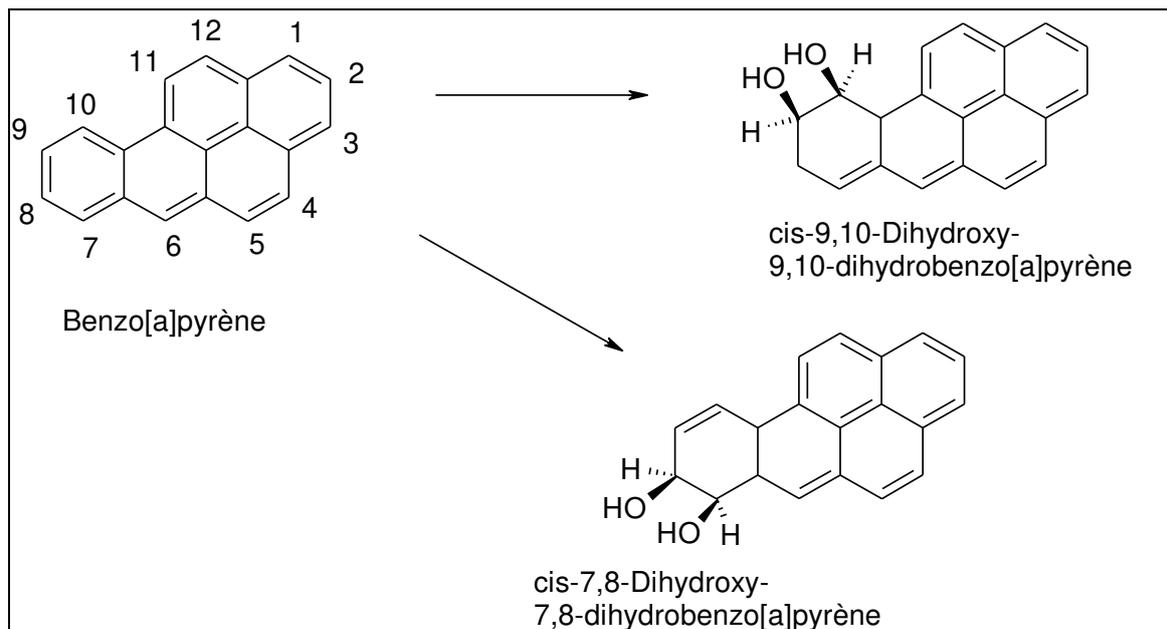


Figure 6 : Oxydation du benzo[a]pyrène

### Oxydation par des champignons

Le fungi *C. elegans* peut oxyder le benzo[a]pyrène par de nombreuses réactions. Il le transforme en divers produits tels des époxydes, phénols, trans-dihydriols, dihydriols époxydes, tétraols, quinones. Les composés obtenus sont supposés être hautement cancérigènes pour les organismes plus évolués. Toutefois, ces composés sont aussi transformés par le *C. elegans* en sulfate ou glucuronide conjugué, qui sont eux des dérivés non toxiques.

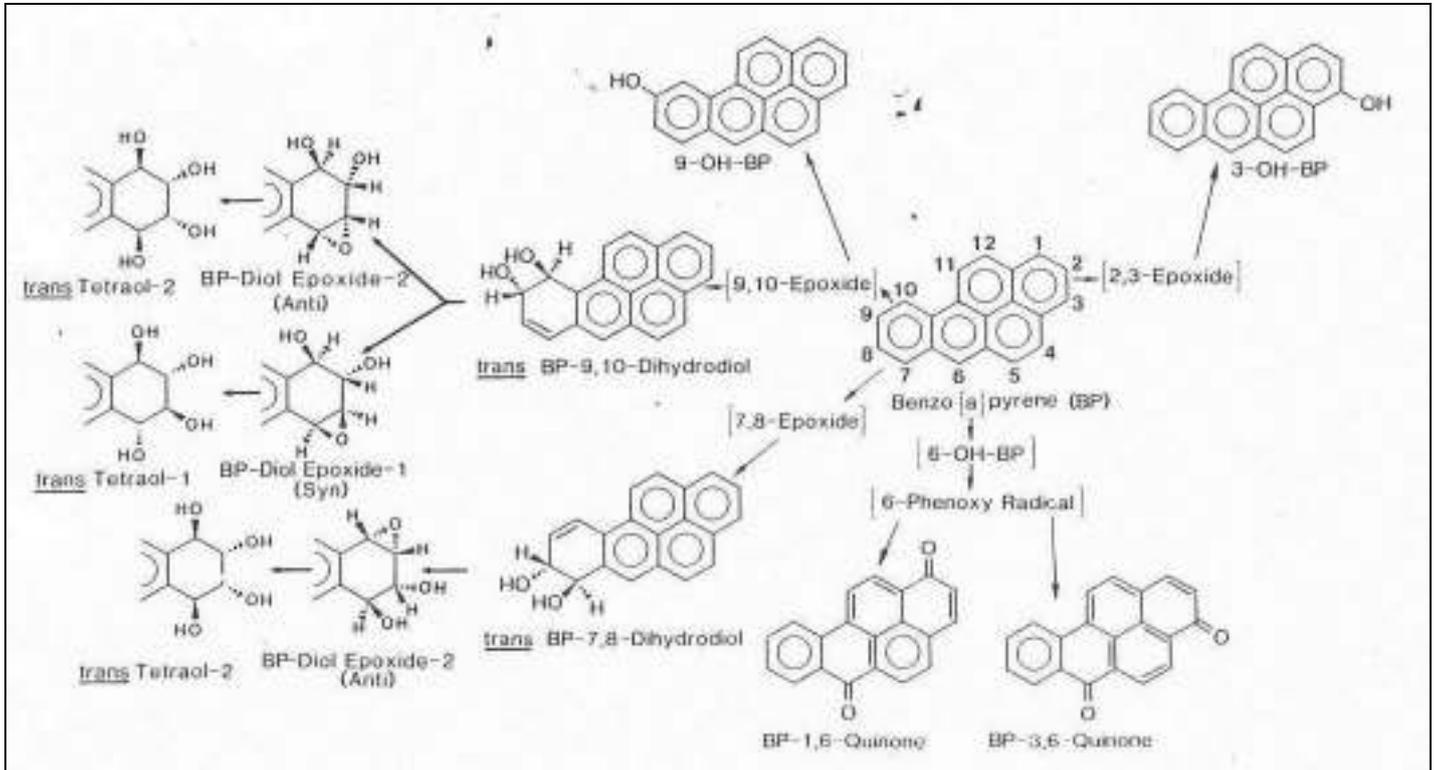


Figure 7 : Oxydation du benzo[a]pyrène par le *C. elegans*

## Conclusion

La multitude des dérivés et des sources d'exposition rend difficile l'évaluation des risques pour l'homme.

Les HAP sont surtout cancérigènes.

Les autres effets toxiques sont mal connus chez l'homme.

Bien que difficilement dégradables, les HAP ne sont donc pas intrinsèquement récalcitrants à la biodégradation : les organismes dégradeurs sont essentiellement les bactéries et les champignons. Mais un facteur important limitant leur dégradation est leur accessibilité aux micro-organismes.

Comment diminuer la production de HAP et réduire les risques d'exposition ?

Seule solution : **réduire à la source**

- optimiser les conditions de fonctionnement des procédés industriels
- faire une consommation modérée d'aliments frits ou cuits sur charbon de bois
- éliminer la consommation de tabac

## Bibliographie

### Ouvrage

Metabolism of polycyclic aromatic hydrocarbons in the aquatic environment  
Uscha Varanasi, CRC Press

### Sites Internet

<http://www.citepa.org/emissions/nationale/Pop>  
Centre Interprofessionnel Technique d'Etudes de la Pollution Atmosphérique

<http://www.ademe.fr/entreprises/polluants/polluants>  
Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'énergie

[http://www.hc-sc.gc.ca/hecs-sesc/dse/pdf/hydrocarbures\\_aromatiques\\_polycycliques.pdf](http://www.hc-sc.gc.ca/hecs-sesc/dse/pdf/hydrocarbures_aromatiques_polycycliques.pdf)  
Loi canadienne sur la protection de l'environnement

[http://www.stc-congres.org/Congres\\_2003/Conferences/DESCOTES\\_risque\\_HAP\\_fichiers](http://www.stc-congres.org/Congres_2003/Conferences/DESCOTES_risque_HAP_fichiers)