



Matière : Pollution Atmosphérique et son Impact sur la Biosphère

Programme

INTRODUCTION

Chapitre I: Les émissions et émetteurs de pollution atmosphérique

1. Les différents types d'émetteurs
 - 1.1. Les sources non-anthropiques ou naturelles
 - 1.2. Les sources anthropiques
2. La nomenclature Corinair

Chapitre II : Les substances polluantes

1. Introduction
2. Les différents types d'émetteurs
 - 2.1. Les polluants primaires et secondaires
 - 2.2. Les polluants réglementés
 - 2.3. Les dérivés gazeux du carbone, du soufre et de l'azote
 - 2.4. Les composés organiques
 - 2.5. Les métaux lourds
 - 2.6. Les Particules atmosphériques
 - 2.7. Les Chlorofluorocarbones CFC
3. La spéciation chimique

Chapitre III : Les effets des différentes substances

Chapitre IV : Conséquences écologiques des pollutions atmosphériques

INTRODUCTION

La pollution en générale, est une dégradation de l'environnement (atmosphérique, aquatique ou terrestre) par toute modification de la composition normale d'un écosystème ou de l'introduction directe ou indirecte des substances (chimiques ou radioactives), des déchets (ménagers ou industriels) ou des nuisances diverses (sonores, lumineuses, olfactives, thermiques, biologiques, etc), susceptible de porter atteinte au bon fonctionnement des écosystèmes ou à la santé des êtres vivants. Bien que la pollution puisse avoir une origine entièrement naturelle (éruption volcanique, par exemple), elle est principalement liée aux activités humaines. La pollution, ou contamination, atteint un niveau seuil où elle produit des dommages, des déséquilibres ou des effets nocifs et interfère avec le bien-être des organismes vivants.

En s'intéressant de notre atmosphère, on entend par sa pollution, la contamination de l'environnement intérieur ou extérieur par un agent chimique, physique ou biologique qui modifie les caractéristiques naturelles de l'air (OMS, 2005). Selon la Loi sur l'air et l'utilisation rationnelle de l'énergie de 1996, la pollution atmosphérique est définie comme : "l'introduction par l'homme, directement ou indirectement, dans l'atmosphère et les espaces clos, de substances ayant des conséquences préjudiciables de nature à mettre en danger la santé humaine, à nuire aux ressources biologiques et aux écosystèmes, à influencer sur les changements climatiques, à détériorer les biens matériels, à provoquer des nuisances olfactives."

Les principales causes de la pollution de l'air sont en relation avec l'emploi des combustibles fossiles (charbon, pétrole et gaz). La combustion de ces matières premières se produit principalement, au cours ou dans le fonctionnement des secteurs industriel et du transport terrestre. Dans le secteur industriel il faut différencier les fabriques (par exemple, de ciment ou d'acier) et les centrales de production d'électricité (qui produisent la moitié de l'électricité consommée dans notre pays).

La pollution de l'air a un impact négatif sur la santé, les végétaux, les écosystèmes et les bâtiments : les effets sont nombreux et certains n'ont été que récemment documentés et pris en compte (par exemple les effets relatifs à l'acidification, l'eutrophisation et la pollution photochimique, les effets des rejets de gaz carbonique et autres gaz à effet de serre sur le changement climatique, ou les effets des particules fines sur la santé). Il n'existe pas en général de seuil de nocivité mais plutôt une relation croissante entre les effets et les niveaux de pollution, parfois assortis de phénomènes cumulatifs, comme pour certaines expositions chroniques

Pour mieux connaître et maîtriser la pollution de l'air, il est nécessaire de savoir quelles sont les sources de pollution, de les identifier et les quantifier. Cette connaissance permet ensuite de prendre des mesures de réduction des émissions à la source. Les inventaires d'émissions sont également une donnée de base nécessaire pour réaliser des évaluations de qualité de l'air et estimer les impacts de cette pollution sur la santé, les écosystèmes ... Signée en 1979, la convention de Genève sur la pollution atmosphérique à longue distance a été l'élément déclencheur des réflexions et tentatives pour organiser et structurer les données relatives aux rejets de polluants sous la forme d'inventaires d'émissions de polluant. Cette dynamique a ensuite été relayée par un programme de la Commission Européenne Corinair, qui a permis de générer le premier inventaire d'émission Corinair.

Chapitre I : Les émissions et émetteurs de pollution atmosphérique

Les inventaires d'émissions posent le problème de l'exhaustivité. L'exhaustivité du recensement des émetteurs de polluants en est un aspect. Bien souvent, les inventaires recensent les émetteurs qui contribuent le plus significativement aux émissions d'une substance donnée, l'importance des contributions est bien souvent jugée a priori, sur la base de connaissances scientifiques parfois parcellaires. En fonction des besoins, des moyens sont investis pour combler les lacunes de cette connaissance. Identifier correctement les émetteurs est une étape importante de l'élaboration d'un inventaire. Mais l'identification des émetteurs correspond également à d'autres préoccupations plus politiques : connaître la contribution des différents secteurs permet de mettre en place des politiques de réductions des émissions plus efficaces car mieux ciblées. Cette connaissance est également la base des taxations en cas de dépassement de plafonds réglementaire (par exemple, permis d'émettre du CO₂) (Tab.01).

1. Les différents types d'émetteurs

Parmi tous les émetteurs potentiels de polluants, on a tendance à distinguer différentes catégories d'émetteurs :

1.1. Les sources non-anthropiques ou naturelles

Il s'agit des sources induisant des rejets de substances polluantes mais qui ne sont pas liées à l'activité humaine. Parmi ces sources, on peut également distinguer les sources biogéniques (liées à la présence d'organismes vivants) des autres sources. L'éruption volcanique (dégagement très important de produits souffrés) est un exemple de source naturelle, de même que la production d'embruns marins (particules). Pour les sources biogéniques, il n'est pas toujours évident de classer le type de sources (cas de l'élevage d'animaux).

1.2. Les sources anthropiques

Ces sources sont le fait de l'activité humaine. Cependant, la frontière entre les sources anthropiques et naturelles n'est pas toujours bien délimitée.

Parmi les sources anthropiques, on oppose souvent les sources fixes, émises par des installations ne se déplaçant pas, des sources mobiles liées aux transports. Une autre notion est également importante pour la caractérisation des sources et de leur distribution géographique : c'est la notion de source ponctuelle, qui caractérise plutôt les grands sites industriels (points sources) : elles sont étudiées en conjonction avec des données concernant leur localisation, leur capacité, leur activité... Les sources ponctuelles définies par Corinair (voir cidessous) sont : les usines de production ayant une capacité thermique supérieure à 300 MW, les raffineries, les fabriques d'acide sulfurique, d'acide nitrique, les unités de production de fer ou d'acier supérieures à 3 Mt/an, les usines de pâtes à papier de capacité supérieure à 1000 kt/an, les usines de peinture de voitures ayant une production supérieure à 100000 veh/an, les aéroports de plus de 100000 LTO1 anding Take Off : cycle normalisé de tests des moteurs d'avions cycles /an, toutes les usines émettant plus de 1000 t/an de SO₂, NO_x ou COV et celles émettant au moins 300000 t/an de CO₂. Elles peuvent être opposée aux sources diffuses, qui correspondent à de petits émetteurs très distribués dans l'espace (area sources). Ces sources ne peuvent être décrites que sur la base de surfaces importantes et sont très difficiles à caractériser à un niveau local. Enfin, on parle parfois de sources linéiques (lines sources) : ces sources concernent essentiellement le transport (routier, fluvial ..). Là, les émissions sont déterminées le long d'un axe. Par exemple, une grande installation de chauffage urbain desservant un petit quartier sera plutôt répertorié en tant que source ponctuelle, alors que l'ensemble des chaudières individuelles servant au chauffage des logements constitue plutôt un exemple de source diffuse.

2. La nomenclature Corinair

CORINAIR est un projet réalisé depuis 1995 par le Centre thématique européen sur les émissions atmosphériques, sous contrat avec l'Agence européenne pour l'environnement. L'objectif est de collecter, maintenir, gérer et publier des informations sur les émissions dans l'air, au moyen d'un inventaire européen des émissions atmosphériques et d'un système de base de données. Cela concerne les émissions atmosphériques de toutes les sources pertinentes pour les problèmes environnementaux de changement climatique, d'acidification, d'eutrophisation, d'ozone troposphérique, de qualité de l'air et de dispersion des substances dangereuses.

La nomenclature Corinair permet de classer les émetteurs en fonction de 11 catégories. Cette nomenclature a été baptisée SNAP (Selected Nomenclature for Air Pollution). Elle contient près de 400 items mais les 11 catégories principales sont les suivantes :

1. Combustion dans les industries de l'énergie et de la transformation de l'énergie : production d'électricité, chauffage urbain, raffinage du pétrole, transformation de combustibles minéraux solides, mines de charbon, extraction de gaz/pétrole, stations de compression
2. Combustion hors industrie : commerce et institutionnel, résidentiel, agriculture, sylviculture et aquaculture
3. Combustion dans l'industrie manufacturière : chaudières, turbine, moteurs fixes, fours, procédés énergétiques
4. Procédés de production : procédés de l'industrie pétrolière, de la siderurgie, des houillères, de l'industrie des métaux non ferreux, de l'industrie de chimie organique, inorganique, de l'industrie du bois, de l'alimentation, du papier, de la boisson.
5. Extraction et distribution de combustibles fossiles/ énergie géothermique : mines, stockage de carburant, extraction, déchargement, distribution de combustibles
6. Utilisation de solvants et autres produits : application de peinture, dégraissage et nettoyage à sec, fabrication de produits chimiques, anesthésie et produits de nettoyage.
7. Transports routiers : voitures, véhicules utilitaires légers, poids-lourds, motocycles et motocyclettes, évaporation d'essence, pneus, freins...
8. Autres sources mobiles et machines : activités militaires, ferroviaires, navigation fluviale, trafic aérien, engins spéciaux pour l'agriculture, la sylviculture, l'industrie, les loisirs ...
9. Traitements et élimination des déchets : incinération, décharges, crémation, traitements des eaux usées, épandages ...
10. Agriculture et sylviculture : culture avec engrais, sans engrais, ecobuage, fermentation entérique, déjections animales, utilisation de pesticides ...
11. Autres sources et puits : forêts naturelles de feuillus, de conifères, feux de forêts, prairies, zones humides, eaux, animaux, volcans, foudres, forêts exploitées...

Tableau 01 : Exemple d'inventaire des émissions de COVNM en France en fonction des différents types d'émetteurs - Source CITEPA

EMISSIONS DE COVNM EN FRANCE METROPOLITAINE										
	1990	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003
Transformation d'énergie	176	120	118	118	114	103	96	88	83	81
Industrie manufacturière	591	514	508	511	518	490	504	477	460	425
Résidentiel et tertiaire	390	372	387	367	375	368	357	361	333	350
Agriculture et sylviculture	179	190	170	182	171	180	169	176	171	163
Autres	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Transport	1081	838	763	697	641	599	534	483	428	380
dont route	1051	802	726	658	600	556	493	441	382	333
fer	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1
fluvial	25	32	33	35	37	38	38	39	43	43
maritime (*)	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
aérien (*)	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1
TOTAL	2 416	2 033	1 946	1 874	1 819	1 740	1 661	1 586	1 475	1 400
Part transport (en %)	44,7	41,2	39,2	37,2	35,2	34,4	32,2	30,5	29,0	27,2
Part route dans transport (en %)	97,3	95,7	95,1	94,5	93,7	92,9	92,2	91,2	89,0	87,6

Source : CITEPA/Coralie/Secten, février 2005

(*) selon les définitions de l'UNECE : les émissions répertoriées hors total ne sont pas incluses, à savoir les émissions maritimes et aériennes internationales, ainsi que les émissions des sources biotiques des forêts et les émissions non anthropiques.

Chapitre II : Les substances polluantes de l'air

4. Introduction

L'atmosphère fait partie de la famille des gaz, dont sa composition est variable en fonction du temps. Les constituants les plus importants sont : l'azote (78%) l'oxygène (21%) l'argon (0,93 %), la vapeur d'eau (0 – 4 %) le gaz carbonique (0,033 %), et certains gaz rares.

La pollution de l'air (ou pollution atmosphérique) est une altération de la qualité et de pureté de l'air, ayant pour cause la présence de polluants à différents états — gazeux, particulaires, et peut-être liquides — par introduction ou modification de la concentration normale des agents chimiques, biologiques ou physiques au-delà d'une certaine norme, produisant un effet nuisible sur l'être humain et son environnement qui l'entoure.

Avec la civilisation moderne, les quantités de substances rejetées dans l'atmosphère, altérant la composition normale de l'air, n'ont cessé d'augmenter. L'origine des différentes substances polluantes de l'atmosphère est des plus variées. La combustion des diverses formes du carbone fossile (charbon, pétrole, gaz naturel) joue un rôle prépondérant dans la contamination de l'air.

5. Les différents types de polluants

Nous pouvons classer les substances polluantes de l'air selon différentes manières :

5.1. Les polluants primaires et secondaires

Les substances polluantes émises dans l'air peuvent se transformer chimiquement en constituant deux catégories de substances :

- **Les polluants primaires** : sont les polluants que l'on trouve à l'endroit de l'émission, sans subir de transformation physique ou chimique. Par exemple, le CO est un polluant primaire.
- **Les polluants secondaires** : sont des polluants qui ne sont pas émis, mais qui résultent de la transformation physico-chimique des polluants primaires au cours de leur séjour dans l'atmosphère. Par exemple, l'ozone résulte de réactions chimiques impliquant notamment les oxydes d'azote et les COV.

Le tableau 02 ci-dessous récapitule les principaux polluants gazeux des deux catégories.

Tableau 02 : Classification des polluants atmosphériques gazeux selon leurs propriétés chimiques.

Class	Primary Pollutants	Secondary Pollutants
Sulfur compounds	Sulfur dioxide (SO ₂), sulfur trioxide (SO ₃), hydrogen sulfide (H ₂ S), carbonyl sulfide (COS), carbon disulfide (CS ₂), dimethyl sulfide (CH ₃) ₂ S	Sulfur trioxide (SO ₃), sulfuric acid (H ₂ SO ₄), sulphate ion (SO ₄ ²⁻), ammonium sulphate (NH ₄) ₂ SO ₄ , etc.
Nitrogen compounds	Nitric oxide (NO), nitrous oxide (N ₂ O), nitrogen dioxide (NO ₂), ammonia (NH ₃)	Nitric oxide (NO), nitrogen dioxide (NO ₂), nitric acid (HNO ₃), nitrate ion (NO ₃ ⁻), ammonium ion (NH ₄ ⁺)
Inorganic carbon compounds	Carbon monoxide (CO), carbon dioxide (CO ₂)	Carbon dioxide (CO ₂), oxygenated inorganic carbon compounds
Organic carbon compounds	Methane (CH ₄), terpenes, isoprene, C1-C5 compounds classified as paraffins, olefins, and aromatics	Organic nitrates, peroxides (e.g., PAN), oxygenated hydrocarbons classified as aldehydes, ketones, and acids
Halogen compounds	Hydrogen fluoride (HF), hydrogen chloride (HCl), carbon tetrachloride (CCl ₄), chlorofluorocarbons (CFCs), methyl chloride (CH ₃ Cl, CH ₃ CCl ₃)	
Radioactive substances	Strontium (⁹⁰ Sr), cesium (¹³⁷ Cs), iodine (¹³¹ I), tritium (³ H) radon and radon daughters	

Il est possible de réaliser un inventaire d'émission pour les polluants primaires, mais pas pour les polluants secondaires.

5.2. Les polluants réglementés

Les polluants réglementés font l'objet de mesures continues dans l'air réalisées par les associations de surveillance de la qualité de l'air. Ils sont divisés en deux catégories : les polluants en phase gazeuse et les polluants en phase particulaire. Les gaz représentent 90% de la masse des polluants atmosphériques et les particules les 10% restants (Tab.03).

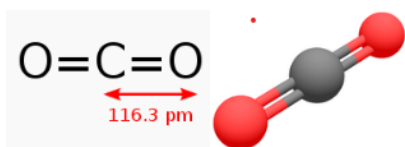
Tableau 03 : Les polluants réglementés

Les polluants gazeux	Les polluants particulaires
<ul style="list-style-type: none">– le dioxyde de soufre : SO₂– le monoxyde de carbone : CO– le dioxyde d'azote : NO₂– l'ozone : O₃– le benzène : C₆H₆– les COV (composés organiques volatiles)– les hydrocarbures aromatiques polycycliques : 6 (HAP)	<ul style="list-style-type: none">– les particules (PM₁₀ et PM_{2,5})– le plomb : Pb– le cadmium : Cd– l'arsenic : As– le nickel : Ni– le mercure : Hg

5.3. Les dérivés gazeux du carbone, du soufre et de l'azote

5.3.1. Le dioxyde de carbone (CO₂)

Le dioxyde de carbone, aussi appelé gaz carbonique ou anhydride carbonique, est un composé inorganique dont la formule chimique est CO₂, la molécule ayant une structure linéaire de la forme O=C=O. Il se présente, sous les conditions normales de température et de pression, comme un gaz incolore, inodore, à la saveur piquante.



L'air contient aujourd'hui environ 0,04 % de CO₂. À partir d'une certaine concentration dans l'air, ce gaz s'avère dangereux voire mortel. C'est ainsi un gaz à effet de serre majeur, transparent en lumière visible mais absorbant dans le domaine infrarouge, de sorte qu'il tend à bloquer la réémission vers l'espace de l'énergie thermique reçue au sol sous l'effet du rayonnement solaire. Il est responsable d'environ 26 % de l'effet de serre à l'œuvre dans l'atmosphère terrestre (la vapeur d'eau en assurant 60 %) ; l'augmentation de sa concentration est en partie responsable du réchauffement climatique constaté à l'échelle de notre planète depuis les dernières décennies du XXe siècle (Wikipedia, 2002b).

- Émission de dioxyde de carbone

Une émission de dioxyde de carbone est un rejet de ce gaz dans l'atmosphère terrestre, quelle qu'en soit la source.

Les émissions de CO₂ dans l'atmosphère terrestre peuvent être d'origine naturelle ou d'origine anthropique, c'est-à-dire issues des activités humaines. La source anthropique est en forte croissance depuis quelques décennies. Une fois émis, le gaz est en partie absorbé par les puits de carbone naturels. Cette absorption a doublé de 1960 à 2010, mais la moitié du CO₂ rejeté par les activités humaines s'accumule dans l'atmosphère, de sorte qu'en novembre 2020, la concentration de CO₂ atmosphérique a atteint 413 ppm (parties par million), alors qu'elle était de l'ordre de 280 ppm jusqu'à la révolution industrielle. Cette augmentation intensifie l'effet de serre, ce qui cause un réchauffement climatique (**Wikipedia, 2022a**). Sur l'année 2021, 36,4 milliards de tonnes de dioxyde de carbone ont été émis dans l'atmosphère. Un record absolu, mis en avant dans une analyse produite par l'Agence internationale de l'énergie et publiée le 8 mars 2022 (numerama, 2022).

5.3.2. Le monoxyde de carbone (CO)

Le monoxyde de carbone est le plus simple des oxydes du carbone. La molécule est composée d'un atome de carbone et d'un atome d'oxygène ; sa formule brute s'écrit CO et sa formule semi-développée C≡O ou |C≡O|.



Le Monoxyde de carbone est un polluant primaire. C'est un gaz incolore, inodore et non irritant, indétectable par les mammifères qu'il est particulièrement toxique. Il est plus léger que l'air et constitue le plus abondant et le plus répandu de tous les polluants atmosphériques présentant une toxicité pour l'Homme. Dans les conditions naturelles, il se rencontre dans l'air à des concentrations très réduites comprises entre 0.005 ppm (v) et 0.2 ppm (v) étant admises pour l'ensemble de la troposphère (freyer, 1979). Dans les carrefours aux moments d'embouteillage, les valeurs de CO dépassent 100 ppm. Celles-ci excèdent le seuil de nocivité estimé à 50 ppm pour les effets neurotoxiques lors d'expositions prolongées. Dans les zones reculées de l'hémisphère nord, ont été détectées 0.025 ppm. En Alaska, les plus faibles concentrations observées varient de 0.055 à 0.260 ppm.

■ Formation du monoxyde de carbone lors des combustions

Le monoxyde de carbone CO se forme lors de la combustion incomplète de matières organiques (gaz, charbon, fioul ou bois, carburants). Lorsque l'oxygénation du foyer est insuffisante pour brûler complètement les gaz formés à partir de la matière, mais que la réaction est assez exothermique pour élever et maintenir la température au-delà de 950 °C, le monoxyde de carbone se forme préférentiellement au dioxyde de carbone, selon l'équilibre de Boudouard. En dessous de ce seuil, la molécule CO est métastable, a fortiori à température et pression ambiantes. Elle se décompose toutefois très lentement, et surtout au contact de surfaces pour former du dioxyde de carbone et du carbone. C'est selon cette réaction réversible que le carbone est transporté au cœur des procédés sidérurgiques ou, plus surprenant, au cœur de mécanismes biochimiques in vivo.

■ Sources du monoxyde de carbone atmosphérique

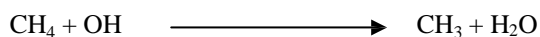
Le volcanisme, certaines fermentations en milieu anaérobie (vases dans des biotopes lenticles), les décharges électriques dans la troposphère, les incendies de forêts, représentent les principales sources naturelles de CO. Les principales sources technologiques de CO proviennent des combustions : combustion des charbons et des fuels, incinération des déchets urbains et émissions des véhicules à moteur (le CO représente jusqu'à 11% des gazes d'échappement de ces automobiles) (tableau 3). Cependant, des êtres vivants marins semblent intervenir de façon significative dans la production naturelle de ce gaz. On cite les algues brunes, les flotteurs de *Fucus* sp., les méduses du genre *Physalia*. Ces diverses sources biologiques sont la cause essentielle de la présence de ce gaz à saturation dans les eaux océaniques. L'océan dégage chaque année de l'ordre de 50 millions de tonnes de CO dans l'atmosphère. La source majeure de ce gaz dans l'air résulte de l'oxydation des terpènes et autres hydrocarbures produits la végétation terrestre (Tab. 04).

Tableau 04 : Estimation à l'échelle biosphérique des sources d'émissions naturelles et anthropogéniques de monoxyde de carbone

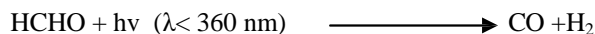
Sources	Émissions de monoxyde de carbone (en 10 ⁶ t par an)	
	Globales	Tropicales (30° N – 30° S)
Technologiques	440	–
Combustion de la biomasse	700	600
Végétation	75	60
Océan	50	25
Oxydation du CH ₄	600	400
Oxydation des Terpènes	800	600
Total	2 665	1 585

(D'après Graedel et Crutzen, *op. cit.*, mais actualisé)

Une autre source biogéochimique importante du CO est l'oxydation abiotique du méthane (CH₄). Ce phénomène résulte surtout d'une chaîne de réactions qui prennent lieu essentiellement dans la stratosphère:

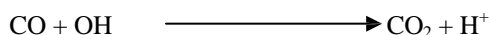


A partir du CH₃, une cascade de réactions avec des radicaux libres dus à la dissociation de l'eau va ensuite produire le composé CH₃O. Ce dernier va être à son tour oxydé en HCHO qui sera transformé en CO par le rayonnement UV selon la réaction :



▪ Devenir du monoxyde de carbone atmosphérique

Il existe des processus biogéochimiques efficaces qui décomposent le CO et le transforment en d'autres composés. La principale voie de neutralisation abiotique du CO tient en son oxydation en gaz carbonique par réaction avec un hydroxyle :



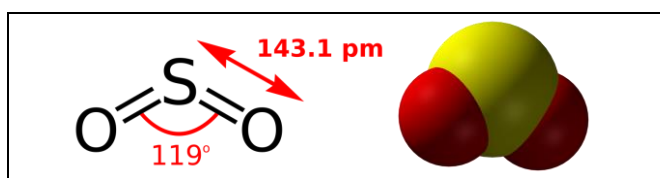
Cependant, le rôle des êtres vivants dans l'extraction de ce gaz semble être le facteur le plus important dans le maintien de la constance de sa teneur moyenne dans l'atmosphère. En effet, la flore bactérienne du sol telle que *Bacillus oligocarbophilus* et *bacterium formicum* absorbent efficacement le CO et le transforment en CO₂ et/ou en CH₄ selon qu'elles disposent ou non d'un donneur d'hydrogène.

La respiration végétale pourrait aussi constituer un processus important d'élimination de ce gaz de l'air. Inoffensif pour les végétaux aux concentrations ordinaires, il interfère cependant avec les réactions de la chaîne respiratoire et il présente une nette phytotoxicité à des taux plus élevés.

Malgré la diversité et l'importance des mécanismes biogéochimiques dégradant le CO atmosphériques, ces derniers ne parviennent plus à éliminer entièrement la totalité des excédents de CO produits par l'action de l'homme. Ainsi on atteste la croissance observée depuis quelques décennies de sa teneur dans l'air estimée à 0.7% par an.

5.3.3. Le dioxyde de soufre (SO₂)

Le dioxyde de soufre, également appelé anhydride sulfureux (nom qui n'est plus employé en chimie), est un composé chimique de formule SO₂ (O=S=O). Il s'agit d'un gaz incolore, à l'odeur piquant, dense et toxique, dont l'inhalation est fortement irritante.



- Les principales sources

Il se rencontre dans l'air à l'état de traces infinitésimales en l'absence de toute source de pollution. On estime que sa concentration moyenne dans la troposphère des zones reculées est comprise entre 0,01 et 0,2 ppb. Le volcanisme en constitue la principale source naturelle ainsi que l'oxydation spontanée de l'hydrogène sulfuré et des sulfures de méthyle et de diméthyle produits par des fermentations en divers biotopes aquatiques. Cependant, depuis de nombreuses décennies, les dégagements de SO₂ d'origine technologique en milieu continental excèdent de plus en plus largement ceux provenant de sources naturelles. Les rejets totaux de dérivés gazeux du soufre d'origine anthropogène dans l'atmosphère pouvaient être estimés atteindre à l'échelle globale 100 millions de tonnes par an.

- Les causes de pollutions

La principale cause de pollution atmosphérique par le dioxyde de soufre réside dans les combustions, plus particulièrement celles liées à l'usage des combustibles fossiles. En effet, ces derniers -exception faite du gaz naturel (qui est désulfuré avant usage si nécessaire) -renferment des teneurs parfois importants en soufre. Parmi les dérivés pétroliers, le gazole mais surtout les fuels renferment du soufre. Il convient aussi de noter que les incendies de forêt et

de façon plus générale du couvert végétal introduisent aussi du SO_2 dans l'atmosphère. La métallurgie des métaux non ferreux représente la seconde cause de pollution de l'air par le dioxyde de soufre. La première étape de l'extraction du métal consiste à une oxydation de la pyrite ; ainsi dans le cas de la pyrite cuivreuse on aura la réaction :



Ainsi, une usine qui traite 1 000 tonnes par jour de pyrite cuivreuse rejette quotidiennement dans l'atmosphère 600 t de SO_2 . Enfin, diverses industries chimiques comme celles de la synthèse de l'acide sulfurique peuvent contaminer l'air en l'absence de mesures adéquates de protection.

- Le devenir de SO_2

Le SO_2 émis dans l'atmosphère n'y demeure pas indéfiniment car il y subit diverses transformations qui font partie du cycle biogéochimique naturel du soufre dans la biosphère. En présence de lumière ultra-violette, le dioxyde de soufre est transformé en anhydride sulfurique selon la réaction :



Par ailleurs, au contact de la vapeur d'eau atmosphérique il se forme de l'acide sulfureux.



Ultérieurement, l'acide sulfureux forme, instable, se transforme spontanément en acide sulfurique :



Enfin, un autre type de réaction intervient dans les atmosphères contaminées :



Catalysée par la lumière solaire, cette réaction peut s'effectuer à des concentrations en dioxyde de soufre et de peroxyde d'azote aussi basses que 0,5 ppm.

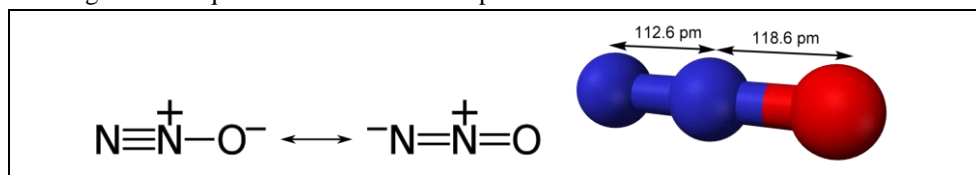
Dans un cas comme dans l'autre, l'acide sulfurique forme, très hygroscopique, forme des brouillards responsables de la toxicité des *smogs* acides qui apparaissent dans les atmosphères urbaines polluées sous climat tempéré froid et humide. Cet acide est aussi la cause majeure du phénomène des précipitations acides qui affecte de nos jours d'immenses surfaces dans l'hémisphère Nord tempéré.

En règle générale, l'acidité forte des pluies est due pour 72 % à l'acide sulfurique et à 28 % pour l'acide nitrique. L'acide sulfurique présent dans l'atmosphère réagit ensuite avec l'ammoniaque et d'autres cations de divers métaux donnant des sulfates solides, souvent solubles dans l'eau qui sont ramenés au sol par les précipitations. Des concentrations importantes en dioxyde de soufre peuvent provoquer de nombreuses pathologies respiratoires. Il peut entraîner des inflammations bronchiques, une altération de la fonction respiratoire, et des symptômes de toux.

5.3.4. Les oxydes d'azote (NO_x)

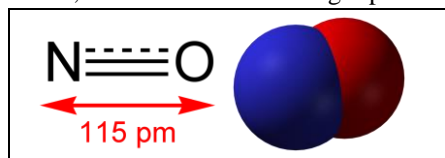
On compte parmi ces derniers le protoxyde d'azote encore dénommé oxyde nitreux (N_2O), le monoxyde d'azote (NO) et le dioxyde d'azote NO_2 .

- a) **Le protoxyde d'azote (N_2O):** c'est le plus abondant des NO_x dans les atmosphères non polluées avec une concentration moyenne de 0,25 ppm. Il s'agit d'un puissant gaz à effet de serre, car son potentiel de réchauffement climatique est 290 fois supérieur à celui du CO_2 de sorte que ses dégagements interviennent dans les changements climatiques globaux dus à la pollution atmosphérique par ses rejets. En revanche, en dépit de ses effets neurotropes ce, dernier ne joue pas un rôle majeur dans la pollution atmosphérique urbaine. En effet, sa concentration dans l'air des villes n'est pas significativement modifiée par des sources technologiques. En réalité, la principale source technologique de N_2O à l'atmosphère est due à la dénitrification des nitrates utilisés à vaste échelle comme engrais chimiques et concerne donc l'espace rural.



- b) **Le monoxyde d'azote :** Le monoxyde d'azote, oxyde azotique, oxyde nitrique ou NO est un composé chimique

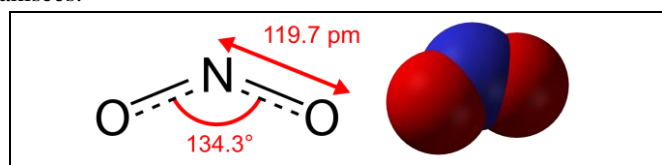
formé d'un atome d'oxygène et d'un atome d'azote. C'est un gaz dans les conditions normales de température et de pression. C'est un important neurotransmetteur chez les mammifères ; dissous, il franchit facilement les membranes biologiques et passe d'une cellule à l'autre, constituant un « messenger paracrine idéal »



Ce gaz peut être synthétisé en faibles quantités par de nombreux organismes, dont le corps humain. Dans la nature, à haute température, le diazote et le dioxygène réagissent pour donner le monoxyde d'azote, par exemple sous l'effet de la foudre.

L'activité humaine a radicalement modifié la production de monoxyde d'azote dans la biosphère, en raison de la formation de grande quantité de ce gaz dans la chambre de combustion des moteurs à explosion, dans certaines chaudières et moteurs industriels et lors de certains processus de l'industrie chimique. Un des buts des pots d'échappement catalytiques est d'inverser cette réaction et diminuer les émissions de ce gaz.

- c) **Le dioxyde d'azote (NO₂):** Ce gaz, encore dénommé peroxyde d'azote, constitue avec le NO, à l'opposé du précédent, l'un des polluants majeurs de l'air et présente une importance fondamentale dans tous les problèmes de pollution atmosphérique. C'est un gaz stable, fortement coloré en jaune, qui réduit beaucoup la visibilité atmosphérique et confère dans la plupart des cas une coloration brunâtre caractéristique aux masses d'air qui recouvrent les zones urbanisées.



Par ailleurs, les propriétés physiques particulières de ce gaz, se traduisant par **une forte absorption des ultraviolets**, provoquent sa dissociation par l'énergie lumineuse absorbée selon la réaction:



Il engendrera alors une pollution de l'air dite photochimique car générée par l'exposition aux rayonnements du NO₂ et de ces produits de décomposition avec d'autres contenus dans l'air pollué: dioxyde de soufre, oxygène, hydrocarbures. Parmi les diverses substances formées, certaines comme les peroxyacélnitrates (PAN), sont phyto-toxiques et très irritantes pour la conjonctive.

La présence de dioxyde d'azote dans l'atmosphère résulte en partie significative d'une réaction secondaire qui s'y effectue de façon spontanée avec le monoxyde d'azote. On constate, en effet, que les gaz d'échappement des automobiles et en général tous ceux produits par combustion à haute température renferment beaucoup de monoxyde que de peroxyde d'azote. Ce dernier se forme pendant la réaction qui a lieu au cours de la phase de dilution dans l'air des gaz brûlés. Celle-ci a pour équation :



Cette réaction a tendance à s'effectuer en sens inverse au-dessus de 600° C ce qui explique la prépondérance du monoxyde d'azote dans les gaz émis par les échappements. Dans les zones urbaines fortement polluées, la concentration du peroxyde d'azote peut dépasser 0,1 ppm (Fig.01).

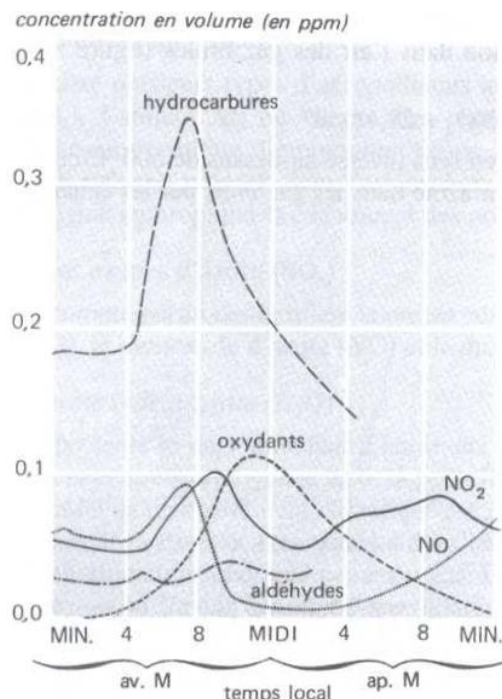


Figure 1. Variation de la concentration dans l'atmosphère en divers polluants au cours d'une journée dans les parties basses de Los Angeles

2.4. Les composés organiques

2.4.1. Les composés organiques volatiles – COV

Les composés organiques volatils (COVs) sont des espèces gazeuses qui regroupent un grand nombre de composés contenant du carbone et de l'hydrogène (hydrocarbures), voire de l'oxygène dans les cas des hydrocarbures oxygénés. S'ils contiennent d'autres éléments comme du chlore, de l'azote, du fluor, du soufre, ou du phosphore, qui rentrent dans la catégorie générique des COVs. Ils ont de nombreux effets sur la santé. Certains sont toxiques ou cancérogènes (notamment le benzène).

Les COVs sont des composés organiques pouvant facilement se trouver sous forme gazeuse dans l'atmosphère terrestre, en constituant ainsi une famille très large de produits. Ces composés ont la particularité d'avoir un point d'ébullition très bas, ils s'évaporent ou se subliment facilement depuis leur forme solide ou liquide. Cela leur confère l'aptitude de se propager plus ou moins loin de leur lieu d'émission, entraînant des impacts directs et indirects sur les animaux et la nature.

À l'échelle globale, ces COV sont à 10 % d'origine anthropique (provenant du raffinage, de l'évaporation de solvants organiques, imbrûlés, etc.) et à 90 % d'origine biotique (COVB ou COV biogéniques émis par les plantes ou certaines fermentations). Selon les cas, ils sont plus ou moins lentement biodégradables par les bactéries et champignons, voire par les plantes, ou dégradables par les rayonnements UV ou par l'ozone.

Les COV regroupent une multitude de substances et ne correspondent pas à une définition très rigoureuse. Les hydrocarbures appartiennent aux COV et on fait souvent l'amalgame à tort. Ceci est sans doute dû au fait que l'on exprime souvent les COV en hydrocarbures totaux (notés HC), en équivalent méthane ou propane, ou par rapport à un autre hydrocarbure de référence.

Il est fréquent de distinguer séparément le méthane (CH_4) qui est un COV particulier, naturellement présent dans l'air, des autres COV pour lesquels on emploie alors la notation COVNM (Composés Organiques Volatils Non Méthaniques). En outre, ces COVNM, principalement les hydrocarbures, interviennent dans le

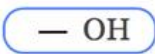
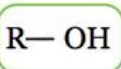
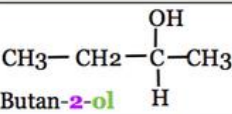

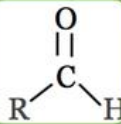
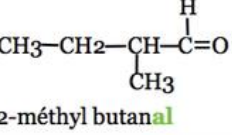
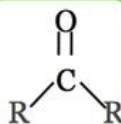
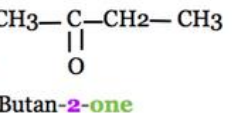
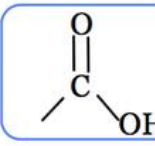
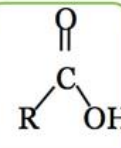
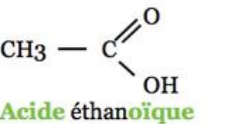
processus de production d'ozone dans la basse atmosphère. Les COVNM entrent dans la composition des carburants mais aussi de nombreux produits courants contenant des solvants (peintures, colles...). Ils sont émis soit par combustion, soit par évaporation, et dans ces cas, ils contribuent fortement à la pollution urbaine ou industrielle et à la production d'ozone dans les panaches pollués. Néanmoins l'essentiel des émissions des composés organiques volatils est d'origine naturelle, les espèces végétales, dont les arbres, émettant une grande variété de COVs.

Parmi ces composés organiques volatiles, on peut distinguer différentes familles de (Tab. 05, 06, 07, 08 et 09):

Tableau 05 : Quelques exemples de COVs, les plus importants en chimie atmosphérique (formules chimiques, sources et puits principaux et intervalles de concentration dans l'atmosphère).

Classe	Composé	Formule	Source principale	Puits	Gamme de concentration
Alcanes	Méthane	CH ₄	Processus microbiens, gaz naturel	OH	1,7 ppm
	Ethane	C ₂ H ₆	Véhicules à moteur	OH	0-100 ppb
	Hexane	C ₆ H ₁₄	Véhicules à moteur	OH	0-30 ppb
Alcènes	Ethène	C ₂ H ₄	Véhicules à moteur,	OH, O ₃	0-100 ppb
	Propène	C ₃ H ₆	Véhicules à moteur,	OH, O ₃	0-30 ppb
	Isoprène	C ₅ H ₈	Végétation	OH	0-30 ppb
Alcyne	Acétylène	C ₂ H ₂	Combustions, véhicules	OH	0-100 ppb
Aromatiques	Benzène	C ₆ H ₆	Véhicules à moteur,	OH	
	Toluène	C ₇ H ₈	Véhicules à moteur	OH	
Aldéhydes	Formaldéhyde	HCHO	Véhicules à moteur	hv, OH	
	Acétaldéhyde	CH ₃ CHOO	Véhicules à moteur	hv, OH	
	Acroléine	CH ₂ CHCHO			
Cétones	Acétone	CH ₃ C(O)CH ₃		hv, OH	0-10 ppb
Acides	Acide formique	HCOOH		Pluie	
	Acide acétique	CH ₃ COOH		Pluie	
Alcools	Méthanol	CH ₃ OH		OH	

Tableau 06 : Nomenclature de quelques familles des COVs

GROUPE CARACTÉRISTIQUE	NOM DE LA FAMILLE	FORMULE GÉNÉRALE	NOMENCLATURE	EXEMPLE	TESTS CARACTÉRISTIQUES
groupe hydroxyle: 	Alcool		Alcan- n-ol	 Butan- 2-ol	Test au permanganate de potassium (violet): décoloration (alcool I et II)
groupe carbonyle 	Aldéhyde		Alcan al	 2-méthyl butanal	- Test à la DNPH (pp jaune-orangé) - Test à la liqueur de Fehling (pp rouge brique)
	Cétone		Alcan- n-one	 Butan- 2-one	Positif à la DNPH, précipité jaune-orangé
groupe carboxyle 	Acide carboxylique		Acide alcan oïque	 Acide éthan oïque	Test au papier pH (inf à 7) ou indicateur coloré

R et R' sont des groupes alkyles formés d'atomes de carbone et d'hydrogène

Tableau 07 : Description des grandes familles de composés organiques volatiles

Familles	Description	Exemple
Les alcane s	Les alcanes sont des hydrocarbures saturés. Ils ne sont constitués que d'atomes de carbone (C) et d'hydrogène (H), liés entre eux par des liaisons simples, les atomes de carbone sont reliés à un nombre maximal d'atomes d'hydrogène — d'où le nom de « saturé ». Les alcanes non cycliques possèdent une formule brute de la forme C_nH_{2n+2} où n est un entier naturel non nul.	Méthane (CH ₄), Éthane (C ₂ H ₆), Propane (C ₃ H ₈), Butane (C ₄ H ₁₀)
Les alcène s	Les alcènes sont des hydrocarbures insaturés, caractérisés par la présence d'au moins une double liaison covalente entre deux atomes de carbone. Ces liaisons sont toujours de types covalents normales parfaites. Les alcènes non cycliques n'ayant qu'une double liaison possèdent une formule brute de la forme C_nH_{2n} où n est un entier naturel supérieur ou égal à 2. Ils sont très réactifs	L'alcène le plus simple est l'éthylène (nom usuel de l'éthène).
Les diènes	Les diènes sont des hydrocarbures qui contiennent deux doubles liaisons.	Le buta-1,3-diène (butadiène)
Les terpènes	Les terpènes (de l'allemand Terpen provenant de « das Terpentin », la térébenthine) sont une classe d'hydrocarbures, produits par de nombreuses plantes, en particulier les conifères. Ce sont des composants majeurs de la résine et de l'essence de térébenthine produite à partir de résine. Les terpènes sont des métabolites secondaires qui se rencontrent également chez les métazoaires (phéromones et hormones sesquiterpéniques des hexapodes, diterpènes d'organismes aquatiques (cnidaires, éponges)).	L'α-pinène; Le β-pinène; Le 3-carène; Le limonène; Le carotène.
Les composés oxygénés	Un composé oxygéné est un corps pur organique dont la molécule comporte au moins un atome d'oxygène.	Aldéhydes, cétones, esters, alcool ...
Les hydrocarbures aromatiques mono ou polycycliques	Ils sont assez abondants et réactifs. Un hydrocarbure aromatique ou arène ¹ est un hydrocarbure dont la structure moléculaire comprend un cycle possédant une alternance formelle de liaison simple et double, et respectant la règle de Hückel sur l'aromaticité. Le terme d'« aromatique » fut donné à ces molécules avant la découverte du phénomène physique d'aromaticité, et est dû au fait que ces molécules ont une odeur en général douce. La configuration aromatique de six atomes de carbone est nommée cycle benzénique, d'après le plus simple hydrocarbure aromatique possible, le benzène. Les hydrocarbures aromatiques peuvent être monocycliques ou polycycliques.	Benzène, toluène ...

Tableau 08 : Durée de vie approximative dans l'atmosphère et les sources caractéristiques des COV courants en milieu urbain,. Les composés sont classés selon leur durée de vie dans l'atmosphère. Les composés à durée de vie supérieure, comme l'éthane et le propane, sont moins réactifs et mettent donc plus de temps à former des produits secondaires, tels que l'ozone.

Composé	Durée de vie approximative dans l'atmosphère	Sources caractéristiques
Éthane	1,5 mois	Gaz naturel, combustion de biomasse
Acétylène	15 jours	Émissions des véhicules, combustion de biomasse
Méthanol	12 jours	Plantes, oxydation des COV
Propane	11 jours	Gaz de pétrole liquéfié, gaz naturel
Benzène	10 jours	Émissions industrielles, des véhicules, combustion de biomasse
iso/n-Butane	5 jours	Émissions des véhicules, gaz de pétrole liquéfié
Éthanol	4 jours	Plantes, biocarburants
iso/n-Pentane	3 jours	Émissions des véhicules, évaporation de l'essence
Toluène	2 jours	Solvants, émissions des véhicules
Éthylène	1 jour	Émissions des véhicules
Formaldéhyde	1 jour	Oxydation des COV, combustion de biomasse
Isoprène	3 heures	Plantes

Tableau 09 : Sources des COVs dans les logements

Composés organiques volatils	Sources du polluant dans le logement	
	Matériaux et produits	Usages
Formaldéhyde	Peintures, colles, produits de construction et de décoration contenant certaines colles Réactivité chimique entre l'ozone et certains COV présents dans l'air	Fumée de tabac, bougies, bâtonnets d'encens, cheminées à foyer ouvert, cuisinières à gaz, poêles à pétrole Produits d'usage courant : d'entretien et de traitement, d'hygiène corporelle et cosmétiques
Acétaldéhyde	Panneaux de bois brut, panneaux de particules	Fumée de tabac Photocopieurs, imprimantes laser
Toluène	Peintures, vernis, colles, moquettes, tapis, vapeurs d'essence	Produits d'entretien
Tétrachloroéthylène	Moquettes, tapis	Nettoyage à sec
Xylène	Peintures, vernis, colles, insecticides	
1,2,4-Triméthylbenzène	Vernis, carburants	
1,4-Dichlorobenzène	Antimites, taupicides	Désodorisants, blocs W-C
Ethylbenzène	Cires, carburants	
2-Butoxyéthanol	Peintures, vernis, fongicides, traitement du bois	Herbicides
Styrène	Matières plastiques, matériaux isolants, carburants	Fumée de tabac, encens, désodorisants

2.4.2. Les hydrocarbures aromatiques polycycliques HAP

Parmi les aromatiques, les hydrocarbures aromatiques polycycliques **HAP** constituent un groupe particulier en raison de leurs caractéristiques chimiques et toxicologiques (cancérogènes) et ils font l'objet d'une surveillance particulière du fait de leur dangerosité : ces composés sont très nombreux et les plus courants sont : fluoranthène, benzo(b) fluoranthène, benzo(k) fluoranthène, benzo(a)- pyrène, benzo(ghi)perylène, indeno (1,2,3- cd) pyrène (liste des 6 HAP prioritaires définie par l'U.E. et l'O.M.S.). On considère également souvent : naphtalène, acenaphtylène, fluorène, phénanthrène, anthracène, pyrène, benzo-(a) anthracène, chrysène, dibenzo (ah) anthracène (ajouté aux 6 prioritaires), ils forment la liste des 16 HAP formée par l'EPA. Les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) ont été déclarés des substances toxiques car ils répondent

aux critères de persistance, de bioaccumulation et de toxicité définis par divers organismes internationaux. Les HAP proviennent de sources naturelles et anthropiques. Il s'agit d'un groupe de 100 substances chimiques différentes qui sont produites pendant la combustion incomplète de charbon, de pétrole et de gaz, de bois, de déchets et d'autres substances organiques. On les trouve généralement sous forme de nombreux composés mélangés, dans des matériaux comme la suie. Les HAP s'introduisent dans l'environnement pendant la phase gazeuse ou agglutinés à des particules, principalement la suie. Dans l'air ambiant, 25 % des HAP adhèrent à des particules et 75 % se présentent sous forme gazeuse, à l'exception des substances provenant des alumineries où le ratio est de 50-50. Les HAP sont aussi généralement concentrés près de sources ponctuelles spécifiques et leurs concentrations semblent diminuer rapidement à mesure qu'ils s'éloignent de leur source.

2.4.3. Les Produits Organiques Persistants (POP)

Ce qui caractérise les POPs : leur persistance : les molécules des POPs résistent aux dégradations thermiques, chimique ou biologique. Ce qui leur confère une persistance dans l'environnement et dans l'organisme humain, avec une demi-vie de l'ordre de 7 à 10 ans. Cette persistance est à l'origine de leur capacité de bioaccumulation dans les tissus vivants. Elle explique également leur transport sur de longues distances ; les POPs peuvent se retrouver à plusieurs centaines de kilomètres de leurs sources d'émission, leur impact sanitaire est avéré pour la santé humaine.

Il existe douze composés organiques toxiques à basse concentration. Ce sont des résidus industriels souvent toxiques, mutagènes et cancérigènes, qui interfèrent avec notre système hormonal et sexuel. La liste la plus communément admise est la suivante : Trichloroéthylène (TRI), Trichloroéthane (TCE), Tetrachloroéthylène (PER), Dioxines et furanes (Diox), Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques (HAP), Polychlorobiphényles (PCB) et Hexachlorobenzène (HCB).

Ils sont semi-volatiles et circulent plus ou moins bien dans l'air, en fonction de la température de celui-ci : dans les endroits froids, leur volatilité est réduite et ils se concentrent donc dans les régions **tempérées et polaires**.

Ils sont lipophiles (faible solubilité dans l'eau mais forte dans les graisses), avec attirance forte pour les tissus adipeux où ils se concentrent généralement (forte bioaccumulation). Ils ont également une durée de vie très longue (persistance dans le milieu).

2.4.4. Les sources de COV

Les sources de COV sont très nombreuses, les émissions sont dues à certains procédés industriels impliquant la mise en œuvre de solvants (chimie de base et chimie fine, parachimie, dégraissage des métaux, application de peinture, imprimerie, colles et adhésifs, caoutchouc, etc...), ou n'impliquant pas de solvants (raffinage du pétrole, utilisation de CFC, production de boissons alcoolisées, de pain, etc.). L'utilisation de combustibles dans des foyers contribue un peu aux émissions mais sans aucune comparaison avec les proportions indiquées pour SO₂ et NO_x. On retrouve au premier rang des émetteurs les transports (surtout automobiles). On notera également que la biomasse est fortement émettrice (forêts), sans oublier non plus les émissions liées aux produits domestiques (peinture, produits d'entretien, parfums et cosmétiques, journaux, tabac, etc.).

Voici quelques exemples de COV associés à des sources courantes (sources intérieures). Cette liste reflète la diversité des sources et des substances regroupées sous la dénomination COV :

- (+/-) alpha pinène Désodorisant, parfum d'intérieur, produit d'entretien

- 1,4 dichlorobenzène : Anti-mite, désodorisant, taupicide
- 111-trichloroéthane : Formulations de colle
- 124-triméthylbenzène : Solvant pétrolier, carburants, goudrons, vernis
- 1-methoxy-2-propanol : Laques, peintures, vernis, savons, cosmétiques
- 2-butoxyéthanol : Peintures, vernis, fongicides, herbicides, traitement du bois, calfatage siliconé
- 2-ethoxyéthanol Peintures, laques, vernis
- Benzène : Carburants, fumée de cigarette, produits de bricolage, d'ameublement, de construction et de décoration
- Butyl-acétate : Parquet, solvants
- cyclohexane : Peintures, vernis, colles
- Décane : White-spirit, colles pour sol, cires, vernis à bois, sol, moquettes, tapis
- Ethyl-benzène : Automobile, cires
- Limonène : Désodorisant, parfum d'intérieur, cires, nettoyeurs sol
- Mp-xylène et O-xylène Peintures ; vernis, colles, insecticides
- Styrène : Matières plastiques, matériaux isolants, automobile, fumée de cigarette
- Tétrachloroéthylène : Nettoyage à sec, moquettes, tapis
- Toluène : Peintures, vernis, colles, encres, moquettes, tapis, calfatage siliconé, vapeurs d'essence
- Trichloroéthylène : Peintures, vernis, colles, dégraissant métaux
- Undécane : White-spirit, colles pour sol, cires, vernis à bois, nettoyeurs sol.

Ci-dessous figurent des substances appartenant à la famille des aldéhydes, souvent associés à la pollution dans les ambiances intérieures et potentiellement responsables d'effets sur la santé :

- Formaldéhyde : Photochimie, panneaux de particules, panneaux de fibres, panneaux de bois brut, émissions des livres et magazines neufs, peintures à phase solvant, fumée de cigarettes, photocopieurs
- Acétaldéhyde : Photochimie, fumée de cigarettes, photocopieurs, panneaux de bois brut, panneaux de particules
- Benzaldéhyde : Peintures à phase solvant, photocopieurs, parquet traité
- Hexaldéhyde : Panneaux de particules, émissions des livres et magazines neufs, peintures à phase solvant, produit de traitement du bois (phase aqueuse), panneaux de bois brut
- Isobutyraldéhyde/butyraldéhyde : Photocopieurs
- Isovéraldéhyde : Parquet traité, panneaux de particules
- Valéraldéhyde : Emissions des livres et magazines neufs, peintures à phase solvant, panneaux de particules

Les sources potentielles de rejets des HAP sont :

- la combustion de déchets de bois et d'écorces par les chaudières industrielles ;
- les chaudières industrielles au gaz, au charbon, au pétrole et aux déchets pétroliers ;
- les centrales électriques, les fours électriques à arc ;
- le reformage catalytique pétrolier ;
- la fabrication de bardeaux d'asphalte, les usines de préparation d'enrobé à chaud ;
- les fonderies de métaux ferreux, les fours à coke, les usines de pâtes et papiers, les alumine-ries ;
- la production de noir de carbone ;
- la préservation du bois ;
- les incinérateurs.

Les HAP sont naturellement présents dans le pétrole brut et ils le demeurent dans les produits raffinés. Mais ils sont également rejetés par des sources naturelles : les feux de forêt, qui libèrent près de 2 000 tonnes de HAP par an, sont sans doute la plus grande source naturelle de HAP. Ce pendant, ces rejets étant

généralement très éloignés dans le temps et dans l'espace, ils n'entraînent pas de risque d'exposition continue. Le dépôt atmosphérique provenant de sources à l'extérieur des pays constitue une autre voie d'entrée significative.

2.5. Les métaux lourds :

Les métaux lourds désignent en général les métaux dont le poids atomique est supérieur à celui du fer. Ces métaux sont parfois également désignés par le terme de métaux traces ou d'éléments traces métalliques. On considère en général les métaux lourds suivants : Arsenic (As), Cadmium (Cd), Chrome (Cr), Cuivre (Cu), Mercure (Hg), Nickel (Ni), Plomb (Pb), Sélénium (Se), Zinc (Zn).

Chaque métal possède des caractéristiques et un impact propre. Néanmoins, on distingue selon le protocole d'Aarhus (1998) (UNECE, 2022), signé dans le cadre de la Convention sur la pollution atmosphérique transfrontalière à longue distance initiée par l'UNECE, trois espèces de métaux lourds considérées comme particulièrement nocives : le mercure, le plomb et le cadmium, qui font actuellement un objet de préoccupations pour les instances concernées par la pollution atmosphérique.

2.5.1. Le mercure (Hg) :

Le mercure, élément chimique de numéro atomique 80, est le seul métal liquide à la température ambiante. Il tire son symbole **Hg** du mot grec latinisé hydrargyrum (argent liquide). Le mot actuel a été introduit au vie siècle par les alchimistes qui le représentaient par le symbole de la planète Mercure.

Les principales propriétés physiques sont données dans la figure suivante. Le mercure possède huit isotopes naturels : sept stables, de nombres de masse 202 (29,86 p. 100), 200 (23,10 p. 100), 199 (16,87 p. 100), 201 (13,18 p. 100), 198 (9,97 p. 100), 204 (6,87 p. 100), 196 (0,15 p. 100), et un radioactif secondaire, de nombre de masse 206 (traces, demi-vie 8,15 min, descendant de l'uranium 238) ; il existe de nombreux isotopes artificiels. À l'état solide, la structure du mercure est rhomboédrique ; **c'est le plus volatil** de tous les métaux ; sa vapeur est monoatomique (le mercure étant le seul élément, en dehors des gaz rares, qui donne une vapeur monoatomique à des températures relativement basses).



		<table><tr><td>masse atomique</td><td>200,61</td></tr><tr><td>configuration électronique</td><td>2,8,18,32,18,2</td></tr><tr><td>rayon atomique</td><td>0,154 nm</td></tr><tr><td>densité</td><td>13,6</td></tr><tr><td>température de fusion ...</td><td>− 39 °C</td></tr><tr><td>température d'ébullition ..</td><td>356,9 °C</td></tr><tr><td rowspan="3">potentiels d'ionisation</td><td rowspan="3">[10,43 eV 18,65 eV 34,30 eV</td></tr></table>	masse atomique	200,61	configuration électronique	2,8,18,32,18,2	rayon atomique	0,154 nm	densité	13,6	température de fusion ...	− 39 °C	température d'ébullition ..	356,9 °C	potentiels d'ionisation	[10,43 eV 18,65 eV 34,30 eV
masse atomique	200,61															
configuration électronique	2,8,18,32,18,2															
rayon atomique	0,154 nm															
densité	13,6															
température de fusion ...	− 39 °C															
température d'ébullition ..	356,9 °C															
potentiels d'ionisation	[10,43 eV 18,65 eV 34,30 eV															
		Mercure liquide à température ambiante	Gouttes de mercure (se divisant en gouttelettes lorsqu'il est agité)	Quelques propriétés physiques du mercure (universalis, 2022)												

Figure 02: Quelques photos et propriétés physiques du mercure

Figure 02: Quelques photos et propriétés physiques du mercure

Le mercure se combine très aisément avec d'autres composés et a une volatilité importante. Pour le mercure métallique (inorganique), on le retrouve sous forme gazeuse, liquide ou ionique. Mais le mercure peut également se combiner avec du gaz carbonique et on parle alors de mercure organique. Le mercure est très sensible à l'acidité du milieu. Il est extrêmement toxique et a des effets sur le système nerveux. La volatilité importante du mercure en fait un polluant important dans les études de pollution transfrontière (Tab.10).

Tableau 10 : Quelques propriétés des halogénures mercuriques

Halogénure	Point de fusion en C°	Point d'ébullition en C°	Solubilité en moles/100 moles à 25°C	
			Dans l'eau	Dans l'alcool
HgF ₂	645	650	Hydrolysé	Insoluble
HgCl ₂	280	303	0.48	8.14
HgBr ₂	238	318	31.10 ⁻³	3.83
HgI ₂	257	351	23.10 ⁻⁵	0.396

Source: (universalis, 2022)

- Les formes du mercure dans l'atmosphère :

Le mercure est présent dans l'atmosphère sous différentes formes physiques et chimiques qui sont communément réparties en trois classes : le mercure élémentaire Hg(0), le mercure oxydé Hg(II) et le mercure particulaire HgP. Ces différentes formes se retrouvent aussi bien dans la phase gazeuse que dans la phase aqueuse atmosphérique. Le mercure élémentaire en phase gazeuse, avec des concentrations de fond dans l'air de l'ordre de 1,5 à 2 ng/m³, représente de loin la part la plus importante en masse (plus de 95 %). Bien que les doses et les effets puissent varier d'une forme à l'autre, ces concentrations restent très en deçà des niveaux dangereux pour la santé humaine par simple inhalation. On peut remarquer que des niveaux bien plus élevés peuvent être constatés localement près de sources majeures comme par exemple une usine de chlore-alcali. On notera que l'on se place ici dans le cadre d'une problématique de modélisation à l'échelle continentale qui n'est pas adaptée à l'étude de la pollution locale [Roustan et al, 2006].

C'est sa faculté de bioaccumulation et sa capacité à causer des lésions sévères ciblées dans l'organisme, en particulier sur le système nerveux, qui justifie que l'on s'intéresse au mercure. Une attention particulière doit donc être portée aux phénomènes de transfert du mercure vers les écosystèmes.

La pression de vapeur saturante élevée du mercure élémentaire explique sa présence à l'état gazeux dans l'atmosphère. Ses relativement faibles réactivités chimiques et solubilité lui confèrent une durée de vie importante de l'ordre de l'année. En comparaison, les temps de résidence des autres espèces sont nettement plus réduits, de l'ordre d'une heure à une journée pour les espèces oxydées et d'une journée à une semaine pour les espèces particulaires. Ces différences s'expliquent principalement par des solubilités bien plus importantes pour les espèces oxydées, ce qui favorise aussi bien leur lessivage par les nuages et les précipitations que le dépôt sec en surface. Ce sont ces phénomènes qui sont responsables du transfert du mercure de l'atmosphère dans les milieux vivants et de son accumulation tout au long des chaînes alimentaires.

- Les émissions

Les émissions de mercure sont d'origines anthropogéniques (centrales électriques à charbon, incinérateurs de déchets, industrie chimique liée au chlore...) mais aussi naturelles (volcan, érosion des sols...). Le mercure est également soumis au phénomène de réémission dans l'atmosphère, qui correspond à la remise en circulation de mercure précédemment déposé. Ce sont des phénomènes biochimiques dans le sol et l'eau qui sont à l'origine de ce processus.

L'évaluation des émissions est incertaine aussi bien pour les masses émises que pour la spéciation chimique. Les données concernant les émissions naturelles sont peu nombreuses bien que celles-ci soient estimées comme étant comparables, voire parfois supérieures, aux émissions anthropogéniques. Les flux moyens sur l'Europe pour l'année 2001 sont ainsi évalués à 10 g/km²/an pour ce qui est des émissions anthropogéniques, 6 g/km²/an pour les émissions naturelles et 2 g/km²/an sont attribuées à la réémission.

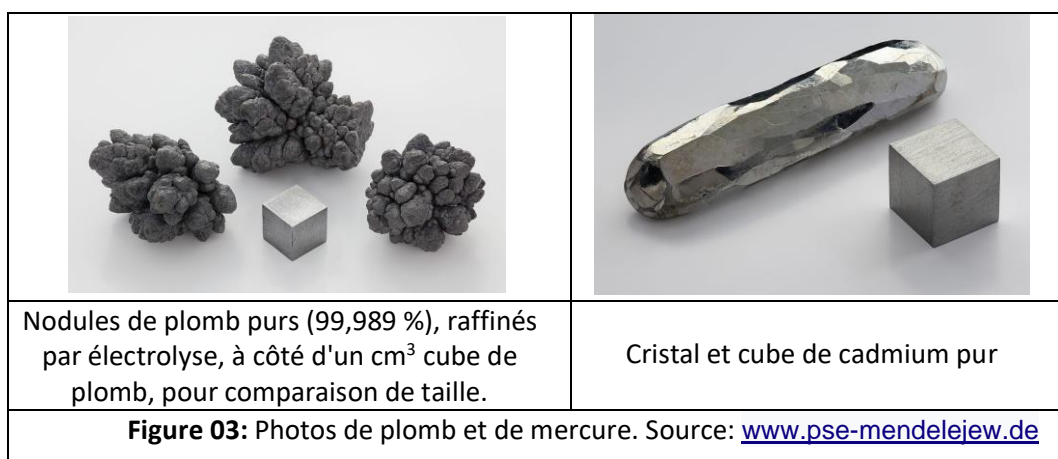
Ces chiffres sont issus des données fournies par le Meteorological Synthesizing Centre-East (MSC-E) du programme EMEP en charge de l'élaboration des inventaires d'émissions des métaux lourds pour les pays de la région EMEP (Iodel, 20..).

2.5.2. Le plomb et le cadmium

- Le plomb est l'élément chimique de numéro atomique 82, de symbole Pb. Dans les conditions standard le corps simple plomb est un métal malléable et gris bleuâtre, qui blanchit lentement en s'oxydant. Le mot plomb et le symbole Pb viennent du latin plumbum (le métal plomb). Le plomb appartient au groupe 14 et à la période 6 du tableau périodique. C'est le plus « lourd » des éléments stables.

Le plomb (Pb) constitue en valeur moyenne 12,5 ppm (parties par million) de la croûte terrestre (20 ppm dans les granites et 5 ppm dans les basaltes), ce qui le place, parmi les métaux industriels, entre le cuivre (35 ppm) et l'étain (2 ppm). Le plomb, par sa présence, naturelle, a ainsi fasciné l'homme, des alchimistes qui ont longtemps rêvé de lui faire acquérir le brillant incomparable de l'or (bien plus que la pyrite – l'« or des fous » –, sulfure de fer, bien moins malléable) jusqu'aux métallurgistes du milieu du xxe siècle. Et bien avant encore, comme l'ont montré les travaux des archéologues. Dans la nature, le plomb est presque toujours associé à d'autres atomes. Sa plus grande concentration est connue dans la galène (PbS), où il est associé au soufre. Ce sulfure [cf. sulfures et sulfosels naturels] a été longtemps exploité car ses gisements pouvaient aussi contenir de l'argent. Mais le plomb est associé à de nombreux métaux pour donner une gamme étendue de minéraux mineurs ou accessoires dans les paragenèses de métaux de base, notamment le zinc ; il en résulte que la production annuelle de plomb et son prix sont relativement dépendants des fluctuations de l'offre et de la demande d'autres métaux.

- Le cadmium est l'élément chimique de numéro atomique 48, de symbole Cd. Sa masse molaire atomique est de 112,4 g/mol. C'est un métal blanc argent, légèrement bleuté. Il est très malléable et ductile. Son abondance dans la lithosphère est estimée à 0,15 g/t, c'est donc un métal relativement rare. Il n'existe pas de minerais de cadmium en quantités métallurgiquement exploitables ; le plus connu est la greenokite (sulfure de cadmium à 77,8 p. 100 de métal) ; il révèle sa présence dans les minerais de zinc par des taches jaunâtres. Le cadmium est principalement extrait des minerais de sulfure de zinc (blendes), mais, comme ceux-ci sont associés généralement au plomb et souvent au cuivre, le cadmium provient également de quelques usines métallurgiques où la production du plomb et quelquefois du cuivre l'emporte sur celle du zinc. De toute façon, la métallurgie du cadmium est dérivée directement de celle du zinc.



- Les émissions de plomb et de cadmium

Les émissions de plomb sont souvent anthropiques et connaissent de forts changements quant à leurs origines. Jusqu'à peu, le secteur du transport était de loin la principale source (plus de 90 % des émissions en France en 1990 selon le CITEPA), car le plomb a été pendant longtemps additionné à l'essence du fait de son pouvoir antidétonant. Cependant, les lois sur les carburants sans plomb font que les émissions des industries manufacturières (métallurgie des métaux non-ferreux notamment) deviennent prépondérantes (90 % des émissions en France actuellement). L'incinération des ordures représente aussi une source considérable (10 % des émissions). Les sources naturelles identifiées correspondent aux volcans et au phénomène de re-suspension des poussières de surface, leur contribution pouvant s'élever pour chacun à 20 % des émissions totales de plomb dans l'atmosphère (**Allen et al, 2001**). Les données officielles du MSC-E pour l'année 2001 donnent les chiffres de 285 g/km²/an pour les émissions naturelles et 490 g/km²/an pour les émissions anthropiques.

Pour le cadmium, il est majoritairement émis par les industries métallurgiques (environ 70 % des émissions anthropiques en France), la combustion de fuel liée à la transformation d'énergie (15 %) et le secteur résidentiel/tertiaire (15 %). La source naturelle prédominante correspond à l'activité volcanique qui produit 20 % des émissions totales (**Allen et al, 2001**). La tendance semble être à la diminution des émissions anthropiques en liaison avec les progrès techniques dans les procédés de manufacturing et le traitement des fumées. D'après les inventaires du MSC-E les émissions anthropiques moyennes de cadmium seraient de l'ordre de 76 g/km²/an alors que les émissions naturelles s'élèveraient à 15 g/km²/an.

- Les formes de plomb et de cadmium dans l'atmosphère

Le plomb et le cadmium, à l'instar de la plupart des métaux lourds présents dans l'atmosphère, se retrouvent essentiellement incorporés dans les aérosols. Les concentrations typiques de ces composés sont de l'ordre de 10 ng/m³ pour le plomb et de 0,1 ng/m³ pour le cadmium. La majeure partie est liée aux particules fines et très fines. Ils ne constituent qu'un très faible pourcentage de la masse totale d'aérosol en suspension, mais leur prise en compte nécessite de s'intéresser aux phénomènes concernant ces derniers. Les concentrations dans l'air ne représentent pas une menace à proprement parler (même si, ici encore, des concentrations élevées peuvent être constatées localement à proximité de sources importantes), mais la bioaccumulation peut entraîner des troubles sérieux de l'organisme (anémie due au plomb ou lésions rénales dues au cadmium par exemple). L'étude attentive des phénomènes de dépôt est de nouveau nécessaire. Contrairement au mercure, le plomb et le cadmium sont considérés comme inertes chimiquement bien qu'ils puissent se dissoudre en présence d'eau. Leur durée de vie dans l'atmosphère, de l'ordre d'une journée à une semaine, est liée à celle des particules porteuses (**Roustan et al, 2006**).

2.6. Les Particules atmosphériques

Les particules sont une composante majeure des polluants atmosphériques. Elles sont considérées comme une des principales causes de mortalité liées à la pollution. Leur état finement divisé recouvre des appellations souvent confondues ainsi que des propriétés physiques et mécaniques mal connues. La composition chimique des particules est également un paramètre très important pour les études de pollutions atmosphériques.

2.6.1. Définition :

Une particule est souvent et improprement appelée un aérosol. En réalité le mot **aérosol** désigne le **mélange d'un gaz, en général l'air, et de fines particules solides ou liquides en suspension**. Les

particules sont donc l'un des constituants d'un aérosol. Pour qu'elles restent en suspension dans le gaz, il faut que leur vitesse de chute soit faible ou négligeable. On admet en général que les particules (sphériques) d'un aérosol ont une dimension (ou diamètre) approximativement inférieure à 100 µm ou 0,1 mm.

2.6.2. Les différents types de particules et d'aérosols

Différents vocables sont utilisés pour décrire des types particuliers d'aérosols ou de particules atmosphériques, souvent de façon erronée.

- **Les aérosols** : correspondent aux plus fines particules solides ou liquides en suspension, de dimension inférieure à 100 micromètres. Ils désignent aussi un ensemble de particules invisibles, présentes dans notre atmosphère dans des formes variées. À l'origine de plusieurs phénomènes essentiels à la vie, les aérosols sont également des polluants impactant la santé et l'environnement
- **Les poussières** (dust en anglais): sont des particules solides, le plus souvent supérieure à 1 µm, mises en suspension par des procédés mécaniques tels que l'érosion éolienne (exemples : tempête de sable, cendres, poussières de route, pollens).
- **La fumée** (smoke ou fume en anglais): ce terme s'applique à des particules en général plus fines provenant d'une combustion. En anglais fume désigne aussi des particules très fines provenant de la condensation d'une vapeur.
- **Les brouillards** (fog et smog en anglais): sont formés par une suspension de gouttelettes liquides résultant de la condensation d'une vapeur, ou encore d'une pulvérisation. Dans l'atmosphère près du sol on utilise le terme brouillard lorsque la visibilité est réduite à moins de 1 kilomètre.
- **Les particules** : on emploie souvent ce terme lorsque la dimension est supérieure à 5 µm.
- **Les brumes** (mist ou haze en anglais): sont constituées par des gouttelettes plus petites ou par des particules solides. Elles correspondent à un trouble de la visibilité moins important que les brouillards, sauf cas exceptionnel de brume sèche dans les régions désertiques ou semi désertiques.

2.6.3. Les différentes sources de l'émission des particules

Les types de particules sont multiples car les sources d'émissions sont très nombreuses, principalement à cause des activités humaines. Ainsi, dans une ville industrielle, l'air peut contenir plus de 3 millions de particules par cm³, dans une ville aux activités plus tertiaires de 10 000 à 50 000 (soit 100 µg.cm⁻³) alors qu'au-dessus de l'océan ou en montagne il n'y en a que quelques milliers, et dans un endroit exempt d'émission seulement 100 à 20 particules par cm³ (**Lyons T.J., Scott W.D, 1990**). Les particules ont plusieurs origines :

- Les particules d'origine naturelle:

On distingue les particules minérales :

- l'altération éolienne (poussières arrachés au sol par le vent) : argiles (inférieur à 2µm), limons (de 2 à 50 µm), sables fins (de 50 à 200 µm) ;
- les bris des vagues des océans : des sels marins sont injectés dans l'atmosphère ;
- les météorites (matière extra-terrestre) ;
- les poussières volcaniques ;
- les suies issues des feux de végétation ;

Et les particules organiques qui sont des formes vivantes microscopiques :

- bactéries, acariens, moisissures...
- graines aigrettées, pollen (de 30 à 40 µm), fibres végétales (champignons...)
- animales...

- Les particules d'origine anthropique :

Chaque année, les activités humaines produisent environ 300 millions de tonnes de poussières ! (Science & Vie, mars 2012) Elles sont issues :

- de la combustion industrielle (hauts fourneaux et fours) ;
- des feux de cheminée ;
- des incinérateurs ;
- du ciment ;
- de la fumée de cigarette ;
- des épandages d'engrais azotés pour l'agriculture conventionnelle ;
- de l'élevage ;
- des transports (notamment routier), celles-ci sont généralement constituées de : charbon (carbone si la combustion est incomplète), d'oxydes métalliques (fer, aluminium...), de ciment, de calcaire, de silice, de goudron, etc.

2.6.4. Classification par taille et formes des particules

Il existe plusieurs classifications possibles pour les particules selon les effets qu'elles induisent sur la santé, leurs caractéristiques physiques et chimiques, ou suivant les méthodes utilisées pour les définir... Cependant, elles sont communément réparties en fonction de leur taille. Ainsi, on les mesure en donnant le diamètre qu'aurait une sphère de comportement aérodynamique équivalent. Ceci n'est pas vrai pour les particules fibreuses (comme l'amiante) qui nécessitent l'observation de prélèvements au microscope électronique afin de les compter et les mesurer (Tab.11).

Dans le cadre de la pollution atmosphérique, on distingue généralement deux granulométries de particules ou PM (PM est une abréviation de Particule de Matière) : Les PM₁₀ (moins de 10 μm) et les PM_{2.5} (inférieur à 2,5 μm). Parmi les particules PM_{2.5}, il faut distinguer celles inférieures à 2,5 μm qui peuvent pénétrer dans les poumons et les particules ultrafines (moins de 0,1 μm) ; qu'elles peuvent pénétrer dans les vaisseaux sanguins.

Tableau 11 : Les différents particules en suspension selon leurs diamètre aérodynamique moyens.

Particules en suspension (TSP)	Diamètre aérodynamique moyen
PM ₁₀	$\leq 10 \mu\text{m}$
PM _{2.5}	$\leq 2.5 \mu\text{m}$
PM _{1.0}	$\leq 1 \mu\text{m}$
PM Ultrafines	$\leq 0.1 \mu\text{m}$
PM Nanoparticules	≤ 0.05 ou $0.03 \mu\text{m}$

En France, à ce jour, les particules PM₁₀ et PM_{2.5} sont les seules réglementées pour leurs effets sur la santé en fonction de leur taille (plutôt respiratoire pour les PM₁₀, cardio-vasculaire et neurologique pour les PM_{2.5}).

2.7. Les Chlorofluorocarbones CFC

Les CFC sont des gaz à température et pression normale. Ils sont constitués d'atomes de chlore et de fluor, de carbone et d'hydrogène. Ce sont des composés dont la majorité est produite par l'homme et dont leur utilisation produit des composés chlorés qui sont inoffensifs à basse altitude, mais qui dans la stratosphère libèrent du chlore qui contribue à détruire la diaper d'ozone. Cela a conduit à leur interdiction totale à partir de l'an 2000.

Les chlorofluorocarbones ou les CFCs (également connus sous le nom de Fréons) sont non toxiques, ininflammables et non-cancérogènes. Les 5 CFCs principaux incluent le CFC-11 (trichlorofluorométhane - CFCI₃), CFC-12 (dichlorodifluorométhane - CF₂Cl₂), CFC-113 (trichlorotrifluoroéthane C₂F₃Cl₃), CFC-114 (dichlorotétrafluoroéthane - C₂F₄Cl₂), et CFC- 15 (chloropentafluoroéthane - C₂F₅Cl).

Les CFCs sont largement répandus comme liquides réfrigérants dans la réfrigération et les climatiseurs, comme dissolvants dans les décapants, en particulier pour les cartes électroniques, en tant qu'agents de soufflage dans la production de mousse (par exemple extincteurs), et comme propulseurs en aérosols. Leur durée de vie dans l'atmosphère varie de 20 à plusieurs centaines d'années. A l'heure actuelle, les CFC ne constituent plus un problème majeur de la pollution atmosphérique (voir ci-après).

Les CFC sont impliqués dans deux mécanismes différents qui engendrent deux conséquences de pollutions différentes et bien connues. Le premier mécanisme est la destruction de la couche d'ozone et le second mécanisme est l'effet de serre.

3. La spéciation chimique

La spéciation chimique d'un élément est la distinction entre les différentes formes de liaisons possibles (les espèces) de cet élément dans un environnement donné (Sigg et al, 1992). Elle dépend du type de complexe que l'élément va former avec les ligands présents dans l'environnement et de son degré d'oxydation.

C'est aussi l'ensemble des méthodes expérimentales ou théoriques permettant de déterminer la **distribution** d'un élément ou d'un composé entre les phases dissoutes et colloïdales (eau de surface et eau interstitielle), la phase particulaire (matières en suspension et dépôts) et les organismes vivants (wikhydro, 20..).

Le comportement de la plupart des substances (métaux, nutriments, micropolluants organiques), etc. dans l'environnement dépend de leur spéciation chimique. Cette dernière conditionne en effet leur mobilité, donc leur capacité à se servir dans l'environnement, et leur biodisponibilité, donc leur toxicité. La spéciation des substances est donc nécessaire pour évaluer leur dangerosité dans les rejets ou dans l'environnement.

Nous signalons ainsi, que les substances à répertorier sont très nombreuses. Bien souvent, on ne connaît pas l'émission d'une source pour une substance donnée, mais plutôt pour une famille de substances. Pour déterminer l'émission de chaque substance, on applique alors un profil de spéciation typique, qui permet de ventiler la masse totale d'émission de la famille pour chacun des constituants.

$$r(\%) = \frac{NO_2}{NO_x} = 0.1$$

1.1. Cas des oxydes d'azote

On est capable d'évaluer la quantité des oxydes d'azote (NO_x) émise sur une route parcourue par un trafic de 30 000 véhicules/jour. L'émission journalière de NO_x correspondant est de 32 kg de NO_x. Pour connaître les émissions respectives en NO et NO₂, on utilise un rapport de spéciation :

Ainsi, on estime que les 32 kg de NO_x émis sont composés de 3.2 kg de NO₂ et de 26.8 kg de NO.

1.2. Cas des composés organiques volatils non méthaniques

Voici un exemple de profil de spéciation qui est appliqué aux composés organiques volatils non méthaniques émis par évaporation de carburant (Tab.12). Ce profil permet de décomposer par groupe d'espèces pour déterminer par exemple les émissions de composés aromatiques, ou par composés individuels. Les profils de spéciation reposent en général sur un faible nombre de mesure car ces dernières sont plus détaillées et en général plus coûteuse.

Tableau 12 : Profil de spéciation des émissions de COVNM résultant de l'évaporation de carburants

Groupe	Substances	Fraction massique de l'émission (%)
ALKANES	Propane	1
	n-butane	20
	i-butane	10
	n-pentane	15
	i-pentane	25
	Hexane	15
	Heptane	2
ALKENES	1-butene	1
	2-butene	2
	1-pentene	2
	2-pentene	3
	1,3 hexene	1.5
AROMATICS	benzene	1
	toluene	1
	m,p-Xulene	0.5

1.3. Cas du mercure

La spéciation chimique n'est connue que pour certaines catégories de sources alors que les comportements physiques et chimiques des espèces sont considérablement différents. Les sources naturelles et le phénomène de réémission produisent principalement du mercure élémentaire. Les sources anthropogéniques émettent le mercure sous ces trois formes, mais la spéciation chimique varie fortement selon les processus générateurs (Tab.13) et les systèmes de réduction d'émission éventuellement mis en place (épuration des effluents gazeux, substitution des polluants mis en cause par des produits moins toxiques, optimisation des processus de fabrication, etc.).

Tableau 13 : Spéciation (en %) du mercure pour les sources anthropiques.

Type de source	Hg(0)	Hg(II)	HgP
Combustion de charbon	50	30	20
Production de chlore et d'alcali	50-90	10-50	0
Brûlage des minerais de sulfure métallique	80-90	0	10-20
Combustion de pyrite	100	0	0
Incinération d'ordure	20	60	

2. Durée de vie des polluants dans l'atmosphère

Les différentes substances ont des durées de vie dans l'atmosphère qui sont extrêmement variables, ce qui explique que les problèmes de pollution se situent sur des différentes échelles de temps et d'espace très variables. Voici l'ordre de grandeur de la durée de vie dans l'atmosphère de quelques polluants (Tab.14).

Tableau 14 : Durée de vie indicative de certaines substances polluantes dans l'atmosphère

Substance	Polluants
CH ₄	année
CO	mois
SO ₂	jours à mois
Ozone	qq jours
COVNM	heures à jours
Aérosols 1-10 µm	minutes à jours
Aérosols ≤ 1µm	jours à semaines