

IDENTIFICATIONS VISUELLES TOPO PAR EMPLACEMENT

LICHENS / Périmètre 1 à 3 km

L1-Rouen préfecture



Vue satellitaire vers L1-Rouen préfecture, capture Google

Les biocapteurs sont prélevés au niveau du platane dominant la place. Deux vues de l'espace de prélèvement.

Cet emplacement est urbain mais il n'est pas le plus exposé à la circulation automobile. Sa situation dégagée vers le Sud lui confère une relative dispersion au quotidien.

L1-Rouen préfecture - Topo

Les pages de cette partie d'identifications visuelles seront également utilisées pour faire un topo récapitulatif par emplacement/commune. Pour le premier emplacement, la base de données Air Lichens est rappelée : couleurs, bruits de fond et valeurs significatives ou à surveiller ainsi que les unités de mesure.

Afin de ne pas surcharger le rapport inutilement, les autres emplacements ne présenteront plus que les résultats.

CONFORME	Compatible avec le bruit de fond selon la base de données Air Lichens					
DEPASSEMENT	Supérieur à la valeur significative selon la base de données Air Lichens					
A SURVEILLER						
NON CONFORME ALERTE	Alerte s'applique, en dehors des réglementations, pour les valeurs exceptionnelles suivant la base de données Air Lichens					
	µg/kg	HAP 16	INDICE HAP	B(a)P (Benzo(a)pyrène)	Dibenzo(a,h)anthracène	
3 km	L1-Rouen préfecture 2019	1189	186	101	35	
	L1-Rouen préfecture 2020	628	57	38	2,5	
Bruit de fond		< 155	< 6	< 3	< Lq	
Valeur significative		> 220	> 8	> 4	> 0	
A surveiller		750	50	30		
Valeur alerte		1500	100	60		

- Il est évident que les valeurs notables de 2019 en masse, Indice, B(a)P et Dibenzo (notamment alertes en Indice et B(a)P) ont grandement diminué.
- Cependant, malgré cette baisse importante, Indice de Toxicité Totale et Benzo(a)Pyrène restent « à surveiller ».

Périmètre 3 à 10 km

L2-Mont Saint-Aignan



Vue satellitaire vers L2-Mt St-Aignan, capture Google



Place Colbert, CC Colbert
Proche secteur universitaire
Très forestier

➤ L2-Mt-St-Aignan ne témoigne « plus que » de valeurs significatives en 2020 avec une baisse particulière en Indice, B(a)P et Dibenzo.

	µg/kg	HAP 16	INDICE HAP	B(a)P (Benzo(a)pyrène)	Dibenzo(a,h)anthracène
L2-Mont Saint-Aignan 2019		728	96	61	22
L2-Mont Saint-Aignan 2020		612	40	27	0,6

L19-Déville-lès-Rouen



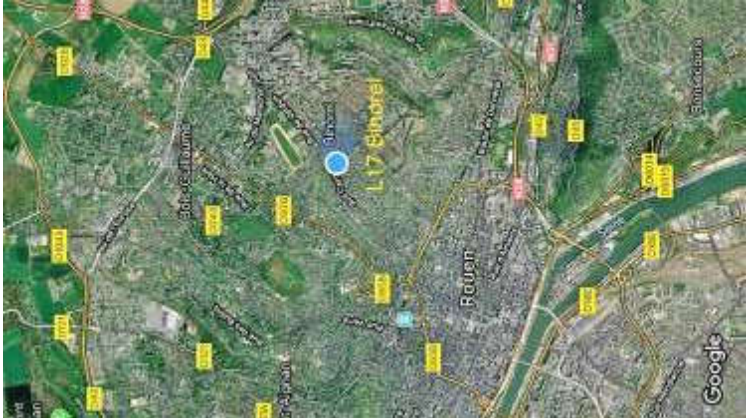
Vue satellitaire, capture Google

Vue vers la mairie – Les arbres utilisés – L’industrie de proximité

- L19-Déville-lès-Rouen présentait des taux très élevés et alertes en masse, Indice et B(a)P en 2019.
- En 2020, il a baissé mais maintient des teneurs « à surveiller » en masse et B(a)P. Il ne présente plus de Dibenzo.

µg/kg	HAP 16	INDICE HAP	B(a)P (Benzo(a)pyrène)	Dibenzo(a,h)anthracène
L19-Déville-lès-Rouen 2019	2293	229	153	14
L19-Déville-lès-Rouen 2020	869	45	30	0

L17-Bihorel



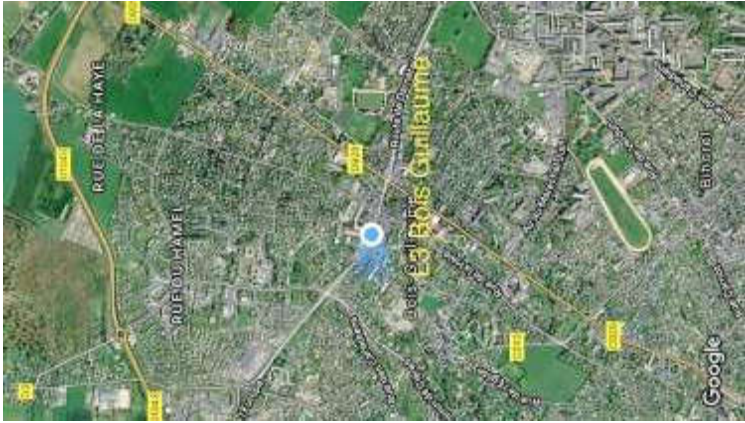
Vue satellitaire – Capture GGE

Vue en direction de la mairie. Situé sur la place du marché, il peut être influencé localement et surtout temporairement dans la journée.

- Pour L17-Bihorel aussi l'impact de 2019 était évident avec des valeurs élevées en masse, Indice et B(a)P.
- Un an plus tard, il affirme des significativités mais aucun taux n'est en alerte ni « à surveiller » et il a perdu son Dibenzo.

	µg/kg	HAP 16	INDICE HAP	B(a)P (Benzo(a)pyrène)	Dibenzo(a,h)anthracène
L17-Bihorel 2019		1606	165	97	20
L17-Bihorel 2020		417	29	20	0

L3-Bois Guillaume



Vue satellitaire vers L3-Bois Guillaume, capture Google

Vue d'ensemble à partir du prélèvement proche du centre commercial. L'influence de la circulation automobile est réelle.
Quelques-uns des supports de biocapteurs.

➤ L3-Bois Guillaume montre une évolution comparable : après de fortes valeurs en 2019, il retrouve des teneurs significantes beaucoup moins élevées.

	µg/kg	HAP 16	INDICE HAP	B(a)P (Benzo(a)pyrène)	Dibenzo(a,h)anthracène
L3-Bois Guillaume 2019		1268	105	53	18
L3-Bois Guillaume 2020		715	37	23	0,7

L21-Notre-Dame de Bondeville



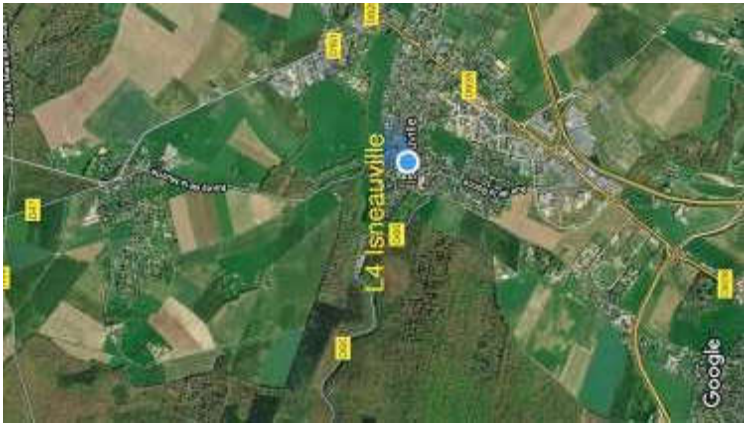
Vue satellitaire, capture Google.

La proximité de la mairie.

- L21-ND de Bondeville affirmait en 2019 des conséquences directes avec masse, Indice et B(a)P en « alerte ».
- En 2020, cette commune montre des taux « simplement » significatifs.
- Remarque : il n'a présenté du Dibenzo ni en 2019 ni en 2020.

µg/kg	HAP 16	INDICE HAP	B(a)P (Benzo(a)pyrène)	Dibenzo(a,h)anthracène
L21-ND de Bondeville 2019	2041	114	75	0
L21-ND de Bondeville 2020	577	24	15	0

L4-Isneauville



Vue satellitaire vers L4-Isneauville, capture Google.

La proximité de la mairie, son environnement et quelques supports de biocapteurs.

- Comme pour les autres emplacements du périmètre 0-10 km, L4-Isneauville montrait des taux importants en 2019. Il était « à surveiller » en masse et B(a)P et « alerte » en Indice avec B(a)P et Dibenzo forts.
- Un an après, en 2020, bien que l'évolution soit positive, il est « à surveiller » en indice avec une (petite) augmentation de son Dibenzo (donc sans lien avec l'incendie).

µg/kg	HAP 16	INDICE HAP	B(a)P (Benzo(a)pyrène)	Dibenzo(a,h)anthracène
L4-Isneauville 2019	955	106	42	21
L4-Isneauville 2020	561	60	23	28

L8-Houpeville



Vue satellitaire vers L8-Houpeville, capture Google.

Les arbres d'alignement bien exposés sont des supports de biocapteurs sur L8.

Le secteur de prélèvements est en zone de lotissement, relativement à l'écart en proximité rurale.

➤ Bien que L8-Houpeville ait lui aussi fortement diminué en masse, Indice et B(a)P, il garde la même teneur en Dibenzo(a,h)anthracène.

	µg/kg	HAP 16	INDICE HAP	B(a)P (Benzo(a)pyrène)	Dibenzo(a,h)anthracène
L8-Houpeville 2019		734	99	50	19
L8-Houpeville 2020		410	45	18	19

Périmètre 10 à 20 km

L16-Préaux



Vue satellitaire vers L16-Préaux, capture Google.

Les arbres d'alignement devant la mairie ont été utilisés.

- L16-Préaux affirmait en 2019 des teneurs très élevées, « à surveiller » en masse et « alerte » en Indice et B(a)P.
- En 2020, il a perdu ses taux « alerte » en Indice et Benzo(a)Pyrène tout en conservant une valeur « à surveiller » en masse.
- Il subit des influences urbaines.
- Il ne témoigne plus de Dibenzo.

µg/kg	HAP 16	INDICE HAP	B(a)P (Benzo(a)pyrène)	Dibenzo(a,h)anthracène
L16-Préaux 2019	1203	131	69	16
L16-Préaux 2020	777	35	23	0

L5-Quincampoix



Vue satellitaire vers L5-Quincampoix, capture Google.



Des arbres d'alignement, vue vers l'église.

- L5-Quincampoix ne faisait pas forcément partie des plus impactés par le sinistre de 2019.
- En effet, bien qu'il soit devenu plus modéré en Indice et B(a)P, il montre en 2020 une (légère) hausse en masse et dibenzo(a,h)anthracène.

µg/kg	HAP 16	INDICE HAP	B(a)P (Benzo(a)pyrène)	Dibenzo(a,h)anthracène
L5-Quincampoix 2019	637	62	29	12
L5-Quincampoix 2020	684	38	14	15

L6-Saint Georges-sur-Fontaine



Vue satellitaire vers L6-St-Georges-sur-Fontaine, capture Google.

Vue d'une partie de l'emplacement.

- En 2019, L6-St-Georges-sur-Fontaine était en alerte en Indice, « à surveiller » en masse et B(a)P.
- En 2020, il maintient un taux élevé en Indice : « à surveiller ».
- Comme pour d'autres emplacements il montre une légère hausse de son Dibenzo en 2020.

µg/kg	HAP 16	INDICE HAP	B(a)P (Benzo(a)pyrène)	Dibenzo(a,h)anthracène
L6-Saint-Georges/Fontaine 2019	971	118	59	21
L6-Saint-Georges/Fontaine 2020	614	54	21	24

L7-Bosc Guérard Saint-Adrien



Vue satellitaire vers L7-Bosc Guérard St-Adrien, capture Google.

L'emplacement de prélèvement et de ses arbres d'alignement.

La flore lichénique est relativement altérée (aucun rapport avec l'incendie).

- L7-Bosc Guérard St-Adrien indiquait que le périmètre 10-20 km présentait des valeurs élevées en masse (« à surveiller ») et « alertes » en Indice et B(a)P. Le dibenzo était remarqué.
- Un an plus tard, l'évolution est très positive avec des teneurs ayant grandement diminué à tous les niveaux.

	µg/kg	HAP 16	INDICE HAP	B(a)P (Benzo(a)pyrène)	Dibenzo(a,h)anthracène
L7-Bosc Guérard Saint-Adrien 2019		1158	151	75	29
L7-Bosc Guérard Saint-Adrien 2020		546	77	13	5

L11-Fontaine-le-Bourg



Vue satellitaire vers L11-Fontaine-le-Bourg, capture Google.

Deux vues de l'emplacement de prélèvement et de ses arbres sur l'espace sportif.

- L11-Fontaine-le-Bourg est plus mitigé que d'autres emplacements en 2020.
- En effet, bien qu'il ait diminué en masse, il reste « à surveiller » et maintient un même taux en dibenzo(a,h)anthracène.
- Cependant il confirme bien une baisse en Indice et B(a)P.

	µg/kg	HAP 16	INDICE HAP	B(a)P (Benzo(a)pyrène)	Dibenzo(a,h)anthracène
L11-Fontaine-le-Bourg 2019		969	63	28	13
L11-Fontaine-le-Bourg 2020		866	29	10	13

L10-Saint Germain-sous-Cailly



Vue satellitaire vers L10-St-Germain-sous-Cailly, capture Google.

La mairie surplombe le site de prélèvement Il s'agit d'un emplacement totalement rural
En raison du faible nombre d'arbres, le prélèvement a été assuré sur broussailles.

- L10-St-Germain-sous-Cailly aussi appartient aux emplacements un peu plus mitigés car bien qu'il ait effectivement déchu de ses taux « à surveiller » en masse et « alertes » en Indice et B(a)P,
- il reste « à surveiller » sur ces derniers et a augmenté en dibenzo(a,h)anthracène, ce qui permet d'affirmer des influences en partie différentes de celles du sinistre de 2019.

	µg/kg	HAP 16	INDICE HAP	B(a)P (Benzo(a)pyrène)	Dibenzo(a,h)anthracène
L10-St-Germain-sous-Cailly 2019		902	145	79	29
L10-St-Germain-sous-Cailly 2020		538	83	33	39

Périmètre 20 à 30 km

L9-Claville Motteville



Vue satellitaire vers L9-Claville Motteville, capture Google.

Vue à partir de l'emplacement de prélèvement en lisière de parc près de l'église et du cimetière.

A part quelques paysages de riverains et de tracteurs, l'emplacement est calme.

- Dans le périmètre de 20 à 30 km, L9-Claville Motteville est un exemple à part.
- En effet, il offre le contre-pied des autres emplacements avec des taux « à surveiller » en masse, « alertes » en Indice et B(a)P non pas en 2019 mais en 2020. Il a d'ailleurs été contrôlé avec un nouveau prélèvement en février 2021 qui a confirmé les valeurs du premier prélèvement (de décembre 2020).
- Ainsi, L9-Claville Motteville montre des augmentations en masse, Indice, B(a)P et Dibenzo. Il est évident que ce n'est plus du fait du sinistre de 2019 et que des origines complémentaires sont présentes dans le secteur.

	µg/kg	HAP 16	INDICE HAP	B(a)P (Benzo(a)pyrène)	Dibenzo(a,h)anthracène
L9-Claville Motteville 2019		511	67	37	10
L9-Claville Motteville 2020		854	129	65	38

L12-Bosc Béranger



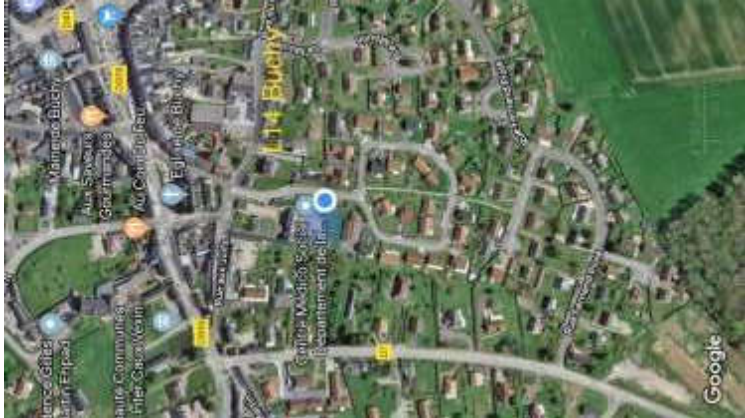
Vue satellitaire vers L12-Bosc Béranger, capture Google.

Le parc près de la mairie est vaste et comporte suffisamment de supports de biocapteurs
L'environnement est agricole.

- En 2019, L12-Bosc Béranger affirmait des valeurs « à surveiller » en masse, indice et B(a)P.
- En 2020, il maintient un taux « à surveiller » en Indice malgré une petite baisse. Il décroît plus amplement en masse et benzo(a)pyrène mais, similairement à d'autres emplacements, il montre une hausse du dibenzo(a,h)anthracène.

	µg/kg	HAP 16	INDICE HAP	B(a)P (Benzo(a)pyrène)	Dibenzo(a,h)anthracène
L12-Bosc Béranger 2019		861	63	32	8
L12-Bosc Béranger 2020		650	52	17	27

L14-Buchy



Vue satellitaire vers L14-Buchy, capture Google.

L'espace de prélèvement est éloigné de la mairie et reste au cœur de la ville.

- L14-Buchy appartient aux emplacements en évolution strictement positive avec une décroissance généralisée en masse, Indice, B(a)P et Dibenzo.
- Il ne signale plus de résultats « à surveiller » et présente les valeurs les plus faibles de 2020 en Indice et benzo(a)pyrène.

	µg/kg	HAP 16	INDICE HAP	B(a)P (Benzo(a)pyrène)	Dibenzo(a,h)anthracène
L14-Buchy 2019		926	81	28	8
L14-Buchy 2020		464	17	10	0

Périmètre 30 à 40 km

L13-Saint Saëns



Vue satellitaire vers L13-St-Saëns, capture Google.

L'espace de prélèvement est réalisé le long de la mairie mais pas sur la place, trop exposée aux voitures.

Les arbres la bordant n'ont d'ailleurs pas de lichens.

- Dans le périmètre de 30 à 40 km, L13-St-Saëns est pourtant à rapprocher de L9-Claville Motteville car son évolution est plutôt négative.
- En effet, bien qu'il perde sa « faible » valeur en Dibenzo, il augmente en masse, Indice et B(a)P pour lesquels il affirme en 2020 des taux « à surveiller » alors qu'il était tout juste « à surveiller » en Indice seulement en 2019.

	µg/kg	HAP 16	INDICE HAP	B(a)P (Benzo(a)pyrène)	Dibenzo(a,h)anthracène
L13-Saint-Saëns 2019		714	50	26	8
L13-Saint-Saëns 2020		962	62	40	0

L18-Bosc Bordel



Vue satellitaire vers L18-Bosc Bordel, capture Google.

L'espace de prélèvement est réalisé le long de la mairie.
Les arbres d'alignement route de La Houssaye sont utilisés.

- Comme pour L14-Buchy, L18-Bosc Bordel appartient aux emplacements en évolution strictement positive avec une baisse drastique en masse, Indice, B(a)P et Dibenzo.
- Ainsi, il ne signale plus ses valeurs « alertes » et appartient aux emplacements les plus faibles en 2020.

	µg/kg	HAP 16	INDICE HAP	B(a)P (Benzo(a)pyrène)	Dibenzo(a,h)anthracène
L18-Bosc Bordel 2019		3065	280	160	25
L18-Bosc Bordel 2020		506	24	15	0

L20-Mauquenchy



Vue satellitaire vers L20-Mauquenchy, capture Google.

L'espace de prélèvement est réalisé à proximité de la mairie. Aucune influence n'est notable dans son environnement.

- Parallèlement à L14-Buchy ou L18-Bosc Bordel, L20-Mauquenchy montre une décroissance importante de ses valeurs de 2019.
- En 2020, les « à surveiller » en masse, Indice et B(a)P ne sont plus constatés et il fait partie des 5 emplacements les plus faibles.
- L21-ND de Bondeville et L20-Mauquenchy sont les seuls à n'avoir montré du Dibenzo ni en 2019 ni en 2020.

	µg/kg	HAP 16	INDICE HAP	B(a)P (Benzo(a)pyrène)	Dibenzo(a,h)anthracène
L20-Mauquenchy 2019		1275	66	49	0
L20-Mauquenchy 2020		325	21	14	0

L22-Roncherolles-en-Bray



Vue satellitaire vers L22-Roncherolles-en-Bray, capture Google.

L'espace de prélèvement est réalisé à proximité immédiate de la mairie.

Peu d'arbres acceptent le prélèvement.

- Alors que L22-Roncherolles-en-Bray offrait des taux très élevés en 2019, anormaux pour sa localisation, il est dans la lignée de Buchy (L14), Bosc-Bordel (L18), Mauquenchy (L20) en 2020.
- Ainsi, les taux « alertes » en masse, Indice et HAP ont radicalement décru et ne sont « plus que » significatifs. Il a aussi perdu son taux en Dibenzo et présente une masse modérée.

µg/kg	HAP 16	INDICE HAP	B(a)P (Benzo(a)pyrène)	Dibenzo(a,h)anthracène
L22-Roncherolles-en-Bray 2019	1840	175	99	20
L22-Roncherolles-en-Bray 2020	394	32	22	0

Périmètre > à 40 km

L15-Forges-les-Eaux



Vue satellitaire vers L15-Forges-les-Eaux, capture Google.

L'espace de prélèvement est réalisé place de la mairie.

Ce n'est pas le point le plus révélateur car il est soumis aux déplacements. Les autres endroits à l'extérieur de la ville ne répondaient pas aux critères généraux de prélèvement.

- Au-delà de 40 km du sinistre, L15-Forges-les-Eaux aussi montrait une influence de celui-ci avec des teneurs « à surveiller » en masse, « alertes » en Indice et B(a)P.
- Un an plus tard, les taux sont significatifs sans excès mais encore assez loin de bruits de fond. Le dibenzo(a,h)anthracène de 2019 a disparu.

	µg/kg	HAP 16	INDICE HAP	B(a)P (Benzo(a)pyrène)	Dibenzo(a,h)anthracène
L15-Forges-les-Eaux 2019		1230	128	68	15
L15-Forges-les-Eaux 2020		684	28	17	0

L23-Serqueux



Vue satellitaire vers L23-Serqueux, capture Google.

Entre la mairie et la gare, la placette est exposée aux déplacements et était utilisée pour diverses activités. En 2020, pour des raisons de constructions immobilières en cours, le prélèvement a été déplacé de 200m.

- Au-delà de 40 km du sinistre, L23-Serqueux montrait des résultats extrêmes, avec des taux alertes en masse, Indice et B(a)P, il présentait aussi un peu de Dibenzo.
- En 2020, l'ensemble s'est normalisé bien qu'il reste « à surveiller » en B(a)P. Il n'a plus de Dibenzo(a,h)anthracène.

	µg/kg	HAP 16	INDICE HAP	B(a)P (Benzo(a)pyrène)	Dibenzo(a,h)anthracène
L23-Serqueux 2019		3126	219	138	8
L23-Serqueux 2020		670	44	30	0

Emplacements complémentaires de 2020

L24-Saint-Martin de Boscherville



Vue satellitaire vers L24-St-Martin de Boscherville, capture GGE.

Vue de l'église et des emplacements de biocapteurs.

- Appartenant aux emplacements complémentaires de la surveillance de 2020, L24-St-Martin de Boscherville montre un Indice en alerte, une masse et un B(a)P « à surveiller » tout en présentant une valeur en Dibenzo.
- Ainsi, alors que tous les emplacements de 2019 ont diminué pour ne plus présenter aucun taux alerte en 2020 (sauf la particularité de L9-Claville Motteville qui a augmenté), L24 au contraire montre des valeurs élevées. Ces teneurs sont probablement industrielles car la circulation automobile est banale.

µg/kg	HAP 16	INDICE HAP	B(a)P (Benzo(a)pyrène)	Dibenzo(a,h)anthracène
L24-Saint-Martin de Boscherville	879	102	54	20

L25-Petit Couronne



Vue satellitaire vers L25-Petit Couronne, capture GGE.

La placette est située au cœur de la ville.

- L25-Petit Couronne présente lui aussi des teneurs fortes, « à surveiller » en masse et en Indice, « alerte » en benzo(a)pyrène. C'est le seul des emplacements supplémentaires à ne pas présenter de dibenzo(a,h)anthracène.
- Sa situation sous influence de la zone industrielle et portuaire est probablement en relation intime avec les résultats.

µg/kg	HAP 16	INDICE HAP	B(a)P (Benzo(a)pyrène)	Dibenzo(a,h)anthracène
L25-Petit Couronne	1091	94	64	0

L26-Saint-Etienne-du-Rouvray



Vue satellitaire vers L26-St-Etienne-du-Rouvray (on y remarque que L25-Petit Couronne est relativement proche, sur la partie Ouest), capture GGE.

Vue des biocapteurs (ci-dessous)



- L26-St-Etienne-du-Rouvray est le plus élevé des emplacements complémentaires mais aussi de toute l'étude de 2020.
- Il présente des taux alertes en masse, Indice, benzo(a)pyrène et une teneur en dibenzo(a,h)anthracène.
- Ce sont des valeurs très élevées qui mériteraient d'être suivies et investiguées.

µg/kg	HAP 16	INDICE HAP	B(a)P (Benzo(a)pyrène)	Dibenzo(a,h)anthracène
L26-Saint-Etienne du Rouvray	2049	173	109	19

L27-La Neuville Chant d'Oisel



Vue satellitaire vers L27-La Neuville Chant d'Oisel, capture GGE.

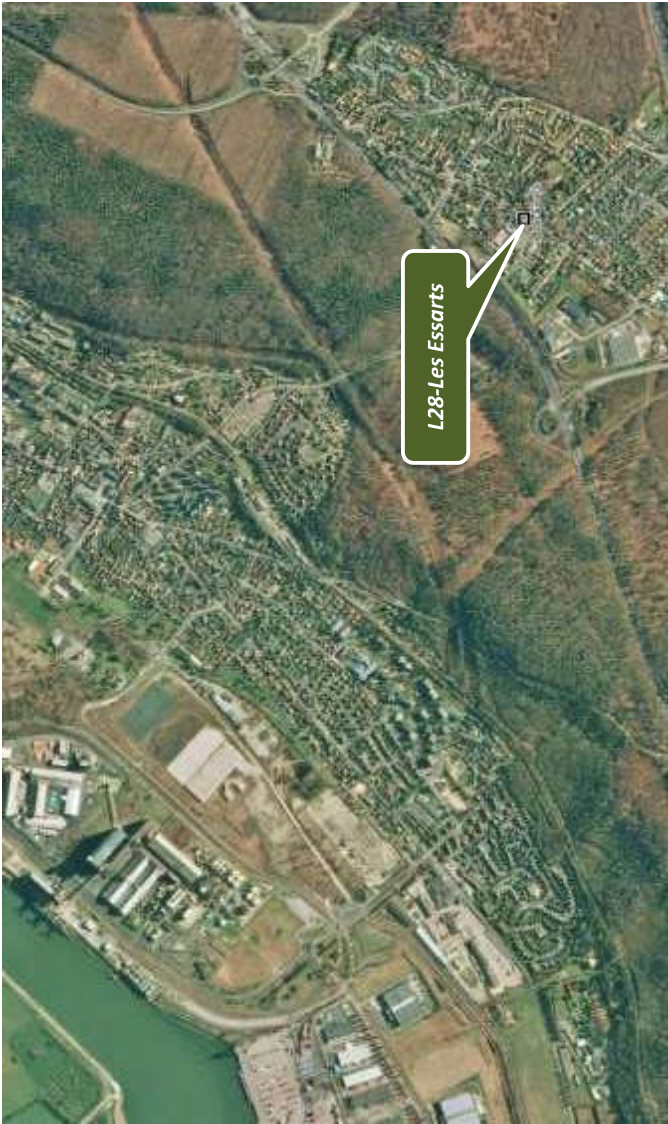
Vue de l'emplacement (ci-dessous)



- L27-La Neuville Chant d'Oisel, sans surprise au vu de sa localisation, ne présente que des valeurs significatives modérées.
- Cependant, il peut être surprenant de ne pas y retrouver de teneurs de base et le dibenzo offre une petite valeur.

µg/kg	HAP 16	INDICE HAP	B(a)P (Benzo(a)pyrène)	Dibenzo(a,h)anthracène
L27-La Neuville Chant d'Oisel	437	25	12	5

L28-Les Essarts



Vue satellitaire vers L28-Les Essarts, capture GGE.

Vue des arbres utilisés, proches de l’église (ci-dessous)



- L28-Les Essarts confirme que les nouveaux emplacements sont forts en HAP divers avec des taux à surveiller en masse, en Indice et en B(a)P, un peu de Dibenzo est également retrouvé. Il est aussi sous influence industrielle et portuaire.

µg/kg	HAP 16	INDICE HAP	B(a)P (Benzo(a)pyrène)	Dibenzo(a,h)anthracène
L28-Les Essarts	927	66	36	8

L29-Saint-Ouen du Tilleul



Vue satellitaire vers L29-St-Ouen du Tilleul, capture GGE.



Arbres et placette utilisés pour le prélèvement (ci-dessus)

➤ L29-St-Ouen du Tilleul est très similaire à L28-Les Essarts dans ces valeurs, il possède donc des taux forts et « à surveiller » dont du Dibenzo.

µg/kg	HAP 16	INDICE HAP	B(a)P (Benzo(a)pyrène)	Dibenzo(a,h)anthracène
L29-Saint-Ouen du Tilleul	1020	68	36	8

SAVOIR-FAIRE PRELEVEMENTS

PROTOCOLE OPERATOIRE LICHENS

Aucune autre procédure, dans les lichens, ne peut garantir la qualité des résultats. Les interprétations des données sont issues de la recherche effectuée par Air Lichens. Toute autre référence d'interprétation des données serait invalide. La norme de prélèvement dans les lichens NF X 43-904 n'est pas une norme d'interprétation. Les procédés d'Air Lichens sont plus précis et reproductibles. Ils appartiennent au savoir-faire de la société.

- ▶ L'espèce de lichen adéquate est standardisée pour l'ensemble des points de collecte.
- ▶ Le choix des emplacements et des espèces, la quantité de matériel (10g de poids sec) et sa qualité sont importants.
- ▶ La surface de prélèvement correspond à une surface représentative de l'exposition d'un site. Il ne s'agit pas de prélever sur un seul arbre.

Dans le respect de l'environnement et de la durabilité, la quantité de matériel prélevé est gérée pour ne pas dépeupler un site.

- ▶ Le matériel de prélèvement est médical, à usage unique, et les lichens sont prélevés avec des gants de protection afin d'éviter toute contamination externe.
- ▶ Un masque de protection est préférable près de la voie publique (pollutions routières, notamment les HAP : Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques).
- ▶ La collecte est longue et des précautions sont prises pour éviter les contaminations et assurer le transport, sans altération. Une mauvaise conservation peut nuire à la qualité des échantillons.

Recueil :

La pratique du prélèvement n'est possible qu'après une formation de terrain validée et recourt à des compétences lichénologiques. Les flacons sont différents selon les molécules à mesurer conjointement.

Pour éviter toute contamination, il est impossible de confier cette tâche à un opérateur fumeur car la simple respiration dégage des métaux lourds et éventuellement des PCDD/F.

Préparation :

 **Séchage** en conditions définies et à une température optimale évitant les évaporations de polluants. S'en dispenser conduirait à une perte de sensibilité de la méthode (jusqu'à plus de 30% selon les travaux de recherche Air Lichens). La température et les conditions de séchage (la température n'est pas le seul critère) sont très strictes pour une préparation optimale.

 **Nettoyage** sous loupe binoculaire à lumière froide par des personnels qualifiés et expérimentés.

 Le poids de la matière sèche ne doit pas être faussé car il est la base des calculs de résultats.

LA SOCIETE AAIR LICHENS

AAIR LICHENS – SARL à capital variable de 7622 € minimum – 17 rue des Chevrettes – 44470 CARQUEFOU
SIRET 429 598 485 00010 – APE 7120 B – RCS Nantes 429 598 485 - ☎ 02 40 30 14 90 – 📠 02 40 30 14 60

La société Aair Lichens a été créée en 2000 (29.02.2000) dans le cadre de la loi sur l'innovation et la recherche du 15 juillet 1999, par le Dr Philippe Giraudeau, Chercheur diplômé de l'Université de Nantes et le Docteur Richard Lallemant, alors Enseignant Chercheur dans cette Université,
Le Dr Richard Lallemant en est le conseiller scientifique.

Après 11 ans de versement d'un montant d'1% du chiffre d'affaires d'Aair Lichens pour l'Université au titre de l'innovation, le contrat a été transformé en convention de Mécénat avec la **Fondation de projets**⁵ de l'Université de Nantes.

Mécénat de recherche médicale

La société AAIR LICHENS vous remercie de votre confiance et vous entraîne dans sa démarche de contribution à la Recherche médicale :

INTEGRATION DE VOTRE INTERET POUR L'ENVIRONNEMENT DANS UNE DEMARCHE AXEE SUR UN ELARGISSEMENT A LA RECHERCHE MEDICALE

« Donner à l'université n'est pas un geste de générosité anodin, c'est une prise de position fondamentale et audacieuse, c'est montrer ses convictions pour l'universalisme et sa confiance dans l'humanité ».

Catherine de Charette-Buton / Directrice de la Fondation de l'Université de Nantes (F.U.N) – Plaquette 2016

Dr Philippe Giraudeau, Gérant de la société Aair Lichens, plaquette de la F.U.N 2016 :

“Dès sa création en 2000, Aair Lichens a été partenaire de l'Université de Nantes. (...)

Notre expertise est centrée sur la surveillance environnementale de la qualité de l'air. Travaillant pour la connaissance de l'environnement, notre ambition est de servir la santé humaine, de contribuer à la connaissance et au traitement dans ce domaine. Cette démarche n'a pas de vocation commerciale mais il s'agit d'un échange pour faire de la science, un bien commun. Nos valeurs philanthropiques sont ainsi totalement affirmées. Pour l'entreprise, il s'agit d'une forme de partage scientifique et le mécénat constitue l'aboutissement d'une volonté forte de notre part.”

Le 14 novembre 2017, fier d'un mécénat durable, utile et prometteur, en faisant partie des invités d'honneur, le Dr Philippe Giraudeau participe à la table ronde de la Fondation de l'Université de Nantes ayant pour thème : Transmission & Bien Commun : la philanthropie, un lien entre l'entreprise et la cité.

<https://www.youtube.com/watch?v=8XwuN98SiME&feature=youtu.be>

⁵ La fondation de projets a pour objet la mise en œuvre de toutes actions d'intérêt général au sens de l'article 238bis du CGI concourant au renforcement de la visibilité des moyens et équipements des composantes et laboratoires. La fondation de projets a également pour objet de contribuer au financement, au soutien ou à la promotion de la vie sociale, sportive et culturelle de l'Université de Nantes. C'est un outil de développement des missions de formation, de recherche et d'insertion professionnelle.

Lorsque vous confiez un travail à la société Air Lichens,

Vous participez à une recherche en cancérologie.



Aair Lichens apporte son soutien au lancement du :

« Projet de recherche finalisée dans le domaine du bio-médicament »

Etant entendu que ce projet a pour but de démontrer la faisabilité d'un nouveau traitement contre le neuroblastome, cancer de la petite enfance classé « maladie rare » mais pourtant première cause de décès par cancer de l'enfant et du jeune adolescent, soit un décès sur six cas. *Cette maladie orpheline se développe à partir du système nerveux sympathique et se présente fréquemment sous forme de métastases disséminées au moment du diagnostic. Le neuroblastome avancé fait alors preuve d'une grande résistance au traitement aujourd'hui disponible malgré une « thérapeutique agressive »⁶.*

Les fonds collectés par la Fondation de projets de l'Université de Nantes permettent d'étudier un biomédicament innovant en tant que traitement prototype par anticorps (immunothérapie) c'est-à-dire un médicament « capable de s'attaquer aux cellules de neuroblastome »⁷. En 2016, l'équipe de recherche a identifié les glioblastomes ou cancers du cerveau comme nouveau terrain pour l'anticorps prototype. A l'heure actuelle, le neuroblastome résiste aux cellules immunitaires protectrices en les supprimant, la recherche continue donc sur l'immunothérapie T-CAR (utilisation des propres cellules -lymphocytes- du patient). En 2017, « une nouvelle propriété de l'anticorps qui permet de l'envisager comme traitement adjuvant de la chimiothérapie afin d'augmenter l'efficacité du traitement tout en diminuant ses effets secondaires » a été mise en évidence.

Chaque année, dans la « newsletter » et plaquette de la Fondation de Projets de l'Université de Nantes, la société Aair Lichens est ainsi remerciée et citée en tant que mécène actif, régulièrement logo à l'appui⁸, permettant la réalisation de ce projet.

Adresse à laquelle les sponsors de la Fondation de l'Université de Nantes sont répertoriés :

<http://www.fondation.univ-nantes.fr/>

⁶ Newsletter n°1, octobre 2013, Fondation de Projets de l'Université de Nantes, p.3.

⁷ Bilan 2016 Biothérapies Neuroblastome, Centre de Recherche en Cancérologie et Immunologie de Nantes-Angers (CRCINA), Inserm U132 et Université de Nantes.

⁸ Newsletter n°1, octobre 2013, Fondation de Projets de l'Université de Nantes, p.8. Newsletter n°2, Novembre 2014, p.8 et plaquette de la fondation de projets de l'Université de Nantes : *Le mécénat au service de l'Université*, p.3. ; Plaquette de la Fondation de l'Université de Nantes, p.9 - 2016 ; Rapport d'activités 2017 de la Fondation de l'Université de Nantes, p.2.



*Le Dr Giraudeau est expert certifié à l'expertise, l'arbitrage, la médiation et la conciliation :
N°3111 Institut de l'Expertise – Paris 2008*



DECISION D'AGREMENT

Le Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche a accordé l'agrément, prévu au Ild bis de l'article 244 quater B du code général des impôts pour les organismes de recherche privés, à :

AAIR LICHENS

(Siren 429598485)

Agrément au titre des années : 2012, 2013, 2014, 2015, 2016, 2017

Renouvellement pour les années 2018 à 2020



GLOSSAIRE

Acidocline :	<i>Dont le pH est acide.</i>
Apothécies :	<i>Fructifications en forme de coupe, variables en taille, couleur et localisation selon les espèces.</i>
Autotrophe :	<i>Qui suffit à sa propre subsistance.</i>
Basicline :	<i>Dont le pH est basique.</i>
Biocapteur :	<i>Organisme vivant qui capte les modifications de la qualité de l'air physiquement ou chimiquement.</i>
Bioindication :	<i>Evaluation de la qualité des milieux à l'aide de matériaux vivants connus pour leurs capacités de sentinelles des milieux.</i>
Biosurveillance :	<i>Utilisation du vivant pour surveiller des modifications ou la stabilité de la qualité du milieu.</i>
Bryophytes :	<i>Les mousses sont des bryophytes.</i>
Communauté lichénique :	<i>Ensemble des espèces de lichens qui se développent et se perpétuent naturellement conjointement dans les mêmes sites et les mêmes conditions.</i>
Corticole :	<i>Etymologiquement ce terme signifie : qui pousse sur un cortex ou une écorce. Employé dans le cas des lichens, il s'agit de ceux qui poussent naturellement sur l'écorce des arbres.</i>
Cuticule :	<i>Pellicule imperméable protectrice présente à la surface des végétaux supérieurs.</i>
Désorption ou exsorption :	<i>Fuite naturelle du contenu en polluants.</i>
Diffusivité :	<i>C'est un coefficient représentant la diffusion des molécules.</i>
Electrolytes :	<i>L'ensemble des éléments minéraux intervenant dans l'équilibre vital des individus ; exemples : le sodium, le potassium.</i>
Epiphyte :	<i>Espèce qui pousse sur un support végétal.</i>
Eutrophisé :	<i>Qui subit un apport de composés nutritifs important. Les pollutions azotées provoquent une eutrophisation. Des arbres possèdent naturellement une écorce eutrophisée, ce qui leur confère un pH basique, qui intervient dans l'installation préférentielle de certains lichens. Entre écorces eutrophisées ou non-eutrophisées, la flore lichénique peut être différente et les deux cas peuvent se rencontrer sur les mêmes sites.</i>
Exposition :	<i>C'est une grandeur à visée sanitaire qui prend en compte à la fois des concentrations mesurées (ou à défaut évaluées) et leurs durées dans le temps.</i>
Foliacés :	<i>Les lichens foliacés forment un thalle de pseudo-feuilles en forme de lobes.</i>
Fruticuleux :	<i>Les lichens fruticuleux forment un thalle en tiges ou lanières ramifiées ou non.</i>
Fumigation :	<i>Test consistant à exposer les lichens à des quantités connues de polluants choisis et à mesurer leurs conséquences sur les capacités de survie ou d'absorption des polluants.</i>
GGE :	<i>Google Earth</i>
Hétérotrophe :	<i>Qui n'est pas capable de produire tous les éléments nécessaires à la survie et nécessite des fournisseurs.</i>
IGQA :	<i>Indice Global de la Qualité de l'Air, nom de la technique lichénologique utilisée.</i>

INPI :	<i>Institut National de la Propriété Industrielle.</i>
Mycosymbiote ou mycobiont :	<i>Le partenaire mycosymbiote d'une association lichénique est celui qui héberge le photosymbiote. Il s'agit le plus souvent d'un champignon appartenant à l'ordre des ascomycètes.</i>
Nécrose :	<i>Dégénérescence due à une atteinte vitale.</i>
Nitrophile :	<i>Qui profite de l'azote en excès (ammoniac ou oxydes d'azote) pour se développer.</i>
Nitrophobe :	<i>Qui ne supporte pas l'azote en excès.</i>
Photosymbiote ou photobiont :	<i>Le partenaire photosymbiote d'une association lichénique est celui qui assure la photosynthèse. Selon les espèces concernées, il peut s'agit d'une algue, d'une cyanobactérie ou des deux. Il est aussi appelé phycosymbiote.</i>
Poléophile :	<i>Du Grec philos (aimer) et poleos (pollution), se dit d'une espèce qui profite de la pollution pour se développer.</i>
Poléophobe :	<i>Du Grec phobos (détester) et poleos (pollution), se dit d'une espèce qui ne supporte pas la pollution.</i>
Poléotolérance :	<i>Qui tolère la pollution sans disparaître ni se développer de façon accrue.</i>
Rhizine :	<i>Système d'attache des lichens foliacés, ensemble de pieds très courts répartis sur la face inférieure du lichen.</i>
Saxicole :	<i>Un lichen saxicole pousse sur un support minéral, roche ou béton.</i>
SIG :	<i>Système d'Information Géographique (cartes numériques de modélisation).</i>
Soralie :	<i>Amas farineux ou granuleux, le plus souvent de couleur différente de celle du thalle.</i>
Sorédie :	<i>Élément de base de la soralie, qui est constitué d'un ensemble de sorédies.</i>
Stomates :	<i>Pores des végétaux supérieurs capables de s'obturer en cas de stress, le plus souvent hydrique.</i>
Thalle :	<i>Ensemble de l'appareil végétatif du lichen, sans tiges, feuilles ni racines.</i>
Valeur écologique :	<i>Conception à rapprocher de la poléophilie ou de la poléophobie. Les espèces poléophiles ont une basse valeur écologique.</i>
V.S. :	<i>Valeur significative (par rapport aux teneurs de base – Sans signification sanitaire)</i>

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Ces références ne sont pas exhaustives mais présentent un état des lieux de la bibliographie utilisée par Air Lichens.
Une liste de sources encore plus complète peut être fournie sur demande.

Livres

AMIARD (Jean-Claude), 2011 – *Les risques chimiques environnementaux, méthodes d'évaluation et impacts sur les organismes*, Tec & Doc, 782 p.

ANDRE p., DELISLE C. E., REVERET J.-P., 2010 – *L'évaluation des impacts sur l'environnement*, 3^{ème} édition, Processus acteurs et pratique pour un développement durable, Presses Internationales Polytechniques, avec CD-ROM, Canada, 348p.

BIOCCHI (S.), BOULINGUEZ (M.), DIARD (K.), 2009 – *Les polluants et les techniques d'épuration des fumées, Cas des unités de traitement et de valorisation des déchets*, 2^{ème} édition, Etat de l'Art, Editions TEC&DOC, Record, Lavoisier, Lassay-les-Châteaux, 387p.

BOAMPONSEM L. K., 2016 – *Biomonitoring of Elemental Atmospheric Deposition with the Lichen, Parmotrema reticulatum, in the Greater Auckland Region of New Zealand*, Thèse, The University of Auckland, 358p.

CONTI (M.E), 2008- *Biological Monitoring: Theory and Applications: Bioindicators and Biomarkers for Environmental Quality and Human Exposure Assessment (The Sustainable World)*, WIT Press, 256p.

DOBSON (Frank S.), 2011 – *Lichens: An Illustrated Guide to the British and Irish Species*, Richmond Publishing, Cornwall, England, 496p.

FRAHM J.P., SCHUMM F., STAPPER N.J., 2010 - *Epiphytische Flechten als Umweltgütezeiger*, Books on demand GmbH, Norderstedt, 164p.

GIRAudeau P., 2016 – Participation au chapitre 20 « Réseaux de surveillance des PCB dans l'environnement » : 3, 3.1, 3.2 et 3.3 : La surveillance de la qualité de l'atmosphère à l'aide des lichens, bioconcentration des PCB par les lichens, comparaison des concentrations des PCB dans les lichens et dans les herbes, validation de l'utilisation des lichens pour la surveillance de la qualité de l'atmosphère, in *PCB, Environnement et Santé*, pp.658-664, Amiard J.-C., Meunier T., Babut M., Lavoisier, Tec & Doc, Chimie, Paris, 737p.

GIRAudeau P., LALLEMANT R., 2015 – « Les lichens, outils dynamiques de la surveillance des PCB dans l'atmosphère », *Pollution Atmosphérique* n°226, juin-septembre, Actes du Workshop International de Lille 13-14 octobre 2014.

GIRAudeau P., LALLEMANT R., 2002 – *ACI VILLE : Modalités matérielles et techniques du renouvellement Urbain : Caractérisation des états physiques liés au vieillissement et à la dégradation des faces et surfaces urbaines : L'apport de la Lichénologie*, CNRS Laboratoire CERMA UMR 1563, Université de Nantes, Faculté des Sciences et des techniques, 90 p.

GIRAudeau P., 2001 — *Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques, Bioaccumulation Lichénique, Agglomération Nantaise*, Air Lichens rapport A2-5, DDASS de Loire-Atlantique, Service Santé Environnement : 65 p. – Non Publié

GIRAudeau P., 2000 – « Une technologie innovante au service de l'entreprise et de l'environnement : l'IGQA » – *FLASH-INFO*, Région des Pays de la Loire, L'information scientifique et technique, Environnement : De la dépollution à l'éco-conception, (44) 09/2000.

GIRAudeau P., 2000 – *Emanations atmosphériques côtières consécutives à la libération d'hydrocarbures dans le milieu marin – Affaire ERIKA – Etudes lichéniques ; Deuxième phase et synthèse* – DDASS de la Loire-Atlantique – Service Santé-Environnement, 46 p. – Non publié.

GIRAudeau P., 1998. - *Etude de l'impact des émissions atmosphériques de la centrale de Cordemais, cartographie des retombées acides*, Contrat EDF, non disponible : 17 p.

GIRAudeau P., LALLEMANT R., 1997. - *Etude de l'impact des émissions ammoniacales agricoles sur la qualité atmosphérique*, Nantes ; DDASS : 27 p.

GIRAudeau P., 1997. - *La flore lichénique appliquée à l'étude de la pollution atmosphérique azotée liée à l'élevage bovin dans le Nord de la Loire-Atlantique*. Lab. Biol. Vég. et Biotech. Université de Nantes : 26 p.

GOLLY (Benjamin), 2014 – *Etude des sources et de la dynamique atmosphérique de polluants organiques particuliers en vallées alpines : apport de nouveaux traceurs organiques aux modèles récepteurs*. Thèse sous la direction de Jean-Luc Besombes, Université de Grenoble.

KUMAR UPRETI D. & C° - 2015 – *Recent Advances in Lichenology* – Modern Methods and Approaches in Biomonitoring and Bioprospection, Springer India, New Delhi, Volume 1, 265 p.

KUMAR UPRETI D. & C° - 2015 – *Recent Advances in Lichenology* – Modern Methods and Approaches in Lichen Systematics and Culture Techniques, Springer India, New Delhi, Volume 2, 232 p.

LAVE (Lester B.), Seskin (Eugène P.), 2011 – *Air Pollution and Human Health*, collection Poli, RFF Press, 368p.

MCMULLIN T., ANDERSON F., 2015 – *Common lichens of Northeastern North America: A Field Guide (Memoirs of the New York Botanical Garden Volume 112)*, New NYBG Press Book, 192p.

ROUX C. & C°, 2014 – *Catalogue des lichens et champignons lichénicoles de France métropolitaine*, éd. Editions d'Art Henry des Abbayes, Publication de l'Association française de lichénologie, 1525p.

SCHUMM F., ELIX J.A., 2014 – *Images from Lichenes Australasici Exsiccati and if other characteristic, Australasian Lichens, Volume I*, Felix Schumm, Herstellung und Verlag: Books on Demand GmbH, Norderstedt, 665p.

SCHUMM F., ELIX J.A., 2014 – *Images from Lichenes Australasici Exsiccati and if other characteristic, Australasian Lichens, Volume II*, Felix Schumm, Herstellung und Verlag: Books on Demand GmbH, Norderstedt, 1327p.

SHUKLA V. & C°, 2014 – *Lichens to Biomonitor the Environment*, Springer, 185p.

SLAMA R., 2017 – *Le mal du dehors, L'influence de l'environnement sur la santé*, Quae, 376p.

STENROOS S., VELMALA S., PYKALA J., AHTI T., 2016 – *Lichens of Finland, Finnish Museum of Natural History*, Norrlinia 30, 896p.

UPRETI & C°, 2015 – *Recent Advances in Lichenology*, Modern Methods and Approaches in Lichen Systematics and Culture Techniques, éd. Springer, 2 Volumes.

WILLEM J.-P., 2017 – *Pollutions et santé, Faire face à toutes les pollutions et les enrayer*, Dangles Editions, Collection référence, Piktos, 432p.

Articles

ABOAL J.R., A. PÉREZ-LLAMAZARES, A. CARBALLEIRA, S.GIORDANO, J.A. FERNÁNDEZ, 2011 – Should moss samples used as biomonitors of atmospheric contamination be washed ?, *Atmospheric Environment* 45, pp.6837-6840.

BLANCHON D. J., 2013 – "Auckland lichens", *Auckland Botanical Society* 68 pp.21-27.

BOAMPONSEM L. K., FREITAS (de) C. R., WILLIAMAS D., 2017 – "Source apportionment of air pollutants in the Greater Auckland Region of New Zealand using receptor models and elemental levels in the lichen, *Parmotrema reticulatum*", *Atmospheric Pollution Research*, pp.101-113.

GIRAudeau P., LALLEMANT R., 2015 – « Les lichens, outils dynamiques de la surveillance des PCB dans l'atmosphère », *Pollution Atmosphérique* n°226, juin-septembre, Actes du Workshop International de Lille 13-14 octobre 2014.

GIRAudeau P., 2000 – « Une technologie innovante au service de l'entreprise et de l'environnement : l'IGQA » – *FLASH-INFO*, Région des Pays de la Loire, L'information scientifique et technique, Environnement : De la dépollution à l'éco-conception, (44) 09/2000.

GIRAudeau P., CLERIVET M., FICHE C., 1997. – « La pollution en Loire-Atlantique ; synthèse de travaux récents », *Bull. Soc. Sc. Nat. Ouest de la France*, nouvelle série, tome 19, (4), pp.157-172.

JOHANSSON (Otilia), PALMQVIST (Kristin), OLOFSSON (Johan), 2012 – "Nitrogen deposition drives lichen community changes through differential species responses", *Global Change Biology*, 18, pp.2626-2635.

KULARATNE K. I. A., FREITAS (de) C. R., 2013 – "Epiphytic lichens as biomonitors of airborne heavy metal pollution", *Environmental and Experimental Botany* 88 pp.24-32.

KUMAR Upreti Dalip, DIVAKAR Pradeep K., SHUKLA Vertika, BAJPAI Rajesh, 2015 – *Recent Advances in Lichenology, Modern Methods and Approaches in Biomonitoring and Bioprospection, Volume 1*, Springer India, 273p.

LANGE (de) P. J., GALLOWAY D. J., BLANCHON D. J., KNIGHT A., ROLFE J. R., G. M. CROWCROFT, HITCHMOUGH R., 2012, "Conservation status of New Zealand lichens", *New Zealand Journal of Botany*, 50:3, pp.303-363.

PAOLI (L.), CORSINI (A.), BIGAGLI (V.), VANNINI (J.), BRUSCOLI (C.), LOPPI (S.), 2012 – "Long-term biological monitoring of environmental quality around a solid waste landfill assessed with lichens", *Environmental Pollution*, 161, pp.70-75.

REYNOLDS C. L., ORHAN A. H. Er, WINDER L., BLANCHON D. J., 2017 – "Distribution and community composition of lichens on mature mangroves (*Avicennia marina* subsp. *Australasica* (Walp.) J.Everett) in New Zealand", *PLOS ONE* 12(6) 22p.

RUSU A.-M., JONES G.C., CHIMONIDES P.D.J., PURVIS O.W., 2006 – Biomonitoring using *Hypogymnia physodes* and bark samples near Zlatna, Romania immediately following closure of a copper ore-processing plant, *Environmental Pollution*, 143, pp.81-88.

SAWERSYN J.-P., 2012 – La combustion du bois et ses impacts sur la qualité de l'air, *Air Pur* n°81, pp.7-16.

SHIH-CHUN Candice Lung, CHUN-HU Liu 2015 – "Fast analysis of 29 polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) and nitro-PAHs with ultra-high performance liquid chromatography-atmospheric pressure photoionization-tandem mass spectrometry" Scientific reports, 5:12992, DOI: 10.1038/srep12992. www.nature.com/scientificreports/

SHUKLA Vertika, D.K. UPRETI, BAJPAI Rajesh, 2014 – *Lichens to biomonitor the environment*, Springer India, 185p.

SPIER (L.), VAN DOBBEN (H.), VAN DORT (K.), 2010 – « Is bark pH more important than tree species in determining the composition of nitrophytic or acidophytic lichen floras? », *Environmental pollution*, n°158, pp.3607-3611.

SVOBODA (David), PEKSA (Ondřej), VESELÁ (Jana), 2010 – "Epiphytic lichen diversity in central European oak forests: Assessment of the effects of natural environmental factors and human influences", *Environmental Pollution*, 158, pp.812-819.

VIANNA N.A., GONCALVES D., BRANDAO F., BARROS R.P. de, FILHO G.M.F., MEIRE R.O., TORRES J.P.M., MALM O., JUNIOR A. D'O., ANDRADE L.R., 2011 – « Assessment of heavy metals in the particulate matter of two Brazilian metropolitan areas by using *Tillandsia usneoides* as atmospheric biomonitor », *Environ. Sci. Pollut. Res.* 18, pp.416-427.

WAHID SAMSUDIN, M., SAID I. M., DIN L.b., YUSOFF I., LATIFF A., "Chemotaxonomic studies of Lichens from Sayap-Kinabalu, Sabah: Constituents of *Pseudocyphellaria*, *Lobaria* and *Peltigera*", - 1998 ASEAN Review of Biodiversity and Environmental Conservation (ARBEC), pp.1-7.

WARD N.I., SAVAGE J.M., 1994 – Metal dispersion and transportational activities using food crops as biomonitors, *The Science of the Total Environment* 146/147, 309-319.

WILLIAM PURVIS (O), PAWLK-SKOWRONSKA (Barbara), 2008- Lichens and Metals, chapter 12, *British Mycological Society Symposia Series*, Volume 27, pp.175-200.

Etudes-guides - Sitographie

- ADEME, juillet 2017, *TROPHé, Transferts et Risques des Organiques Persistants pour l'Homme et les Ecosystèmes, livrable n°3, Evaluation des expositions, Expertises*, en partenariat avec l'INERIS, 117p.
- ADEME, *Pollution atmosphérique par les métaux en France, Dix ans de biosurveillance des retombées*, EDP Sciences, Mai 2013, 178 p.
- ADEME, *Programme de recherche de l'ADEME sur les émissions atmosphériques du compostage*, Connaissances acquises & synthèse bibliographique, Juillet 2012.
- ADEME, *Les émissions agricoles de particules dans l'air, Etat des lieux et leviers d'action, Conseillers & techniciens agricoles*, Connaître et agir, Mars 2012.
- ADEME, *Biomasse forestière, populicole et bocagère disponible pour l'énergie à l'horizon 2020*, rapport final novembre 2009.
- ADEME, *Contamination des plantes potagères dans un environnement potentiellement pollué, deux nouveaux outils d'évaluation*, MEEDDAT, 2 avril 2008.
- ADEME, 2008 – *Pollutions olfactives, origine, législation, analyse, traitement*, 2^{ème} édition, L'Usine Nouvelle, Dunod, Saint Just-la-Pendue, 390p.
- ADEME, *Guide méthodologique d'échantillonnage de plantes potagères cultivées à proximité d'une installation industrielle actuelle ou ancienne en vue d'en déterminer la qualité d'un point de vue sanitaire, Contamination de plante potagères dans un environnement potentiellement pollué*, Pollutec 2007.
- ADEME, INERIS, *Guide des plantes potagères dans le cadre de diagnostics environnementaux*, 2007.
- AUCKLAND COUNCIL, *The Health of Auckland's Natural Environment in 2015*, 216p.
- BODENAN (F.), NOWAK (C.) – *Dioxines dans les sols français : un premier état des lieux, rapport final*, BRGM/RP-54202-FR, Décembre 2005
- BODENAN (F.), MICHEL (P.) – *Dioxines/furannes dans les sols français : second état des lieux, analyses 1998-2007, rapport final*, BRGM/RP-56132-FR, mars 2008.
- BODENAN (F.), MICHEL (P.) – *Dioxines/furannes dans les sols français : troisième état des lieux, analyses 1998-2012, rapport final*, BRGM/RP-63111-FR, décembre 2013.
- CITEPA, Emissions dans l'air en France métropole, substances relatives à la contamination par les Polluants Organiques Persistants http://www.citepa.org/emissions/nationale/Pop/Emissions_FRmt_POP.pdf
- CONSEIL SUPERIEUR D'HYGIENE PUBLIQUE DE FRANCE, Section des milieux de vie, 2011 – *Qualité de l'air dans les modes de transport terrestres*, Rapport du groupe de travail « air et transports », Lavoisier, Lassay-les-Châteaux, 162p.
- Document de référence sur les meilleures techniques disponibles (BREF) : grandes installations de combustion, 2018 – Installations classées, développement durable, 5p. <http://www.installationsclassées.developpement-durable.gouv.fr/Document-de-reference-sur-les.html>
- IARC Working Group, International Agency for Research on Cancer, *Benzo[a]pyrene*, Monograph 100F-14, 36, Sup 7, 92, Cas No. 50-32-8, 2012, 34p. <https://monographs.iarc.fr/wp-content/uploads/2018/06/mono100F-14.pdf>
- INERIS, *Choix de Valeur Toxicologique de Référence, Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques (HAP)*, DRC-20-180728-00256A, Version 1, 17/01/2020, 34p.
- INERIS, *Benzo(a)pyrène, Fiche de données toxicologiques et environnementales des substances chimiques*, mise à jour 12/12/2019, Version 3.2. Rapport d'étude DRC-18-170856-11671B, 84p.
- INERIS, *Bilan des choix de VTR disponibles sur le portail des substances chimiques de l'INERIS*, mise à jour fin 2018, Rapport d'étude DRC-18-170856-11674A, 28/01/2019, 64p.
- INERIS, *Synthèse des valeurs réglementaires pour les substances chimiques, en vigueur dans l'eau, les denrées alimentaires et dans l'air en France au 31 décembre 2017*, rapport d'étude DRC-17-164559-10404A, 13.03.2018.
- INERIS, *Caractérisation de l'état des milieux sols, eaux et végétaux dans l'environnement des installations industrielles, Utilisation de l'Environnement local témoin*, 2017 – Rapport d'étude, Rapport élaboré pour le MEEM, INERIS-DRC-15-151883-01265B, 54p.

- INERIS, *Caractérisation de l'état des milieux sols, eaux et végétaux dans l'environnement des installations industrielles, Utilisation de l'Environnement local témoin*, rapport d'étude DRC-15-151883-01265B, 05/04/2017.
- INERIS, *Guide surveillance dans l'air autour des installations classées, retombées des émissions atmosphériques, impact des activités humaines sur les milieux et la santé*, DRC-16-158882-12366A, novembre 2016.
- INERIS, *Choix de valeurs toxicologiques de référence (VTR), Méthodologie appliquée par l'INERIS, impact des activités humaines sur la santé, Première édition*, décembre 2016 – DRC-16-156196-11306A, 68p.
- INERIS, *Guide sur la stratégie de prélèvements et d'analyses à réaliser suite à un accident technologique – cas de l'incendie*, Version 2.0, 2015 – Rapport, Rapport réalisé pour le Ministère en charge de l'Ecologie, personnes ayant participé à l'étude : François Gautier, Frédéric Tognet, INERIS-DRC-15-152421-05361C, 48p.
- INERIS, *Synthèse des valeurs réglementaires pour les substances chimiques, en vigueur dans l'eau, les denrées alimentaires et dans l'air en France au 1^{er} décembre 2013*, rapport d'étude DRC-14-142522-01489A, août 2014.
- INERIS, *Etat de l'art des procédés de décontamination d'appareils contenant des PCB et techniques de maîtrise des émissions associées*, rapport DRC-13-133121-03381A, 10/10/2013.
- INERIS, *Etat de l'art des procédés de décontamination d'appareils contenant des PCB et techniques de maîtrise des émissions associées*, 2013 – Rapport, Rapport réalisé pour le Ministère de l'Ecologie, du Développement Durable et de l'Energie – Direction Générale de la Prévention des Risques – Bureau de la Prospective, de l'Evaluation et des Données, INERIS-DRC-13-133121-03381A, 135p.
- INERIS, *Synthèse des valeurs réglementaires pour les substances chimiques, en vigueur dans l'eau, les denrées alimentaires et dans l'air en France au 1^{er} décembre 2011*, rapport d'étude DRC-12-115719-00099B, 30.01.2013.
- INERIS, 2011. *Données technico-économiques sur les substances chimiques en France : Les polyChloroBiphenyles (PCB)*, DRC-11-118962-11081A, 89p.
- INPN, ONB, *La biodiversité en France, 100 chiffres expliqués sur les espèces*, mai 2019.
- INRS, *Cartographie des expositions aux hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) par secteur d'activité : focus sur la surveillance biologique des expositions professionnelles*, TC 162, Grand Angle, Références en santé au travail, n°154, pp.51-63, Juin 2018.
- LAJOIE Pierre, « Les Hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) », *Polluants vedettes, Ma santé, mon environnement*, Centre de santé publique de la région de Québec, http://ecoroute.uqcn.qc.ca/envir/sante/4_pv3.htm
- MARANO F., *Toxicité des particules Diesel sur les cellules épithéliales des voies aériennes chez l'homme*, laboratoire de Cytophysiologie et Toxicologie Cellulaire, http://www.info-systel.com/jbreton/toxicite_particules_diesel.htm
- NIMIS (Pier Luigi), HAFELLNER (Josef), ROUX (Claude), CLERC (Philippe), MAYRHOFER (Helmut), MARTELLLOS (Stefano), BILOVITZ (Peter O.), 2018 – The lichens of the Alps – an annotated checklist, MycoKeys 31: 1-634, Monograph, 634 p. <https://mycokeys.pensoft.net/articles.php?id=23568>
- ROUX C., 2017- Catalogue des lichens et champignons lichénicoles de France Métropolitaine, 1172p. http://www.afl-lichenologie.fr/telecharger/Doc/2017CLF_Tome1_Texte.pdf
- Sawyer J., Forbes A., 2013 – "Threatened and unique biodiversity assets of Auckland" *Natural Heritage*, Auckland Council, 44p.
- SINGERS N., OSBORNE B., LOVEGROVE T., JAMIESON A., BOOW J., SAWYER J., HILL K., ANDREWS J., HILL S., WEBB C., - *Indigenous terrestrial and wetland ecosystems of Auckland*, Auckland Council, 76 p., 2017.
- TALBOT N., REID N., CRIMMINS P., 2017 – *Auckland Ambient Air Quality Trends for PM_{2.5} and PM₁₀ – 2006-2015*, Technical report 2017/029, 46p.
- VUST M., CLERC P., HABASHI C., MERMILLIOD J.-C., 2015 – *Liste rouge des lichens du canton de Genève*, Publication hors-série n°16, Conservatoire et Jardin Botaniques de la ville de Genève, 81p. https://www.researchgate.net/publication/273000344_Liste_Rouge_des_lichens_du_canton_de_Geneve

Revues / Sites web spécialisés

- AFNOR – diverses normes
- Citepa (format SECTEN), annuellement
- EFSA
- ANSES
- Australasian Lichenology
- Bulletin de l'Association Française de Lichénologie
- Bulletin de l'Association Internationale de Lichénologie
- Environnement et Techniques
- INERIS, *Fiche de données toxicologiques et environnementales des substances chimiques*
- INRS, Institut National de Recherche et de Sécurité, Fiche Toxicologique
- JOUE, JO - Diverses lois-règlements-décrets Europe et France.
- WHO (OMS) Guidelines

ANNEXES

LES LICHENS - BIOINDICATEURS

Notions de Physiologie

Les lichens sont caractérisés par leur composition unique, résultat de l'association symbiotique mutualiste de deux partenaires très différents au départ. L'un est algal ou cyanobactérien, le photosymbiote, producteur autotrophe et l'autre est fongique, le mycosymbiote, consommateur hétérotrophe.

La mise en évidence des substances carbonées fournies par le photosymbiote au mycosymbiote a été réalisée par Smith en 1961, (*Van-Haluwyn et Lerond, 1993*). Celles-ci sont transformées en mannitol et arabitol par le champignon. Ces molécules de sucres-alcool assurent une pression osmotique élevée qui maintient l'efficacité du thalle vis-à-vis de la dessiccation, protégeant ainsi le photosymbiote de la déshydratation.

Les cyanobactéries ainsi que le champignon sont capables d'assimiler l'azote atmosphérique, sous forme d'ammoniac, grâce au glutamate déshydrogénase, selon un processus métabolique faisant intervenir les deux partenaires. La constitution des espaces intercellulaires des lichens et l'intervention de mécanismes d'absorption actifs et passifs caractérisent leur physiologie et leur permet de capter des substances à partir de l'atmosphère.

Particularités

Plusieurs particularités les différencient des végétaux supérieurs et permettent de les utiliser comme des sentinelles réagissant aux modifications de fond de la qualité atmosphérique :

- **A) - L'absence de racines**, limitant les interactions avec le support qui rend leur nutrition étroitement tributaire de l'atmosphère,
- **B) - Ils peuvent accumuler des substances** sur une longue période grâce à leur métabolisme très lent, à une **activité continue en toute saison** et à une croissance faible, dus à un état de sous-nutrition constant,
- **C) - L'absence de stomates et de cuticule** accentue leur vulnérabilité si la qualité de l'air décroît, car ils ne possèdent pas de mécanisme de défense lorsque la qualité de l'environnement est altérée,
- **D) – La présence d'un très fin maillage mycélien** interne les rend aptes à piéger les particules véhiculées par l'atmosphère.

Ces particularités contribuent à leur conférer un grand pouvoir d'accumulation de substances très diverses.

Ce pouvoir d'accumulation est accompagné d'une grande fragilité. D'après Fields (1988), quelle que soit la nature du polluant gazeux (SO_2 , Fluor, Oxydes d'azote), les perturbations de la physiologie des lichens respectent la chronologie suivante : atteinte de la nutrition azotée, fuite d'électrolytes, baisse de la photosynthèse, altération de la respiration, destruction des pigments et mort du lichen.

Utilisation : études de flore et dosages

Les lichens sont regroupés en communautés de groupes d'espèces répondant aux mêmes conditions écologiques. Les peuplements sont alors stables, liés à des biotopes où ils se maintiennent et se reproduisent.

Les modifications de la composition de l'air entraînent des changements dans la composition de ces peuplements. Ainsi, l'effet du changement peut être positif sur la croissance de certaines espèces et négatif sur d'autres.

Les méthodes d'étude des peuplements font appel à la phytosociologie, qui étudie la façon dont les plantes sont groupées dans la nature (selon Touffet 1982). Air Lichens à partir de ses propres recherches et de différents auteurs, a mis au point des méthodes basées sur différents niveaux de perturbation de la qualité de l'air. Par ces méthodes, les modifications de la flore permettent une observation des pollutions.

Des techniques spécifiques des pollutions acides ou azotées sont employées dont celles destinées au suivi des oxydes d'azote (*Li-NOx®*, *Air Lichens*, brevet du 4/08/2006) ou des pollutions ammoniacales (*Méthode de Lallemant*), par rapport à des flores de référence et à des secteurs témoins.

- **L'étude de la flore**, aborde la systématique des lichens en fonction des caractères identifiables sur le terrain. Des critères chimiques complètent ces identifications, par l'emploi de différents réactifs.

Le calcul de l'Indice Global de la Qualité de l'Air (IGQA®) à partir d'un ensemble de relevés répartis selon une grille de 5 classes de qualité, permet de diagnostiquer les pollutions portant atteinte à la flore lichénique. Cette méthode est indispensable en cas de pollutions multiples et s'applique en situation urbaine, industrielle ou rurale.

- **Les dosages** font appel à des collectes de thalles de lichens selon un protocole rigoureux. Des points de référence sont inclus pour disposer de bruits de fond et y opposer les résultats.

Dans le cas de polluants gazeux (exemple du SO_2) les pics de pollution peuvent provoquer des altérations des fonctions physiologiques. La répétition éventuelle de ceux-ci, modifiant la qualité atmosphérique moyenne, aboutira à l'altération définitive des thalles des lichens, dont les capacités de restauration des fonctions vitales seront débordées. Dans cette éventualité la sélection aboutit à une modification de la communauté d'espèces.

Dans le cas de substances accumulables, l'augmentation de la fréquence des pics entraîne une augmentation de la teneur dans le thalle des lichens en élevant significativement la teneur atmosphérique moyenne.

INCERTITUDE DES METHODES

L'incertitude des études de Bioindication lichénique peut être évaluée selon plusieurs approches relatives à la technique de terrain ou aux méthodes employées. L'incertitude varie s'il s'agit d'études de flore ou de prélèvements pour dosages. Pour la technique, elle est essentiellement localisée à l'observation ou au prélèvement.

- **Les études de flore** sont pratiquées selon des critères destinés à assurer leur reproductibilité. C'est pourquoi un nombre de supports représentatifs d'un lieu est observé. Un nombre minimum de relevés est nécessaire afin de disposer d'un ensemble cohérent.

Lorsque l'échelle de flore utilise un indice lié à une répartition en classes (cas du calcul de l'Indice Global de la Qualité de l'Air ou IGQA®), l'incertitude est d'environ 15%. Il s'agit des relevés dont l'IGQA® est proche à 10 % de la limite de la classe à laquelle il appartient.

Lorsque l'échelle de flore est utilisée selon la notion de présence/absence (cas de l'échelle de Lallemant), des relevés peuvent présenter des résultats inattendus (moins de 7 %) et nécessiter un contrôle. Le plus souvent celui-ci confirme la première observation ou précise des conditions écologiques qui entraînent des cas particuliers.

- **Dans le cas des études de Biorétention**, plusieurs incertitudes peuvent se cumuler : celle de la capacité intrinsèque des lichens envers les substances recherchées, celle du prélèvement et l'analytique.
 - La standardisation du matériel lichénique limite l'incertitude car toutes les espèces n'ont pas les mêmes possibilités de rétention pour les mêmes substances. Le prélèvement de populations de lichens est préférable à celui de quelques individus. Cette pratique permet de limiter l'influence des micro expositions et de gommer les différences interindividuelles. Le prélèvement de toutes les tailles de l'espèce sélectionnée permet de lisser les variations liées à l'âge des thalles.
 - L'incertitude analytique est liée aux substances dosées et aux techniques employées. Dans le cas des PCDD/F les laboratoires fournissent leurs résultats avec une incertitude de 15%.

FICHE HAP MISE A JOUR CITEPA 2020

Fiche informative, non exhaustive.

Les sources de HAP dans l'environnement sont multiples et ceux-ci peuvent être libérés par les combustions incomplètes durant lesquelles des éléments carcinogènes peuvent se dégager. C'est notamment le cas du benzo(3,4-a)pyrène, du benzoanthracène et du fluoranthène (Pattle et al, 1957, selon Ramade, 1989). Ces composés peuvent être émis par divers types de foyers, les échappements des moteurs diesel et dans une moindre mesure par ceux des moteurs à essence. Les combustions de bois, charbon, fuel, essence et éventuellement les grillades et fumaisons sont des sources ponctuelles de libération de HAP.

STRUCTURE CHIMIQUE

Les composés aromatiques

Les HAP peuvent être subdivisés en deux groupes : les HAP à masse moléculaire faible, formés de moins de quatre anneaux, et les HAP à masse moléculaire élevée, à quatre anneaux ou plus. Les HAP à masse moléculaire élevée sont généralement très peu solubles dans l'eau et ont une forte tendance à se fixer à la surface des particules en suspension dans l'air et dans l'eau (Pêches et Océans Canada 2001).

Les Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques (HAP) sont une famille de composés chimiques constitués d'atomes de carbone et d'hydrogène dont la structure comprend au moins deux anneaux aromatiques fusionnés, chacun composé de cinq ou six atomes de carbone. La famille des HAP comprend environ une centaine de substances qui diffèrent entre elles par le nombre d'anneaux et leur position respective.

Cet ensemble est constitué d'une famille de substances chimiques ayant comme molécule de base un ou plusieurs noyaux aromatiques :

- Substances à un noyau aromatique : dérivées du benzène, elles supportent des chaînes carbonées plus ou moins longues, ce qui modifie leur volatilité et leur solubilité,
- Substances à deux noyaux aromatiques : dérivées du naphtalène, leur solubilité dépend aussi de l'importance des chaînes carbonées,
- Substances à trois noyaux et plus : elles sont classiquement comprises dans la dénomination HAP (Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques), peu solubles et peu biodégradables,
- Certaines molécules aromatiques sont soufrées et sont connues sous le nom de benzothiophènes et dibenzothiophènes.

Le nombre de composés HAP mesuré dans l'environnement peut varier selon les études de 6 à 21 et nécessite par conséquent une attention dans la comparaison des résultats. Le nombre de 16 molécules, généralement incluses dans la dénomination HAP16 est courant et leur nomenclature est la suivante :

- Naphtalène	Acénaphthylène
- Acénaphthène	Fluorène
- Phénanthrène	Anthracène
- Fluoranthène	Pyrène
- Benzo (a) anthracène	Chrysène
- Benzo (b) fluoranthène	Benzo (k) fluoranthène
- Benzo (a) pyrène	Dibenzo (a,h) anthracène
- Benzo (g,h,i) pérylène	Indeno (1, 2, 3-cd) pyrène

Composés pris en compte par la réglementation

Majoritairement d'après CITEPA, format SECTEN.

Dans le cadre de la Convention sur la Pollution Atmosphérique Transfrontière à Longue Distance (CEENU), le Protocole d'Aarhus sur les Polluants organiques persistants de 1998 ainsi que le règlement CE n°850/2004 du Parlement européen et du Conseil du 29 Avril 2004. En 2019, le règlement CE 850/2004 est abrogé pour le règlement UE 2019/1021 qui le remplace et qui précise à nouveau les 4 mêmes composés devant faire l'objet d'inventaire d'émissions des rejets, à savoir :

- le benzo(a)pyrène, le benzo(k)fluoranthène,
- le benzo(b)fluoranthène, l'indeno(1,2,3-cd)pyrène.

La réglementation française (arrêté du 2 février 1998 modifié, arrêtés relatifs aux installations de combustion soumises à déclaration ou à autorisation) impose des valeurs limites d'émission à un nombre plus élevé de HAP. Elle en considère huit qui incluent les quatre HAP précédents auxquels s'ajoutent⁹ :

- benzo(g,h,i)peryène, dibenzo(a,h)anthracène,
- fluoranthène, benzo(a)anthracène.

La réduction des substances toxiques était une priorité du 2^{ème} Plan national santé environnement (2009-2013) (PNSE 2), publié en juillet 2009. En particulier, les émissions de HAP devaient être réduites de 30% entre 2009 et 2013.

Les HAP suivis individuellement par le CITEPA sont au nombre de huit et la norme NF X43-329 de mai 2003 est prescrite pour la mesure à l'émission dans l'air des HAP des sources fixes :

- le benzo(a)pyrène, le benzo(g,h,i)peryène,
- le benzo(b)fluoranthène, le fluoranthène,
- le benzo(k)fluoranthène, le dibenzo(a,h)anthracène,
- l'indéno(1,2,3-cd)pyrène le benzo(a)anthracène

Des études suggèrent l'importance de tenir compte des phases gazeuses et particulaires, considérant notamment que les concentrations de HAP en phase gazeuse relativement à la phase particulaire sont élevées dans l'air ambiant par rapport aux émissions primaires, en particulier pour les HAP de faibles poids moléculaires (ANSES, 2019)¹⁰. Les HAP en phase gazeuse sont rarement mesurés en France, les 8 HAP réglementés étant relativement lourds et donc presque exclusivement présents en phase particulaire (à l'exception du benzo(a)anthracène semi-volatil) (ANSES, 2019).

RELATIONS AVEC LA CIRCULATION AUTOMOBILE

Emissions et particules

De nombreuses études font état de la relation existant entre les émissions automobiles et la présence de HAP dans l'atmosphère. La relation de ces dernières molécules avec les fumées noires¹¹, les suies, a été abordé de façon plus quantitative selon le poids moléculaire des particules atmosphériques, à savoir les PM₁₀, PM_{2.5} et les particules de poids moléculaire inférieur à 2.5µg. L'étude de la corrélation pouvant exister avec d'autres polluants émis selon les mêmes origines et les HAP montre qu'un polluant n'est jamais émis seul mais fait partie d'une « soupe chimique » à l'intérieur de laquelle les HAP peuvent être considérés comme des traceurs des émissions automobiles.

- Le trafic routier est à l'origine de nombreux polluants de l'air (Anses 2012). Il est l'un des principaux émetteurs de particules, de carbone suie, de HAP et de NOx, en particulier dans les zones urbaines (Afsset 2009, CITEPA/Secten 2016, Karagolian et al. 2015, LCSQA and Ineris 2013).
- Les particules générées par la circulation automobile ont un diamètre de l'ordre du micron et leur caractère hydrophobe leur permet d'atteindre les voies aériennes inférieures jusqu'au compartiment alvéolaire où elles peuvent séjourner pendant plusieurs mois (Peiffer, 2000).

⁹ Par ailleurs, l'arrêté du 31 janvier 2008 modifié relatif au registre et à la déclaration annuelle des émissions polluantes et des déchets concerne sept HAP. Les émissions dans l'air de HAP à déclarer en cas de dépassement des seuils sont le total des quatre HAP du Protocole d'Aarhus de la CEE-NU, un HAP pris aussi en compte par l'arrêté du 2 février 1998 et deux autres HAP non considérés précédemment : le benzo(a)pyrène,, le benzo(b)fluoranthène, le benzo(k)fluoranthène,, l'indéno(1,2,3-cd)pyrène,, le benzo(g,h,i)peryène, l'anthracène, le naphthalène.

¹⁰ ANSES 2019 = Particules de l'air ambiant extérieur, Impact sur la pollution atmosphérique des technologies et de la composition du parc de véhicules automobiles circulant en France, Rapport d'expertise collective, juillet 2019, Edition scientifique, Saisine n° 2014-SA-0156, 284p.

¹¹ Les gaz automobiles contribuent à l'émission de fumées noires (Roussel et al., 2000). Contrairement à l'ozone, les niveaux de fumées noires, de PM₁₀ et de SO₂ ne sont pas corrélés avec la température. Les fumées noires sont en revanche corrélées avec les PM₁₀, le SO₂ et le CO, et anti-corrélées avec l'ozone (Schwartz et al., 1996).

- Les particules de HAP se trouvent principalement sur les particules de taille inférieure à 2.1µm. (Garivait et al., 1999).
- Dans la plupart des villes Européennes, les particules de la pollution atmosphérique sont mesurées selon deux catégories (ADEME, rapport 1999 de l'IFEN): D'une taille inférieure à 10µm, les PM₁₀ - D'une taille inférieure à 4µm, les particules ou fumées noires.
- Les HAP en zones urbaines, situées dans un climat tempéré, sont généralement variables en fonction des saisons : dans la plupart des cas, les niveaux les plus hauts sont atteints en hiver plutôt qu'en été ce qui est non seulement dû aux changements tels que la chaleur et les automobiles, mais aussi à une réactivité atmosphérique plus importante en été (Garivait et al., 1999). Ces données indiquent la priorité de la saison hivernale pour le suivi des HAP dans l'atmosphère. Le pyrène est presque entièrement inclus dans la phase gazeuse et celles-ci ont une courte durée de vie à cause de la dégradation solaire.

QUANTIFICATION DES EMISSIONS

Le profil chimique des espèces HAP émises varie selon les différentes motorisations essence ou Diesel¹², ainsi que selon la présence ou non de système de contrôle des émissions comme le filtre à particules et selon l'ancienneté des technologies, les véhicules anciens contribuant fortement aux émissions particulières du trafic malgré un nombre de kilomètres parcourus relativement faible (ANSES, 2019).

Moteurs diesel

Depuis 1995, régulièrement, des études font état de la relation existant entre les émissions des moteurs Diesel et les quantités atmosphériques de HAP. Les données suivantes sont d'après Arquès, 1998 ou précisées entre parenthèses :

- Les concentrations d'hydrocarbures imbrûlés sont nulles à l'équilibre pour la température d'échappement atteinte en mélange pauvre ou stœchiométrique.
- Les aérosols comprennent des polluants primaires de la combustion comme les suies qui résultent de la combustion en discontinu (moteur Diesel).
- Les cendres se composent principalement de suies (carbone) et non pas de plomb (moteurs à allumage commandé).
- Les particules de carbone agglomérées sont généralement imbibées de fractions d'hydrocarbures provenant soit du combustible, soit du liquide de graissage.
- Ces particules sont émises en permanence mais surtout lorsque la quantité d'air diminue par rapport à la quantité du carburant injecté (accélérations transitoires du moteur / faible vitesse de rotation du moteur si le véhicule gravit une pente).
- La part revenant aux HAP dans les phénomènes polluants de formation de smog serait non négligeable.
- Le système d'injection du moteur est généralement conçu pour éviter ces émissions de particules mais il n'est pas toujours efficace ou bien réglé.
- Les HAP issus des transports routiers sont principalement émis par les véhicules Diesel (ANSES, 2019).
- Les particules Diesel représentent environ 40% de la pollution particulaire urbaine, elles sont issues de moteurs dont le régime diffusionnel à combustion incomplète génère des suies sous forme de microsphères de carbone agrégées les unes aux autres avec un diamètre aérodynamique moyen de 100nm. Leur grande surface d'exposition permet à de nombreuses molécules issues de la combustion incomplète d'y être adsorbées : HAP, sulfates, métaux lourds... (Peiffer, 2000).
- Les produits s'adsorbant sur les particules Diesel peuvent constituer 10 à 90% du poids total des particules (Marano 2001).
- Au 1^{er} janvier 2012, le CCFA (Comité des Constructeurs Français d'Automobiles) estimait un peu plus de 38 millions de véhicules avec une part du diesel de 59,8% (pour le parc des voitures particulières). Leurs fumées d'échappement ont une émission particulaire 50 fois plus importante que celle d'un moteur à essence. Les particules Diesel sont de petite taille (0.1 à 0.3 µm de diamètre - Marano 2001).
- En 2016, 42 % du parc de véhicules particuliers Diesel en circulation n'était pas encore équipé d'un filtre à

¹² 53 % de la masse totale en HAP légers (principalement émis par les véhicules Diesel : fluoranthène, pyrène) peut être expliquée par le facteur « échappements du trafic » (ANSES, 2019). Les HAP plus lourds sont au contraire émis par en priorité par les véhicules essence (ANSES, 2019)

particules. Les véhicules utilitaires lourds, dont la durée de vie est plus longue, restent très peu équipés en filtres à particules. Le taux d'équipement en filtres à particules des véhicules légers augmente avec l'introduction des nouveaux véhicules Euro 5 et Euro 6 dans le parc roulant et pourrait atteindre 96 % à l'horizon 2030 (ANSES, 2019). Pour autant, les filtres à particules ne résolvent que partiellement le problème car le fractionnement des particules les rend plus propices à une pénétration alvéolaire.

EFFETS SUR LA SANTE

Le contenu de cette phase de l'étude bibliographique est divers et cible les différentes possibilités d'aborder un problème complexe qui se résume dans l'étude des pollutions automobiles, en mettant l'accent sur les conséquences sanitaires de la présence de HAP dans l'air inspiré.

Effets des HAP

- A cause de leur volatilité modérée, les HAP se retrouvent dans l'atmosphère sous deux formes : adsorbés par les particules suspendues et dans l'essence. L'association des HAP avec les particules volatiles et l'essence correspondante lors de la respiration est de première importance en ce qui concerne les effets sur la santé humaine. Les niveaux des HAP dans l'air urbain sont concernés parce qu'ils sont les produits de la combustion de carburant fossile (incinération, gasoil, diesel), (Garivait et al., 1999).
- Effets cardiovasculaires et respiratoires pour des expositions à court et à long termes. (ANSES, 2019)
- Ils stimulent la sécrétion de cytokines pro inflammatoires (GM-CSF, IL8, ICAM-1 soluble).
- Ils augmentent la dégranulation des éosinophiles et leur adhérence à l'épithélium.
- En raison de leur caractère mutagène, ils peuvent être à l'origine d'un affaiblissement du système immunitaire, ce qui augmente les risques d'infection (CITEPA, 2014).
- La première cible des HAP est l'épithélium respiratoire car leur vitesse d'élimination est relativement faible tandis que leur taille leur permet de pénétrer profondément dans l'appareil respiratoire (Marano, 2001).
- Ils augmentent la réaction IgE spécifique aux allergènes inhalés (IgE : immunoglobulines de type E, spécifiques des phénomènes allergiques, couramment dosés en médecine de ville). L'inhalation des particules Diesel agit comme agent immuno-adjuvant sur l'immunité des voies aériennes et l'immunité systémique en modifiant la pénétration des allergènes, en initiant une réponse immunitaire de TH2 avec production in fine d'IgE. (Peiffer 2000)
- « Sur l'ensemble des rejets dans l'atmosphère liés aux activités humaines, les transports sont responsables de 45.5% des particules en suspension (PM). L'effet est fonction du type de particule. Les particules les plus petites (moins de 10 microns) peuvent provoquer des difficultés respiratoires chez les personnes fragiles (enfants, personnes âgées ou sensibles). Certaines ont des propriétés cancérogènes ou mutagènes. Les particules les plus fines peuvent transporter des composés toxiques dans les voies respiratoires inférieures et potentialisent ainsi les effets de ces composés. Les particules plus grosses peuvent également contenir des composés organiques cancérogènes ou des métaux lourds », (Ecolivet et al., 2000).
- Il a été établi que les hydrocarbures, les oxydes d'azote et l'oxygène réagissent sous l'influence des rayons ultraviolets pour donner beaucoup de nouveaux composés tels que l'ozone, le nitrate peroxy-acétyle, l'acroléine, etc. qui causent des dommages aux récoltes (les deux premiers) ou sont des irritants puissants des yeux et de l'appareil respiratoire (Arquès, 1998).

Effets carcinogènes

Les HAP sont exclusivement générés par des sources de combustion. Ils furent parmi les premiers polluants atmosphériques à avoir été identifiés comme carcinogènes et/ou mutagènes.

- Des études ont démontré que le cancer du poumon est le cancer le plus répandu, pour les deux sexes, dans les régions où les niveaux de pollution atmosphérique sont considérés comme dangereux (Garivait et al., 1999).
- Les oxydes d'azote, de carbone, de soufre, les aldéhydes, les hydrocarbures imbrûlés et la suie sont les constituants des gaz d'échappement les plus nocifs. Les HAP ont un effet cancérogène (Arquès, 1998).
- En 2012, le CIRC classait les émissions d'échappement des moteurs Diesel comme cancérogènes pour l'Homme (groupe 1) et, en 2014, les émissions d'échappement des moteurs à essence comme possiblement cancérogènes pour l'Homme (groupe 2B) (ANSES, 2019).
- Certains HAP sont potentiellement carcinogènes tandis que d'autres le sont plus faiblement, ils agissent sur l'activation du métabolisme. Chrysène, benzo[a]pyrène et benzo[a]anthracène exercent une activité carcinogène (Desai et al., 1999).

- Le Benzo[c]chrysène serait un HAP faiblement carcinogène résultant de la combustion incomplète d'une matière organique (Desai et al.1999).
- Neuf HAP au moins sont des composés co-carcinogènes et carcinogènes, ils ont été quantifiés, par extraction ultrasonique et détection HPLC fluorescence (Garivait et al., 1999) : Pyrène, Benzo(a)anthracène, Benzo(e)pyrène, Dibenzo(a,c)anthracène, Benzo(k)fluoranthène, Benzo(a)pyrène, Dibenzo(a,h)anthracène, Benzo(ghi)pérylène, Triméthylcholanthène.
- Bien que 16 HAP aient été identifiés comme des polluants atmosphériques dangereux par le Title III de US Clean Air Act Amendments en 1990, il n'y avait toujours pas, en 1999, de standard de qualité établi pour les HAP (Garivait et al., 1999).
- Seul le Benzo(a)pyrène (BaP), le plus carcinogène des HAP, a été étudié en profondeur. D'après l'OMS (1987), le risque estimé de cancer du poumon relié à l'exposition de 1 ng/m³ de BaP pour toute une vie serait de 9 x 10⁻⁵ (Garivait et al., 1999). La cancérogénicité du benzo(a)pyrène est en partie liée à sa transformation en benzo(a)pyrène-4-époxycide. Il s'agit d'un des composés les plus toxiques parmi les HAP et fortement carcinogène (CITEPA, 2012) ; le BaP est mutagène et fortement cancérigène (CITEPA 2014).

Remarques

L'utilisation de la mesure des HAP le long des voies de déplacement doit permettre à terme de limiter l'exposition des populations, à condition que les résultats soient pris en compte pour modifier les paramètres d'émission ou améliorer les conditions de circulation.

Aux différents aspects sanitaires évoqués dans cet ensemble d'études, il convient d'ajouter celui des phénomènes allergiques. L'augmentation de ces pathologies est concomitante à celle des pollutions atmosphériques urbaines.

Le rôle des pollens est souvent évoqué. Ceux-ci ne sont pas plus allergisants aujourd'hui qu'il y a vingt ans mais les HAP se fixent à leur surface, particulièrement lorsqu'elle est rugueuse, granuleuse ou spiculée. Eviter les plantations d'arbres tels que les platanes ou les bouleaux ne pourrait être qu'un palliatif mais jamais une solution car ceci ne diminuerait en aucune façon la concentration atmosphérique en HAP. Ceci ne ferait que la masquer, sans empêcher ces molécules d'exercer un effet pathogène ou allergisant par leur constitution propre.

EMISSIONS France 2018, CITEPA 2020

PRINCIPALES EMISSIONS EN 2018 EN FRANCE METROPOLITAINE EN t		
1	Industrie de l'énergie	3,2
2	Industrie manufacturière et construction	4,4
3	Traitement centralisé des déchets	0,0
4	Résidentiel / tertiaire	36,2
5	Agriculture	3,8
6	Transports	17,4

Principales émissions en France, 2018, d'après SOURCES DONNEES CITEPA format SECTEN 2020

Somme des HAP tels que définis par la France, arrêté 02.02.1998 modifié :
benzo(a)pyrène, benzo(b)fluoranthène, benzo(k)fluoranthène, indeno(1,2,3-cd)pyrène, benzo(g,h,i)pérylène, fluoranthène, dibenzo(a,h)anthracène, benzo(a)anthracène.

Résidentiel : Emissions liées aux activités domestiques, notamment dans les bâtiments d'habitation (i.e. : combustion des appareils de chauffage, feux ouverts, engins mobiles non routiers pour le loisir/jardinage, utilisation domestique de solvants, réfrigération et air conditionné, consommation de tabac, traitement des eaux usées, etc.).

Tertiaire : Emissions liées aux activités et bâtiments des entreprises, commerces, institutions et services publics (i.e. : combustion des appareils de chauffage, utilisation de solvants, réfrigération et air conditionné, bombes aérosols, utilisation de feux d'artifices, etc.).

« Les secteurs majoritaires contributeurs en 2018 sont le secteur résidentiel principalement du fait de la combustion de biomasse, le brûlage des résidus de récolte, l'incinération de déchets et dans une moindre mesure la métallurgie des métaux ferreux. » (Rapport mars 2020 de l'Inventaire des émissions de polluants atmosphériques en France métropolitaine, format CEE-NU, CITEPA)

Emissions des 8 HAP réglementés par secteur et spéciation en 2018

8 HAP réglementés en France (arrêté du 02/02/1998 modifié) : benzo(a)pyrène, benzo(b)fluoranthène, benzo(k)fluoranthène, indeno(1,2,3-cd)pyrène, benzo(g,h,i)peryène, fluoranthène, dibenzo(a,h)anthracène, benzo(a)anthracène.

Emissions des HAP-spéciation (t/an)										
Périmètre : Métropole										
	BaP	BbF	BkF	IndPy	Total CEE-NU	BaA	BahA	BghiPe	FluorA	Total 8 HAP
Industrie de l'énergie	0,4	0,6	0,3	0,3	1,5	0,3	0,1	0,6	0,7	3,2
Industrie manufacturière et construction	0,2	0,2	0,2	0,2	0,9	0,3	0,1	0,2	3,0	4,4
Traitement centralisé des déchets	0,01	0,01	0,01	0,01	0,03	0,0001	0,0000	0,0001	0,0002	0,03
Résidentiel / tertiaire	3,1	3,5	2,1	1,9	10,6	4,8	0,3	1,2	19,3	36,2
Agriculture	0,4	0,6	0,3	0,3	1,7	0,1	0,03	0,3	1,7	3,8
Agriculture hors total	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Transports	0,6	0,8	0,6	0,6	2,6	2,0	0,1	1,0	11,7	17,4
Transport hors total	0,1	0,1	0,1	0,1	0,4	0,1	0,02	0,2	1,2	1,8
TOTAL national hors UTCATF	4,7	5,8	3,5	3,3	17,3	7,5	0,6	3,2	36,4	65,0

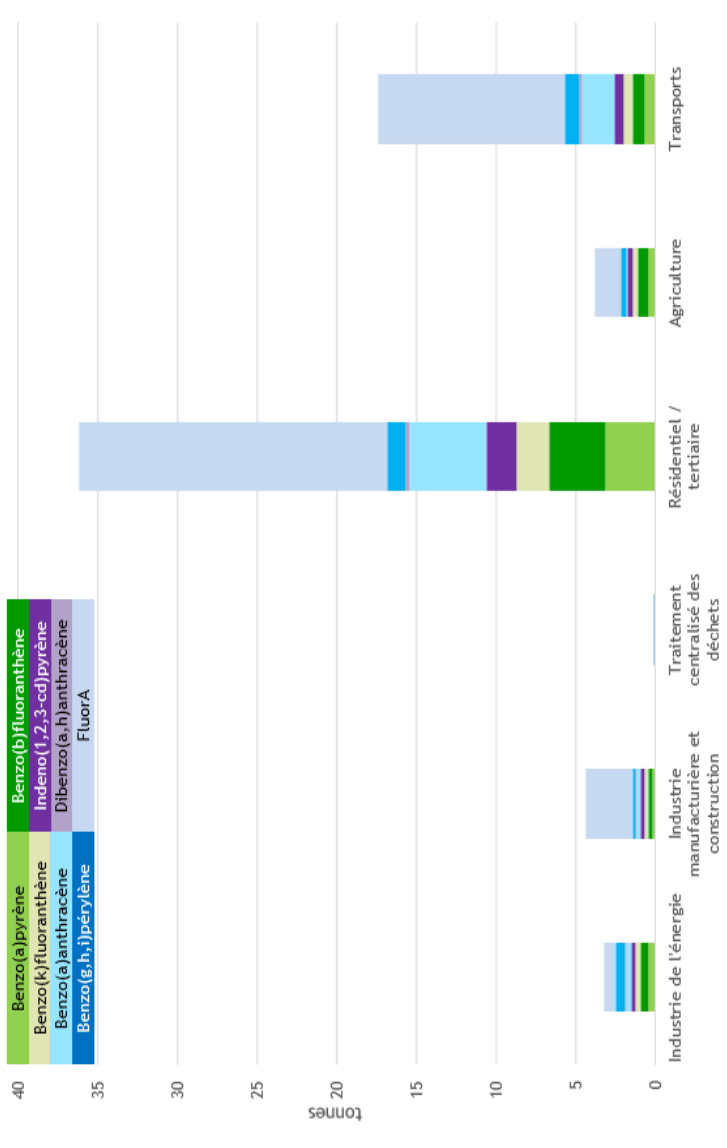
Spéciation par HAP des principales émissions en France, 2018, d'après SOURCES DONNEES CITEPA format SECTEN 2020 (tableau et graphe)

Somme des HAP tels que définis par la France, arrêté 02.02.1998 modifié : benzo(a)pyrène, benzo(b)fluoranthène, benzo(k)fluoranthène, indeno(1,2,3-cd)pyrène, benzo(g,h,i)peryène, fluoranthène, dibenzo(a,h)anthracène, benzo(a)anthracène.

Résidentiel : Emissions liées aux activités domestiques, notamment dans les bâtiments d'habitation (i.e. : combustion des appareils de chauffage, feux ouverts, engins mobiles non routiers pour le loisir/jardinage, utilisation domestique de solvants, réfrigération et air conditionné, consommation de tabac, traitement des eaux usées, etc.).

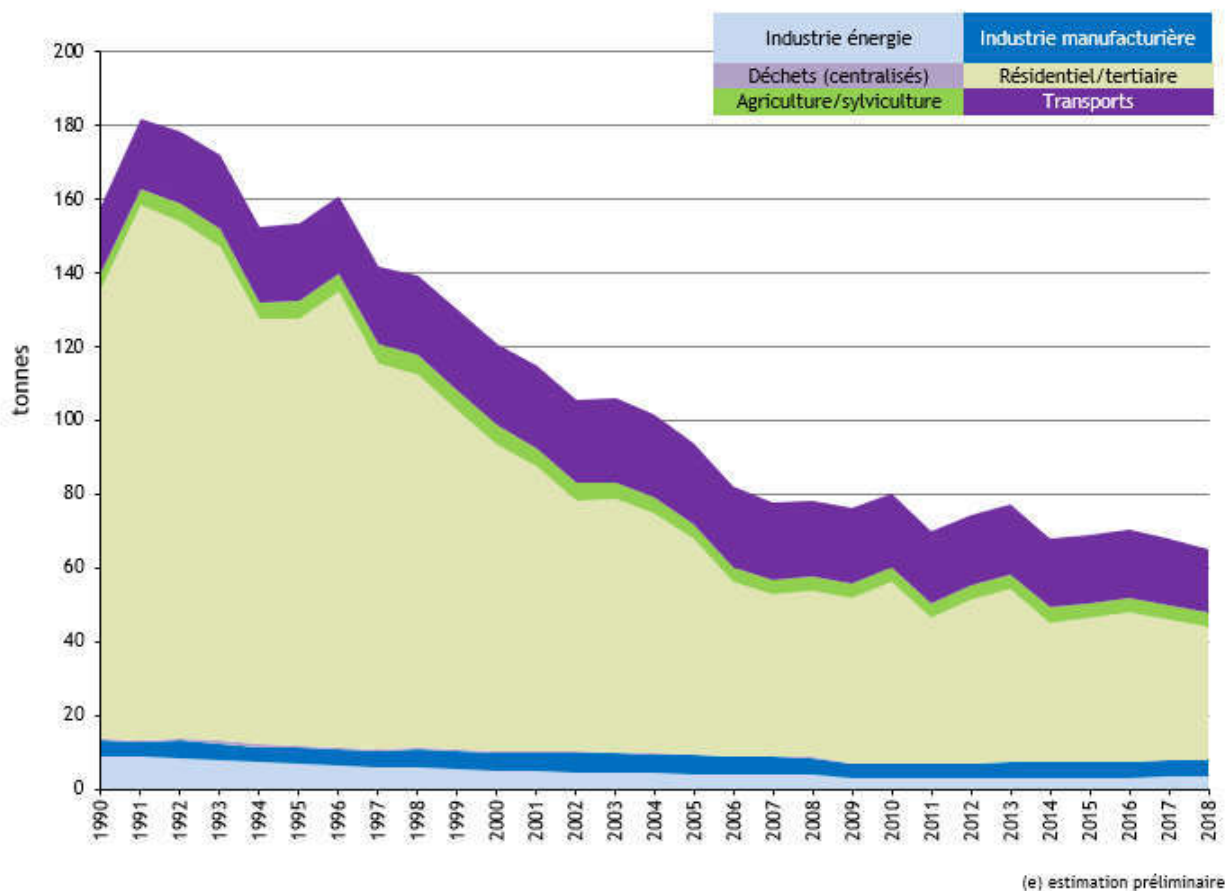
Tertiaire : Emissions liées aux activités et bâtiments des entreprises, commerces, institutions et services publics (i.e. : combustion des appareils de chauffage, utilisation de solvants, réfrigération et air conditionné, bombes aérosols, utilisation de feux d'artifices, etc.).

Pour le CITEPA, dans l'ensemble constitué des huit HAP réglementés en France par l'arrêté du 02.02.1998 modifié, le fluoranthène est annuellement et de loin le composé le plus prédominant en masse suivi du benzo(a)anthracène et du benzo(b)fluoranthène, le benzo(a)pyrène apparaît en 4e position mais il est en revanche le plus toxique en indice de toxicité. (Format Secten sur plusieurs années).



EVOLUTION France, CITEPA 2020

Evolution des émissions dans l'air des 8 HAP réglementés depuis 1990 en France (Métropole)



Graphique : source CITEPA format Secten 2020. HAP tels que définis par la France, arrêté 02.02.1998 modifié : benzo(a)pyrène, benzo(b)fluoranthène, benzo(k)fluoranthène, indeno(1,2,3-cd)pyrène, benzo(g,h,i)pérylène, fluoranthène, dibenzo(a,h)anthracène, benzo(a)anthracène.

Le paragraphe suivant provient de : Rapport mars 2020 de l'Inventaire des émissions de polluants atmosphériques en France métropolitaine, format CEE-NU, CITEPA

« La diminution de plus de la moitié des rejets de HAP dans l'atmosphère entre 1990 et 2018 s'explique principalement par l'évolution du secteur résidentiel (en particulier la combustion de biomasse, qui s'effectue souvent dans des conditions moins bien maîtrisées, en foyer ouvert par exemple) en lien avec un renouvellement progressif des équipements anciens utilisés dans le secteur domestique.

Les émissions sont fortement associées aux conditions climatiques : les pics d'émissions, e.g. en 2010, sont essentiellement dus à l'augmentation de la consommation de bois dans le secteur résidentiel/tertiaire (années au climat froid).

A l'inverse, les émissions plus faibles observées en 2011, 2014 et 2017 coïncident avec la douceur climatique exceptionnelle ces années-là. »

HAP SOURCES ANTHROPIQUES

ANTHROPIQUE										Présence atmosphérique
HAP	raffinage pétrole	différentes utilisations charbon	trafic automobile	huiles	asphalte, goudron	combustion caoutchouc	combustion bois	fumée cigarette	autres	
Acénaphthène ¹	X	X	X ² (diesel)							principalement gazeuse
Anthracène ³	X	X	X	X	X	X				fumées émises de combustions incomplètes
Benzo(a)pyrène ⁴	X	X	X (moteur thermique)	X	X			X		principalement particulaire
Benzo(b)fluoranthène ⁵	X	X	X		X					
Benzo[g,h,i]pérylène ⁶	X	X	X	X			X		boues épuration	associé aux émissions particulières (dont celles des UIOM et UIDIS)
Benzo[k]fluoranthène ⁷		X	X	X				X		principalement particulaire
Chrysène ⁸				X			X			prédominant émissions particulières d'UIOM

Sources anthropiques de certains HAP, tableau non

exhaustif et donné à titre d'indication

¹ INERIS, Fiche de données toxicologiques et environnementales des substances chimiques, mise à jour 21.11.2005² HAP majoritaire dans les phases gazeuse et particulaire des émissions diesel avec le fluorène et le phénanthrène.³ INERIS, Fiche de données toxicologiques et environnementales des substances chimiques, mise à jour 25.05.2005⁴ INERIS, Fiche de données toxicologiques et environnementales des substances chimiques, mise à jour 26.07.2006⁵ INERIS, Fiche de données toxicologiques et environnementales des substances chimiques, mise à jour 07.02.2005⁶ INERIS, Fiche de données toxicologiques et environnementales des substances chimiques, mise à jour 29.09.2011⁷ INERIS, Fiche de données toxicologiques et environnementales des substances chimiques, mise à jour 07.02.2005⁸ INERIS, Fiche de données toxicologiques et environnementales des substances chimiques, mise à jour 29.09.2011

ANTHROPIQUE										Présence atmosphérique
HAP	raffinage pétrole	différentes utilisations charbon	trafic automobile	huiles	asphalte, goudron	combustion caoutchouc	combustion bois	fumée cigarette	autres	
Dibenzo[a,h]anthracène ¹		X	X (diesel surtout)	X				X		
Fluoranthène ²			X		X		X			HAP prédominant dans les émissions UIOM
Fluorène ³	X	X	X ⁴	X	X		X	X		émissions UIOM
Indéno[1,2,3-cd]pyrène ⁵			X (moteur thermique)	X			X	X		émissions UIOM, fumées industrielles
Naphtalène ⁶		X					X (surtout)	X		
Phénanthrène ⁷			X ⁸	X			X	X		
Pyrène ⁹		X	X	X	X			X	fonderies	

¹ INERIS, Fiche de données toxicologiques et environnementales des substances chimiques, mise à jour 13.07.2006² INERIS, Fiche de données toxicologiques et environnementales des substances chimiques, mise à jour 09.03.2005³ INERIS, Fiche de données toxicologiques et environnementales des substances chimiques, mise à jour 21.11.2005⁴ HAP majoritaire dans les phases gazeuse et particulaire des émissions diesel avec l'acénaphthène et le phénanthrène⁵ INERIS, Fiche de données toxicologiques et environnementales des substances chimiques, mise à jour 25.05.2005⁶ INERIS, Fiche de données toxicologiques et environnementales des substances chimiques, mise à jour 08.03.2011⁷ INERIS, Fiche de données toxicologiques et environnementales des substances chimiques, mise à jour 15.06.2010⁸ HAP majoritaire dans les phases gazeuse et particulaire des émissions diesel avec l'acénaphthène et le fluorène⁹ INERIS, Fiche de données toxicologiques et environnementales des substances chimiques, mise à jour 23.02.2005

APPORT DES INDICES DE TOXICITE

La répartition des différents HAP selon les sites méritera d'approcher un regard différentiel sur la composition de la charge en HAP. Deux approches complémentaires seront utilisées : par molécule et selon l'introduction des indices de toxicité, présentés ci-avant.

Des facteurs d'équivalence toxique ont été proposés pour les molécules de HAP par plusieurs auteurs. Le tableau ci-dessous cite ces données rapportées par Amiard J.C, 2011.

HYDROCARBURES AROMATIQUES POLYCYCLIQUES (HAP)	FACTEURS DE TOXICITÉ
Naphtalène	0.001
Phénanthrène	0.001
Acénaphthylène	0.001
Acénaphthène	0.001
Pyrène	0.001
Fluorène	0.001
Anthracène	0.01
Fluoranthène (1)	0.01
Benzo(g,h,i)pérylène	0.01
Chrysène	0.01
Benzo(a)anthracène	0.1
Benzo(b)fluoranthène	0.1
Benzo(k)fluoranthène	0.1
Indéno(1,2,3-c-d)pyrène	0.1
Dibenzo(a,h)anthracène (2)	1
Benzo(a)pyrène	1

Tableau des indices de toxicité des HAP 16

D'après J.C Amiard, « Les risques chimiques environnementaux, 2011 », p.418.

- (1) : En fonction des auteurs, l'indice de toxicité de cette molécule peut être différent (0.01 : cf. Kalberlah et al., 1995 cité dans l'OMS 1998 (IPCS) ; Baars et al., 2001 ; Hoogenboom et al., 2003 / – 0.001 : Nisbet et Lagoy, 1992 ; INERIS). Le choix d'appliquer 0,01 pour le fluoranthène par Aair Lichens s'explique par une volonté de ne pas minimiser les résultats de l'Indice de Toxicité. Il est préférable de se positionner avec une marge de sécurité car il s'agit, selon les données du CITEPA, du HAP le plus émis dans l'atmosphère en France. Ainsi, nous suivons aussi J.C.Amiard et des préconisations plus récentes que Nisbet et Lagoy.
- (2) Précisons que dans l'échelle de Nisbet et Lagoy – 1992, cette molécule présente un indice de toxicité de 5. Nous avons appliqué les préconisations de l'INERIS et de JC Amiard.

Rappel des 8 HAP concernés par la réglementation en France : benzo(a)pyrène, benzo(b)fluoranthène, benzo(k)fluoranthène, indéno(1,2,3-cd)pyrène, benzo(g,h,i)pérylène, fluoranthène, dibenzo(a,h)anthracène, benzo(a)anthracène.

Les travaux d'Aair Lichens, dans le cadre du suivi de chaufferies bois, ont conduit à obtenir des résultats de dosages de HAP pouvant être élevés et comparables à ceux relevés sous l'influence d'une importante circulation automobile. L'application des facteurs d'équivalence toxique ont alors permis de discriminer les résultats en fonction de la toxicité des molécules impliquées.

FICHE BENZO[a]PYRENE, mise à jour Mars 2021

Cette fiche liée au Benzo[a]pyrène ou B[a]P est à consulter en complément de la fiche HAP. En effet, certaines informations générales déjà citées dans cette dernière ne sont pas répétées ici. De plus, il faut prendre en considération le fait que la population est généralement exposée à un mélange d'HAP.

Par ailleurs, il s'agit d'une fiche informative et non exhaustive.

Les éléments présentés proviennent des sources suivantes : INERIS¹³, IARC¹⁴, INRS¹⁵, INC¹⁶, CITEPA¹⁷, OEHHA¹⁸, ANSES¹⁹.

IDENTIFICATION

Substance chimique	N° CAS	N° EINECS	Synonymes	Forme physique (*)
Benzo[a]pyrène 	50-32-8	200-028-5	B[a]P Benzo[def]chrysène Benz[a]pyrene 3,4-benzopyrene 3,4-benz[a]pyrene 3,4-benzopyrene	solide cristallisé

(*) dans les conditions ambiantes habituelles

INFORMATIONS PHYSICO-CHIMIQUES	
Etat physique; apparence CRISTAUX PALE YELLOW.	Formule: C ₂₀ H ₁₂
Dangers physiques	Masse moléculaire: 252.3
Dangers chimiques	Point d'ébullition: 496°C
Réagit avec les oxydants puissants. Se décompose lors de chauffage. Cela produit des fumées toxiques.	Point de fusion: 178.1°C
	Densité (à 20°C): 1.4 g/cm ³
	Solubilité dans l'eau, g/100ml à 20°C: < 0.1 (faible)
	Pression de vapeur à 20°C: négligeable
	Coefficient de partage octanol/eau (log Pow): 6.04

Le B(a)P est un composé pentacyclique. Très peu soluble dans l'eau, il est soluble dans de nombreux solvant organiques (aromatiques, chlorés). Stable jusqu'à des températures très élevées, il s'oxyde sous l'influence de la lumière, de l'air et de la chaleur lorsqu'il est en solution. Il présente un haut poids moléculaire (5 cycles) et une absorption théorique majoritaire sous forme particulaire.

Concentrations ubiquitaires, INERIS 2019

Milieu	Cours d'eau Eaux souterraines	Sol (Nord de la France)
Concentration	0,01 à 0,1 µg/L ⁻¹	0,01 à 0,25 mg/kg ⁻¹

¹³ INERIS, Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques (HAPs), évaluation de la relation dose-réponse pour des effets cancérogènes : approche substance par substance (facteurs d'équivalence toxique – FET) et approche par mélanges ; évaluation de la relation dose-réponse pour des effets non cancérogènes : Valeur Toxicologiques de Référence (VTR), DRC-03-47026-ETSC-BDo-N°03DR177.doc-Version 1-3, 18.12.2003 mise à jour 03 janvier 2006, 64p

INERIS, Fiches de données toxicologiques et environnementales des substances chimiques, Benzo[a]pyrène, DRC-01-25590-00DF252.doc, 26.07.2006. / DRC-18-170856-11671B 12/12/2019

INERIS, Bilan des choix de VTR disponibles sur le portail des substances chimiques de l'INERIS, DRC-18-170856-11674A, 28.01.2019

¹⁴ IARC Working Group, International Agency for Research on Cancer, Benzo[a]pyrene, Monograph 100F-14, 36, Sup 7, 92, Cas No. 50-32-8, 2012, 34p. CIRC : Centre International de Recherche sur le Cancer.

¹⁵ INRS, Institut National de Recherche et de Sécurité, *Fiche Toxicologique FT 144 : Benzo[a]pyrène*, 2007

INRS, *Carte récapitulative toxicologique Benzo(a)pyrène OMS OIT UE*, 2018.

INRS, *Cartographie des expositions aux hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) par secteur d'activité : focus sur la surveillance biologique des expositions professionnelles*, TC 162, Grand Angle, Références en santé au travail, n°154, pp.51-63, Juin 2018

¹⁶ INC, Institut National du Cancer, Fiches repère, Risques de cancers et perturbateurs endocriniens, juillet 2009.

¹⁷ CITEPA, format SECTEN.

¹⁸ OEHHA, Office of Environmental Health Hazard Assessment, Benzo(a)Pyrène, Public Health Goals for chemicals in Drinking Water, september 2010, 68p.

¹⁹ ANSES, 2019 – Particules de l'air ambiant extérieur, Effets sanitaires des particules de l'air ambiant extérieur selon les composés, les sources et la granulométrie, Rapport d'expertise collective, juillet 2019, Edition scientifique, Saisine n° 2014-SA-0156, 494p.

EXPOSITION

Comme les autres HAP, le Benzo[a]pyrène se rencontre lors de la combustion incomplète ou de la pyrolyse de matériaux organiques, en particulier des combustibles fossiles et du tabac : suies, fumées de toutes sortes, gaz d'échappement, fumées de cigarette, etc. Le CIRC précise qu'il peut se retrouver dans l'air, l'eau, le sol, les sédiments ; généralement en de petites quantités sauf au plus proche des sources. La fumée de tabac contient de fortes concentrations.

Par ordre décroissant (INRS) : goudron de houille et dérivés (huiles anthracéniques et brai) ; huiles de schiste ; huiles minérales, extraits aromatiques et paraffines brutes tirés du pétrole ; certains bitumes ; noir de carbone.

De plus, certains procédés pouvant former des aérosols peuvent en contenir (INRS) : cokeries ; fabrication et utilisation des électrodes (industrie de l'aluminium) ; fonderies de fonte et d'acier ; fabrication d'agglomérés de charbon ; épandage routier ; opération d'usinage, de trempe ; nettoyage des fours et tuyauteries.

L'exposition se fait par inhalation mais elle peut aussi être cutanée voire digestive (des HAP sont formés lors de la cuisson et pendant des périodes de pollution atmosphérique, ils se déposent sur l'alimentation- INERIS OMS). L'OEHA précise que par inhalation, en plus des activités industrielles, les fumées d'échappement sont une source majeure de B(a)P dans les villes, en particulier pour les non-fumeurs.

Demi-vie

L'INERIS (2006, 2019) rapporte que le B(a)P réagit en présence d'ozone et de dioxyde d'azote avec des durées de vie de 1,8 jour et 19 jours respectivement. Au contraire, dans les sols, il est peu dégradable avec des variations de 57 à 530 jours (températures de 10 à 30°C).

EFFETS SUR LA SANTE

Classification et étiquetage

Selon les critères du SGH ONU



Peut provoquer une allergie cutanée
Peut provoquer le cancer
Peut induire des anomalies génétiques
Peut nuire à la fertilité ou au fœtus
Très toxique pour les organismes aquatiques, entraîne des effets néfastes à long terme

Le contenu de cette partie est ciblé sur le Benzo(a)pyrène et est à comprendre en complément des effets sur la santé cités dans la fiche HAP.

Le B[a]P est absorbé par voie orale, pulmonaire ou cutanée. Il est distribué largement dans l'organisme et métabolisé en de nombreux métabolites. L'excrétion est majoritairement par voie digestive et plus faiblement rénale.

Toxicocinétique, INERIS 2006, 2019 et INRS 2007

Par voie digestive et par inhalation, le benzo(a)pyrène est absorbé rapidement mais dépend de la taille des particules.

Le B[a]P est métabolisé au niveau cutané : par voie cutanée, absorption estimée à 3% après 24h sur un modèle in vitro de peau d'origine humaine, lésions locales constatées en cas d'applications cutanées.

Le B[a]P est rapidement distribué dans les différents organes internes en quelques minutes à quelques heures. En raison de sa forte liposolubilité, il est stocké dans les glandes mammaires et les autres organes riches en graisses. Il est ensuite progressivement relargué dans la circulation sanguine.

Le B[a]P apparaît dans les canaux lymphatiques thoraciques 3 à 4 heures après administration intragastrique. Son absorption sur la muqueuse intestinale semble précéder une diffusion passive à travers la paroi. L'absorption à travers l'épithélium pulmonaire est rapide.

La majeure partie de la radioactivité est éliminée du foie et des reins en 24h, mais elle reste constante dans le cerveau, la rate et les testicules. Le pic d'accumulation dans les intestins atteint son maximum entre 3h et 6h après l'exposition et diminue rapidement.

Elimination

Le système hépatobiliaire et le tractus gastro-intestinal sont les voies principales d'élimination du B[a]P et de ses métabolites, quelle que soit la voie d'exposition. La forte excrétion fécale (70-75 % d'une dose sous-cutanée chez la souris) suggère l'existence d'un cycle entérohépatique.

L'excrétion urinaire est une voie mineure. Chez le rat et la souris (4-12 % d'une dose sc), le maximum d'élimination se situe entre 24h et 48h, la majeure partie de la dose urinaire totale étant excrétée en 72h.

Il n'y a pas d'élimination dans l'air expiré.

Toxicité

Apport des indices de toxicité

Introduction des indices de toxicité. Des facteurs d'équivalence toxique ont été proposés pour les molécules de HAP par plusieurs auteurs. Le benzo(a)pyrène présente l'indice de toxicité le plus élevé (voir la fiche HAP pour les autres HAP), au même titre que le dibenzo(a,h)anthracène.

HYDROCARBURES AROMATIQUES POLYCYCLIQUES	FACTEURS / INDICE DE TOXICITÉ
Benzo(a)pyrène	1

Risques et effets non carcinogènes

Risque inhalatoire : Une concentration dangereuse de particules en suspension dans l'air peut être atteinte rapidement par dispersion.

Effets liés à une exposition prolongée ou répétée :

Le contact répété ou prolongé peut provoquer une sensibilisation cutanée, il est légèrement irritant pour la peau. Le B(a)P est génotoxique : il peut provoquer des altérations génétiques héréditaires touchant les cellules germinales humaines.

Il peut être toxique pour la reproduction ou le développement chez l'homme : il entraîne des atteintes des organes de la reproduction chez les femelles et les mâles. Il traverse la barrière placentaire chez l'animal et est embryo- et foetotoxique. L'UE a classé le B[a]P toxique pour la reproduction, catégorie 2 (fertilité et développement).

Il peut causer des troubles du métabolisme et de la santé respiratoire (ANSES, 2019 – étude de Zhang, 2017).

Voie orale : L'ingestion répétée provoque une atteinte de l'état général ainsi qu'une aplasie médullaire mortelle sur certaines souches animales.

Environnement : le B(a)P est très toxique pour les organismes aquatiques. Une bioaccumulation peut se produire dans les poissons, les plantes et les mollusques et peut causer des effets à long terme sur l'environnement aquatique.

Effets carcinogènes

Il est reconnu depuis longtemps que le benzo(a)pyrène est cancérigène et il est notamment cité en tant que molécule à effets perturbateurs endocriniens liés aux risques de cancers (INC, INSERM).

D'après l'OMS (1987), le risque estimé de cancer du poumon relié à l'exposition de 1 ng/m³ de B(a)P pour toute une vie serait de 9 x 10⁻⁵ (Garivait et al., 1999).

Il est reconnu comme un déclencheur de cancer bronchopulmonaire à long terme (ANSES, 2019 – étude de 2018 par Widziewicz).

Par rapport au risque cancérigène, la formation d'adduits à l'ADN semble être le mécanisme principal (INSERM 2001 dans INERIS 2006).

Le B[a]P est un cancérigène local et systémique pour de nombreuses espèces animales par voie inhalatoire, orale, cutanée et intratrachéale, par injection et par exposition transplacentaire. Il a été classé cancérigène catégorie 2 au niveau de l'Union européenne ; le CIRC l'a introduit dans le groupe 1 des agents cancérigènes pour l'homme (INRS 2007).

La cancérogénicité du benzo(a)pyrène est en partie liée à sa transformation en benzo(a)pyrène-4-5-époxyde. Il s'agit d'un des composés les plus toxiques parmi les HAP, il est mutagène et fortement cancérigène (CITEPA).

Substance Chimique (CAS)	Voies d'exposition	Taux d'absorption		Organe cible
		Homme	Animal	
Benzo(a)pyrène (50-32-8)	Inhalation	ND	ND	ND
	Ingestion	ND	20 %	Estomac, Foie, Reins Organes lymphoïdes (thymus, rate, moelle osseuse)
	Cutanée	3 %*	0,1 à 10 %*	Peau

Effets systémiques, INERIS 2019.

APERCU DE LA REGLEMENTATION - non exhaustif -

- Le B(a)P rentre en compte dans diverses Règlements depuis longtemps :
- Convention sur la Pollution Atmosphérique Transfrontière à Longue Distance (CEENU) : le Protocole d'Aarhus sur les Polluants organiques persistants de 1998 entré en vigueur en 2003.
- Règlement UE 2019/1021 du Parlement Européen et du Conseil du 20 juin 2019 concernant les polluants organiques persistants (refonte) qui abroge le règlement n°850/2004 du 29 avril 2004 et réitère que le benzo(a)pyrène doit faire l'objet d'inventaire d'émissions des rejets²⁰.
- L'application du Règlement européen REACH : (enRegistrement, Évaluation, Autorisation, restriction des substances CHimiques), d'application obligatoire depuis le 1er juin 2008. Cette réglementation concerne plus de 30 000 substances chimiques parmi lesquelles le benzo(a)pyrène.
- Directive 2004/107/CE du Conseil du 15 décembre 2004 concernant l'arsenic, le mercure, le nickel et les hydrocarbures aromatiques dans l'air ambiant. Valeur cible : 1 ng/m³, valeur limite à partir du 31 décembre 2012.
- OMS directive pour la qualité de l'air 2000. Excès de Risque Unitaire par inhalation (ERU_i) pour un mélange de HAP (probabilité de développer un cancer du poumon après une exposition vie entière). Les effets induits sont attribués au seul benzo[a]pyrène retenu alors comme indicateur. L'ERU_i établi par l'OMS est de 8,7.10⁻² (g/ m³).
- Il est inclus dans la réglementation française, notamment au titre des ICPE (arrêté du 2 février 1998 modifié -arrêtés relatifs aux installations de combustion soumises à déclaration ou à autorisation- qui impose des valeurs limites d'émission, arrêté du 31 janvier 2008 modifié relatif au registre et à la déclaration annuelle des émissions polluantes et des déchets).
- La norme NF X43-329 de mai 2003 est prescrite pour la mesure à l'émission dans l'air des HAP des sources fixes (8 HAP dont le B(a)P).
- On le rencontre aussi dans des mesures de sécurité et santé au travail (Code du Travail, Code de la Sécurité Sociale), dans le transport, ou encore le Programme de recherche sur les perturbateurs endocriniens, etc.
- Concernant l'alimentation, le règlement UE 835/2011 du 19 août 2011 modifie le règlement (CE) n°1831/2006 en ce qui concerne les teneurs maximales pour les hydrocarbures aromatiques polycycliques dans les denrées alimentaires et en particulier les teneurs de benzo(a)pyrène. Il ajoute des teneurs limites pour la somme du benzo(a)pyrène, du benzo(a)anthracène, du benzo(b)fluoranthène et du chrysène.
- Il est également retrouvé dans les décrets, directives et règlement pour la qualité des eaux destinées à la consommation humaine (France, UE, OMS).

Valeurs limites d'exposition professionnelle

La CNAM (Caisse Nationale de l'Assurance Maladie) recommande une valeur inférieure à 150 ng par m³ d'air respiré de B(a)P. La présence de B[a]P dans la fumée de tabac est certainement une des causes de son action cancérogène et ajoute un risque supplémentaire pour le fumeur exposé professionnellement (INRS 2007). Ainsi, si la contribution du tabagisme est marginale dans les milieux à forte exposition (comme cokerie), lorsque l'exposition est faible, les niveaux mesurés sont fortement influencés voire dominés par le tabagisme (INRS 2018).

Recommandations : Le B[a]P est un cancérogène puissant et sa présence est associée à celle d'autres hydrocarbures aromatiques poly cycliques (HAP) dangereux, parfois aussi redoutables. Toutes dispositions doivent être prises pour réduire au niveau le plus bas possible l'exposition. Des mesures rigoureuses de prévention s'imposent lors de travaux pouvant exposer le personnel à ces produits (INRS 2007).

²⁰ Avec les benzo(b)fluoranthène, benzo(k)fluoranthène et indeno(1,2,3-cd)pyrène.

Mesurer l'exposition sanitaire individuelle au B(a)P

Mesurer l'exposition au B(a)P, INRS 2007-2018

Un protocole de dosage du 3-hydroxybenzo[a]pyrène (3-OHBP) urinaire, métabolite du B(a)P a été mis au point et validé par l'INRS. Il est représentatif des HAP cancérigènes. Puisque le 3-OHBP est présent en faible quantité dans les urines, la technique analytique doit être très sensible et est moins pertinente pour les expositions faibles en raison de l'atteinte des valeurs de quantification.

L'INRS recommande le dosage du 3-OHBP en début de poste en début de semaine de travail, pour mesurer le niveau de base après 48 h de non-exposition. Compte tenu du décalage moyen de 16 h entre la fin d'exposition et le maximum d'excrétion du 3-OHBP, il faut prélever en début de poste du deuxième jour pour connaître l'exposition de la veille.

Correspondant à une exposition journalière en B(a)P atmosphérique de 150 ng/m³ (recommandation CNAM), l'INRS propose une valeur seuil de 0,35 nmol/mol de créatinine (0,83 ng/g de créatinine) en début de poste au 2^{ème} jour. La valeur seuil proposée pour le début de poste du 5^{ème} jour, 0,40 nmol/mol de créatinine (0,95 ng/g de créatinine), tient compte d'une accumulation éventuelle au cours de la semaine.

La Commission allemande DFG propose 0,70 ng/g de créatinine pour une exposition à 70 ng/m³.

Mesurer l'exposition au B(a)P, INERIS 2003 mise à jour 2006

Voie orale

Pour une exposition par voie orale à un mélange de HAP, l'INERIS propose d'utiliser l'approche substance par substance (FET Facteur Equivalent Toxique), car cette approche est standardisée et permet d'évaluer le risque induit par tous les types de mélanges.

Concernant le choix de la valeur d'excès de risque unitaire par voie orale pour le benzo[a]pyrène, l'INERIS appuie l'avis de l'AFSSA (2003) et propose de retenir l'ERU_i (Excès de Risque Unitaire) établi par le RIVM, soit une dose virtuellement sûre de 5 ng/kg p.c/j pour un excès de risque de cancer de 1 10⁻⁶, ce qui correspond à un ERU_i de 0,2 (mg/kg/j)⁻¹.

Inhalation

Pour une exposition par inhalation à un mélange de HAP, l'INERIS conseille de prendre en compte le seul Excès de Risque Unitaire (ERU_i) spécifique du benzo[a]pyrène, soit l'ERU_i de 1,1 10⁻³ (µg/m³)⁻¹ proposé par l'OEHHA et de lui appliquer les FET. Il convient de remarquer que compte tenu des incertitudes, la valeur de l'OMS (8,7 10⁻² (µg/m³)⁻¹) n'est pas significativement différente de celle proposée par l'OEHHA (1,1 10⁻³ (µg/m³)⁻¹).

Secteurs exposés, INRS 2018

Après une étude complexe basée sur l'évaluation bibliographique d'études sur l'exposition aux HAP et au B(a)P, il apparaît que les niveaux les plus élevés se trouvent dans des secteurs déjà connus comme la cokerie (forte concentration en B(a)P surtout pour les opérateurs de fours à coke), l'industrie de l'aluminium, l'électrometallurgie. Mais des secteurs plus récents sont également observés : traitement thermique par pyrolyse de gaz hydrocarboné (par exemple la cémentation gazeuse basse pression).

Pour les travaux de revêtement routier, le profil d'exposition aux HAP prioritairement cancérigènes est quantitativement moins important que pour les secteurs ci-dessus. Ainsi, le goudron de houille est progressivement abandonné pour le bitume qui contient 1000 fois moins de B(a)P que le goudron, les températures mises en œuvre sont moins élevées, système de captage des fumées, protection individuelle...

Choix de VTR (Valeurs Toxicologiques de Référence), INERIS 2019

Type d'effet	Substances chimiques (CAS)	Voie d'exposition	Facteur d'incertitude	Valeur de référence	Source, Année de révision	Date de choix
Effets à seuil	Benzo(a)pyrène (50-32-8)	Inhalation (chronique)	3 000	RfC = 2. 10 ⁻⁴ mg.m ⁻³	US EPA (IRIS), 2017	INERIS, 2018
Effets à seuil	Benzo(a)pyrène (50-32-8)	Orale (chronique)	1 000	RfD = 3. 10 ⁻⁴ mg.kg ⁻¹ .j	US EPA (IRIS), 2017	INERIS, 2018

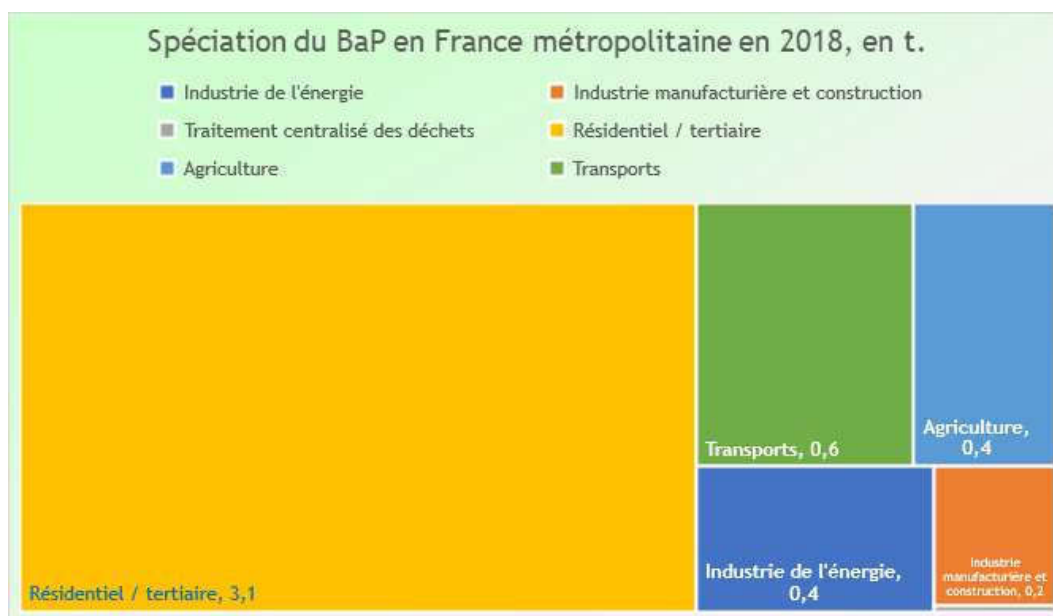
Sources Anthropiques INERIS, Fiche de données toxicologiques, mise à jour 26.07.2006 – non exhaustif, informatif.

ANTHROPIQUE										Présence atmosphérique
HAP	raffinage pétrole	différentes utilisations charbon	trafic automobile	huiles	asphalte, goudron	combustion caoutchouc	combustion bois	fumée cigarette	autres	
Benzo(a)pyrène ¹	X	X	X (moteur thermique)	X	X			X		principalement particulaire

Emissions dans l'air en France Métropolitaine en 2018, CITEPA format Secten 2020

Pour le CITEPA, dans l'ensemble constitué des huit HAP réglementés en France par l'arrêté du 02.02.1998 modifié, le fluoranthène est le composé le plus proéminent en masse suivi du benzo(a)anthracène et du benzo(b)fluoranthène, le benzo(a)pyrène étant en 4e position mais le plus toxique en indice de toxicité. (Format Secten sur plusieurs années).

Le Benzo(a)pyrène est principalement émis par le secteur résidentiel/tertiaire et, dans une moindre mesure, le transport. Le traitement centralisé des déchets ne représente qu'une part infinitésimale.



Spéciation du Benzo(a)pyrène, D'après SOURCES DONNEES CITEPA FORMAT SECTEN 2020 - Graphique Air Lichens

Résidentiel : Emissions liées aux activités domestiques, notamment dans les bâtiments d'habitation (i.e. : combustion des appareils de chauffage, feux ouverts, engins mobiles non routiers pour le loisir/jardinage, utilisation domestique de solvants, réfrigération et air conditionné, consommation de tabac, traitement des eaux usées, etc.). **Tertiaire** : Emissions liées aux activités et bâtiments des entreprises, commerces, institutions et services publics (i.e. : combustion des appareils de chauffage, utilisation de solvants, réfrigération et air conditionné, bombes aérosols, utilisation de feux d'artifices, etc.).

RAPPORTS D'ANALYSES ET EXPLOITATION

Les fiches d'interprétation des dosages et de prestation intellectuelle incluses dans les annexes sont issues de la recherche d'AAIR LICHENS et de son savoir-faire.

Les dosages sont effectués par CARSO