



DÉPARTEMENT DE BIOLOGIE

Mémoire de fin d'étude

Présenté par

M<sup>lles</sup> BENZAZA Anissa et Mme MOKHTAR Sarra

Pour l'Obtention du Diplôme de  
MASTER EN biodiversité environnement

Thème

**La répercussion positive sur la réponse de  
la plante à la pollution atmosphérique**

Le 22/06/2021

Devant le Jury :

Nom & Prénom	Grade & Etablissement	En Qualité de
○ TAHRI Miloud	MCA - Université de Mostaganem	Examineur
○ BOUZID Aman	MCA - Université de Mostaganem	Examineur
○ CHADLI Rabah	Pr - Université de Mostaganem	Professeur

**Année Universitaire 2020/ 2021**



### **Remerciements**

Nous remercions Dieu, le tout puissant de nous avoir donné la force, la volonté et la patience nécessaire pour la réalisation de ce modeste projet de fin d'études.

Nos remerciements vont également à notre cher encadreur, professeur CHADLI Rabah pour sa patience, sa disponibilité, sa rigueur scientifique et surtout ses conseils judicieux qui ont alimenté notre réflexion.

Nous voudrions aussi exprimer nos vifs remerciements à Docteur TAHRI Miloud, Maître de Conférences A, à l'université de Mostaganem qui a accepté de présider ce jury.

Nos sincères remerciements pour Docteur BOUZID Aman, Maître de conférences A, à l'université de Mostaganem pour sa disponibilité à évaluer ce modeste travail.

Nous exprimons notre gratitude à l'ensemble des enseignants du Département de Biologie Enfin nous remercions nos parents qui ont œuvés pour notre réussite, pour tous leurs sacrifices, leur amour, leur tendresse, et leurs prières tout au long de notre parcours.

## Dédicaces

---

Tous les mots ne sauraient exprimer la gratitude, l'amour, le respect, la reconnaissance, c'est tout simplement que : Je dédie cette thèse de magistère à :

A Ma tendre Mère Radia : Tu représentes pour moi la source de tendresse et l'exemple de dévouement qui n'a pas cessé de m'encourager. Tu as fait plus qu'une mère puisse faire pour que ses enfants suivent le bon chemin dans leur vie et leurs études.

A Mon très cher Père Mohamed : Aucune dédicace ne saurait exprimer l'amour, l'estime, le dévouement et le respect que j'ai toujours pour vous. Rien au monde ne vaut les efforts fournis jour et nuit pour mon éducation et mon bien être. Ce travail et le fruit de tes sacrifices que tu as consentis pour mon éducation et ma formation le long de ces années.

A mon très cher mari BELMISSOUM Mahiedine : Tes sacrifices, ton soutien moral et matériel m'ont permis de réussir mes études. Ce travail soit témoignage de ma reconnaissance et de mon amour sincère et fidèle.

A mes chers frères : Younes, Zakaria et Akram.

A ma sœur : Aya.

A mes chers beaux-parents : Abdelkader et Benslama. Y.

A mes chère belle sœurs : Fet KH.

A mes chers beaux-frères : Mhamed, Hbib, Benouda, Mohamed, Nordine et Hamza.

A monsieur Rabeh CHADLI : Cette humble dédicace ne saurait exprimer mon grand respect et ma profond estime, que dieu vous procure bonne santé et longue vie.

A tous les membres de ma promotion.

A tous mes enseignants depuis mes premières années d'études.

A mon cher binôme : Anissa et a toute sa famille.

A tous ceux qui me sens chers et que j'ai omis de citer.

**MOKHTAR Saraa**

## Dédicaces

---

Je dédie ce mémoire à ma mère, qui m'a encouragé à aller de l'avant

Et qui m'a donné tout son amour.

A la mémoire de mon père qui nous a quitté voilà six ans que dieu le garde dans son vaste paradis.

A ma très chère Grand-mère.

A Mes sœurs : Nesserin, Fatiha.

A Mon frère : Mohamed Amine.

A Mes tantes : Rachida, Iman, Nacera.

A Mon Oncle Benzaza Laredj qui m'a toujours soutenu et encouragé.

A Mon soutien moral Benrached Wassim qui a toujours été là pour moi.

A Mon cousin BENZAZA Mehdi pour l'aide qu'il m'a toujours accordé.

Une spéciale dédicace à une personne qui a été très paternaliste avec

Moi Mr Ghezzar Moffok Redouane.

A ma chère binôme MOKHTAR Sarra

A ma famille et toutes les personnes que j'aime.

**BENZAZA Anissa**

## ملخص

تتعرض النباتات للعديد من ملوثات الهواء الضارة ، والتي تسبب الإجهاد التأكسدي وتشكل تهديدًا لصحة النبات ؛ الإنتاج الزراعي وحيوية النظم البيئية. على الرغم من العمل المناخي والتطور التكنولوجي ، فإن معظم النظم الإيكولوجية والمناطق الزراعية تتعرض لمستويات عالية من الأوزون على مستوى سطح الأرض وأكاسيد النيتروجين والجسيمات (PM). يستمر الوضع في التدهور على الصعيد العالمي بسبب التحضر والتنمية السريعة. تتجلى الآثار الضارة لملوثات الهواء على النباتات من خلال انخفاض النمو والإنتاجية ، وانخفاض القيمة الغذائية للأغذية وتعطيل عمل النظام البيئي. للتخفيف من آثار ملوثات الهواء ، والتي تأتي غالبًا في شكل مخاليط ، طورت النباتات مجموعة من آليات الدفاع الهيكلية والفسولوجية و الاستقلابية والبيوكيميائية ، بما في ذلك آليات الدفاع المضادة للأكسدة.

## Résumé

Les plantes sont exposées à divers polluants atmosphériques nocifs, qui provoquent un stress oxydatif et constituent une menace pour la santé des végétaux ; la production agricole et la vitalité des écosystèmes. Malgré les mesures climatiques et le développement technologique, la plupart des écosystèmes et des zones agricoles sont exposés à des niveaux élevés d'ozone troposphérique, d'oxydes d'azote et de matières particulaires (MP). La situation continue de s'aggraver à l'échelle mondiale en raison de l'urbanisation et du développement rapides. Les effets néfastes des polluants atmosphériques sur les plantes se manifestent par une diminution de la croissance et de la productivité, une baisse de la valeur nutritionnelle des aliments et une perturbation du fonctionnement des écosystèmes. Pour atténuer les effets des polluants atmosphériques, qui se présentent souvent sous forme de mélanges, les plantes ont développé un ensemble de mécanismes de défense structurels, physiologiques, métaboliques et biochimiques, y compris des mécanismes de défense antioxydants.

## **Abstract**

Plants are exposed to a variety of harmful air pollutants, which cause oxidative stress and pose a threat to plant health; agricultural production and ecosystem vitality. Despite climate measures and technological development, most ecosystems and agricultural areas are exposed to high levels of ground-level ozone, nitrogen oxides, and particulate matter (PM). The situation continues to worsen globally due to rapid urbanization and development. The adverse effects of air pollutants on plants are manifested in reduced growth and productivity, reduced nutritional value of food, and disruption of ecosystem function. To mitigate the effects of air pollutants, which often occur in mixtures, plants have developed a range of structural, physiological, metabolic, and biochemical defense mechanisms, including antioxidant defense mechanisms.



REMERCIEMENTS

DEDICACES

ملخص

RESUME

ABSTRACT

TABLE DES MATIÈRES

LISTE DE FIGURES

LISTE DE TABLEAUX

## Table des matières

INTRODUCTION GENERALE	1
CHAPITRE I. GENERALITES SUR LA POLLUTION ATMOSPHERIQUE	3
I.1 INTRODUCTION	4
I.2 L'ATMOSPHERE	4
I.2,1 Structure verticale de l'atmosphère	5
I.2,2 Origine de la pollution atmosphérique	7
I.2,2,1 Les sources naturelles	7
I.2,2,2 Les sources anthropiques	7
I.3 LA FAMILLE DES POLLUANTS	8
I.3,1 Polluants primaires	8
I.3,2 Les polluants secondaires	15
I.4 ÉCHELE D'EMISSION DE POLLUTION ATMOSPHERIQUE	15
I.4,1 Échelle locale :	15
I.4,2 Échelle régionale :	16
I.4,3 Échelle planétaire :	16
I.5 EFFET DE LA POLLUTION ATMOSPHERIQUE	16
I.5,1 <i>5,1 Sur les végétaux :</i>	16
I.5,2 Sur la santé humaine	18
I.5,3 Sur les animaux	20
CHAPITRE II. GENERALITES SUR LES PLANTES	22

## Table des matières

---

II.1	INTRODUCTION	23
II.2	CLASSIFICATION DES VEGETAUX	23
II.2,1	Les thallophytes	23
II.2,2	Les cormophytes	24
II.2,2,1	Embranchement bryophytes (les mousses)	24
II.2,2,2	Embranchement ptéridophytes (les fougères)	24
II.2,2,3	Embranchement Préspermaphytes (Préphanérogames)	24
II.2,2,4	Embranchement spermaphytes phanérogames	24
II.3	PARTICULARITE DE LA CELLULE VEGETALE	24
II.3,1	Les membranes cellulaires	25
II.3,2	La paroi cellulaire	25
II.3,3	Les vacuoles	26
II.3,4	Les plastes	26
II.3,4,1	Les chloroplastes	26
II.3,4,2	Les chromoplastes	27
II.3,4,3	Amyloplastes	27
II.3,5	Les cytosomes	27
II.4	ANATOMIE DES VEGETAUX	27
II.4,1	Les racines	27
II.4,2	La tige	29
II.4,3	La feuille	30
CHAPITRE III.	REPERCUSSION POSITIVE DE LA POLLUTION ATMOSPHERIQUE SUR LES PLANTES	33

## Table des matières

---

III.1	INTRODUCTION	34
III.2	REPONSES PHYSIOLOGIQUES DES PLANTES	34
III.2,1	Pénétration	35
III.2,2	La réponse dépend de la plante	38
III.2,3	La réponse dépend du polluant	41
III.3	SYMPTOMATOLOGIE	42
III.4	LA RESISTANCE CHEZ LES PLANTES	42
III.4,1	La résistance passive	43
III.4,2	La résistance active	44
III.4,3	La résistance non spécifique	45
	CONCLUSION GENERALE	49
	REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	52

## Liste de figures

Figure I-1. Structure de l'atmosphère terrestre (own work., 2007 par asaphon)	6
Figure II-1. Schéma d'une cellule végétal eucaryote	25
Figure II-2. Coupe longitudinale dans une racine avec un schéma tridimensionnel d'une racine jeune.	29
Figure II-3. Coupe transversale d'une tige	30
Figure II-4. Structure de la feuille	31
Figure III-1. Quelques polluants atmosphériques.	34
Figure III-2. Représentation schématique de l'environnement des surfaces foliaires	35
Figure III-3. Représentation schématique de l'évolution décroissante de la concentration d'un polluant depuis l'atmosphère jusqu'à l'intérieur de la feuille	36
Figure III-4. Représentation schématique du comportement des divers polluants vis-à-vis des végétaux	37
Figure III-5. La production de dérivés réactifs de l'oxygène.	38
Figure III-6. Apparition de nécroses foliaires sur la végétation en fonction de différents polluants atmosphériques. Concentrations seuils moyennes en fonction du temps d'exposition	41

## Liste de tableaux

Tableau I-1. Impact de la pollution atmosphérique sur la végétation (Griffiths ; 2003 ; ramande ; 2005 et kebiche ; 2006) 17

Tableau I-2. Une vue récapitulative de l'impact de pollution sur la santé humaine (Yamanie; 2005; Rahel; 2009et Rahel; 2005) 19

---

# **Introduction générale**

L'atmosphère, enveloppe gazeuse entourant la Terre contient un certain nombre de constituants naturels : un mélange gazeux de 78 % d'azote, 21 % d'oxygène, 1 % d'argon, du CO<sub>2</sub>, du néon, de l'hélium et de l'ozone, et d'eau dans ces trois états de la matière et de particules solides ou liquides, inorganiques ou organiques en suspension appelés communément aérosols.

L'atmosphère est polluée lorsque la teneur de certains de ses constituants naturels est supérieure à la normale et/ou lorsqu'elle contient de nouveaux composants. Mais on parle surtout de pollution atmosphérique lorsque ces augmentations entraînent des teneurs en composants telles qu'elles ont des effets nocifs sur les différents constituants des différents écosystèmes tels que végétaux et animaux, sur les humains et les matériaux. Selon le type de constituant considéré, ces augmentations peuvent concerner des zones très réduites comme la planète toute entière. Si cette pollution atmosphérique a toujours existé à cause du volcanisme, des incendies, etc., c'est avec l'avènement de l'ère industrielle qu'elle est devenue un véritable problème pour l'environnement et la santé.

Bien qu'elle soit nocive, la pollution peut avoir des répercussions bénéfiques sur l'évolution de quelques plantes et végétaux. Cette aptitude à double tranchons a fait l'objet d'investigation bibliographique dans ce mémoire. Pour mener à bien ce dernier, nous l'avons subdivisé en trois chapitres distincts, à savoir :

- Chapitre 1 : Il porte sommairement sur la pollution atmosphérique afin de se familiariser avec tout aspect ou approche liés à notre sujet.
- Chapitre 2 : Des notions d'ordre général ont été relatées dans cette partie en relation avec les plantes. Des liens apparentés à la pollution atmosphérique sont visibles à la lecture de ce chapitre.
- Chapitre 3 : Cette dernière partie concerne l'étude des mécanismes qui gèrent l'assimilation des polluants atmosphériques par les plantes. Nous avons particulièrement mis l'exergue sur les effets positifs que peut avoir un polluant sur l'évolution d'une plante.

Le mémoire se termine par une conclusion générale.



---

# **Chapitre I. Généralités sur la pollution atmosphérique**

---

## **I.1 Introduction**

Au siècle dernier, le développement de l'industrialisation et de l'industrie des transports a joué un rôle clé dans le développement social. Ces activités sont synonymes de progrès, de modernisation et d'enrichissement. En fait, un grand nombre de substances chimiques sont rejetées dans l'environnement, dont la plupart sont considérées comme dangereuses. Le terme de pollution désigne l'ensemble des rejets de composés toxiques que l'homme libère dans l'écosphère, mais aussi les substances qui, sans être vraiment dangereuses pour les organismes vivants, exercent une influence perturbatrice sur l'environnement. En d'autres termes, la pollution est une modification défavorable du milieu naturel, pouvant affecter l'homme et les végétaux. Elle peut l'affecter aussi en altérant le milieu physique, ses possibilités récréatives ou encore en enlaidissant la nature [1].

L'introduction de ces composés implique des risques sérieux non seulement pour l'environnement et les organismes vivants, mais aussi pour la santé humaine [2]. La pollution de l'air est l'une des pollutions les plus étudiées et l'un des principaux problèmes de notre société. Quand on considère que chaque personne (adulte) respire 15 000 litres d'air chaque jour, on sait que le maintien de sa qualité naturelle est notre première préoccupation.

Depuis les années soixante-dix de nombreuses recherches ont été menées sur l'utilisation des végétaux comme bio-indicateurs et bio-accumulateurs de la pollution atmosphérique [3]. Ces végétaux ont la propriété, soit de réagir très rapidement et d'une façon très visible aux polluants, soit d'accumuler très fortement les polluants présents [4]. La nature et l'impact des polluants atmosphériques sur les plantes dépendront des caractéristiques physiologiques et biochimiques des plantes touchées, ainsi que de la nature des polluants rencontrés. Les perturbations physiologiques des plantes sont diverses et peuvent être observées dans des zones plus ou moins larges de l'échelle locale à l'ensemble de la planète selon la nature des polluants. Ces réactions auront immédiatement un impact sur le fonctionnement de l'écosystème, en particulier la relation entre les plantes et les insectes. Ils peuvent également avoir un impact sur la santé humaine

## **I.2 L'atmosphère**

La pollution atmosphérique est un problème majeur auquel toutes les nations sont confrontées. Elle est causée par des produits chimiques émis dans l'air à partir de sources naturelles ou anthropiques. Les émissions provenant de sources naturelles, telles que les plantes, la décomposition radiologique, les incendies de forêt, les éruptions volcaniques et les

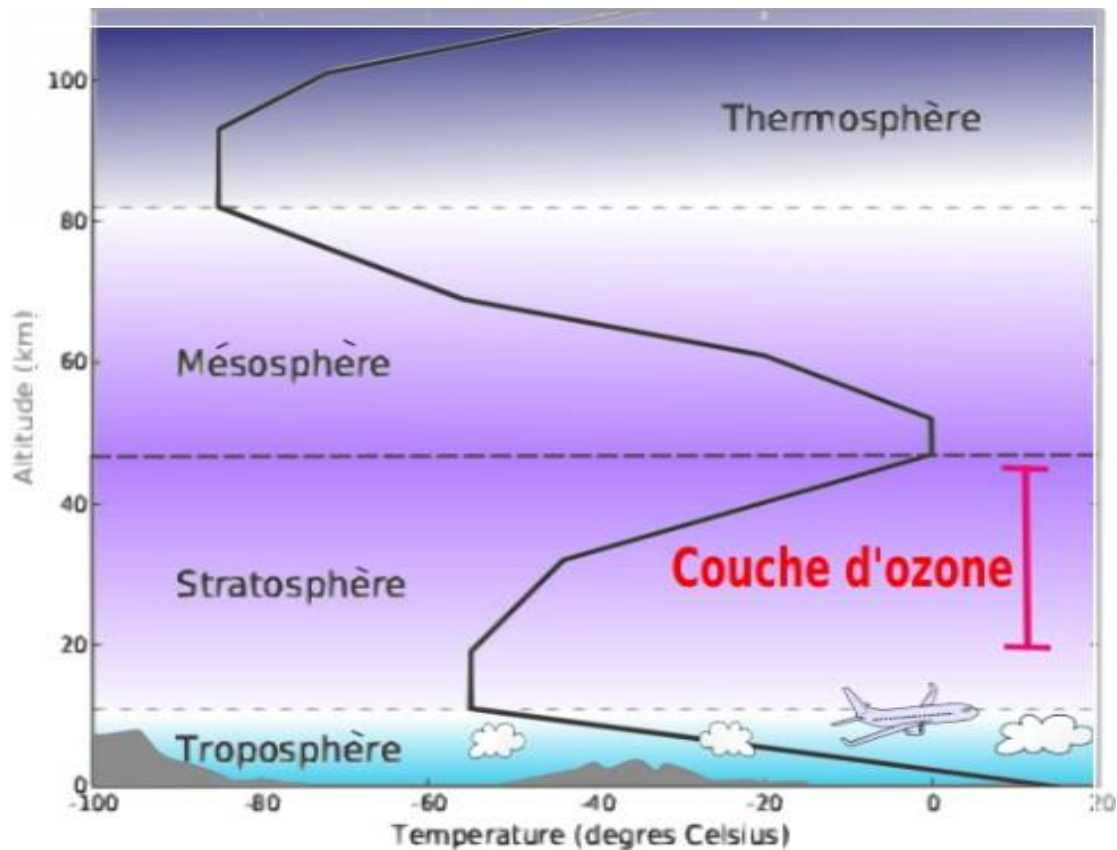
émissions provenant du sol et de l'eau, entraînent des niveaux de pollution de fond naturels qui varient en fonction de la source d'émission locale et des conditions météorologiques [5].

L'homme est responsable de la pollution de l'air, cette pollution, a augmenté rapidement depuis le début de l'industrialisation. Les informations sur la qualité de l'air et le savoir comment et pourquoi l'atmosphère devient polluée permet l'amélioration des décisions qui conduisent à une atmosphère beaucoup plus propre [6]. Plusieurs définitions ont été attribuées au terme « Pollution Atmosphérique ». En Algérie, l'article 3 de la loi n ° 03-10 du 19 juillet 2003 définit la protection de l'environnement dans le cadre du développement durable comme suit: «L'introduction de toute substance dans l'air ou dans l'atmosphère provoquée par l'émanation de gaz, de vapeurs, de fumées ou de particules liquides ou solides susceptibles de porter préjudice Ou nuire au cadre de vie, à la santé ou à la sécurité publique ou aux plantes, à la production agricole , à la conservation des constructions et des monuments ou au caractère des sites». Le conseil Européen en 1967 a défini comme polluant atmosphérique toute substance étrangère ou dont la variation du taux dans l'atmosphère est susceptible de provoquer un effet nuisible, compte tenu des connaissances scientifiques du moment, ou de créer, une gêne [7].

L'atmosphère est composée de six couches différentes elles se classent par ordre selon leur composition et leur température comme suit : Troposphère, Stratosphère, Mésosphère, Thermosphère, Ionosphère.

### **I.2,1 Structure verticale de l'atmosphère**

L'atmosphère, est maintenue par gravité autour du globe terrestre en rotation ; sa pression et sa densité diminuent avec l'altitude, de 700 à 800 km au-dessus du niveau de la mer commence le vide interstellaire : au-delà, dans l'exosphère, les molécules ne sont plus maintenues par la gravité et s'échappent à travers la magnétosphère dans l'espace. [8]. L'atmosphère terrestre est subdivisée en plusieurs couches concentriques et superposées en partant de la surface du sol où on trouve [9]. (Figure 1).



**Figure I-1. Structure de l'atmosphère terrestre (own work., 2007 par asaphon)**

**La troposphère** épaissit d'une dizaine de kilomètres à partir de la surface terrestre, la température y décroît en moyenne de  $6,5^{\circ}\text{C}$  quand l'altitude croît de 1000 mètres. La couche de transition, relativement mince, entre troposphère et stratosphère, s'appelle la tropopause. Son altitude et sa température sont d'environ 8 kilomètres et  $-50^{\circ}\text{C}$  dans les régions polaires, 17 kilomètres et  $-80^{\circ}\text{C}$  à l'équateur. La stratosphère elle est caractérisée par une croissance de la température quand on s'élève, pour atteindre  $0^{\circ}\text{C}$  au sommet (50 km). C'est dans cette dernière entre 25 et 30 km d'altitude que se trouve la concentration maximale d'ozone (couche d'ozone). Les basses couches atmosphériques (altitude inférieure à 10 km) sont divisées en deux parties distinctes :

**La couche libre** est la partie supérieure de la troposphère dont le vent y est déterminé par de grands mouvements d'ensemble à l'échelle de la planète (vent géostrophique). Cela est dû à l'équilibre entre la force du gradient de pression causée par la rotation de la terre et la force de Coriolis.

**La couche limite** atmosphérique (CLA) est la partie proche de la surface terrestre où le sol perturbe l'écoulement de l'air et donne naissance à une forte agitation appelée turbulence.

## **I.2,2 Origine de la pollution atmosphérique**

La présence de contaminants dans le compartiment atmosphérique nécessite obligatoirement l'émission de substances qui contribue à modifier localement (source ponctuelle) ou globalement (source diffuse) la composition chimique de l'atmosphère. Au sein de ces émissions, [10].

### **I.2,2,1 Les sources naturelles**

Activité volcanique, érosion éolienne ou marine (embruns marins) sont autant de sources naturelles pouvant modifier les caractéristiques physico-chimiques de l'atmosphère,

### **I.2,2,2 Les sources anthropiques**

De nombreuses activités humaines sont capables d'émettre diverses substances, principalement au niveau des grands centres urbains L'industrie est un des secteurs majeurs des émissions atmosphériques en dioxyde de soufre (SO<sub>2</sub>), poussières, métaux lourds, composés organiques volatils (COV), les oxydes d'azote (NO<sub>x</sub>), ...

Le transport, qu'il soit aérien, maritime ou terrestre, il émet des quantités considérables de NO<sub>x</sub>, des particules (PM) dans les gaz d'échappement, du monoxyde de carbone (les imbrulés), des COV, ...

Les combustions et les incinérations sont aussi à l'origine de l'émission des métaux, des dioxines, des COV, des CO<sub>x</sub>, des aérosols, ....

Le secteur agricole est un responsable majeur des émissions de poussières et d'ammoniac (NH<sub>3</sub>) à cause du recours aux produits phytosanitaires et aux épandages.

Les activités domestiques, en utilisant des produits phytosanitaires, des peintures, des produits ménagers, en cuisinant... Nous émettons tous des polluants atmosphériques (COV).

Le chauffage est aussi à l'origine d'une grande partie des émissions du SO<sub>2</sub>, du CO, des NO<sub>x</sub> et des PM. Même la climatisation génère indirectement des émissions du fait de sa grande consommation d'électricité mais également si le gaz réfrigérant n'est pas récupéré

### I.3 La famille des polluants

#### I.3.1 Polluants primaires

A. ► **Dioxyde de soufre (SO<sub>2</sub>)** C'est un gaz toxique qui se transforme en anhydride sulfurique (SO<sub>3</sub>) en présence d'oxygène et en acide sulfurique (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) en présence d'eau. Il joue un rôle majeur dans le phénomène des pluies acides. Tous les pays industrialisés émettent du SO<sub>2</sub> mais les pays en voie de développement tel que l'Inde et la Chine (50% de SO<sub>2</sub> émis en 2003) sont actuellement les principaux pollueurs depuis que les pays fortement industrialisés sont équipés en techniques performantes et de dépollution du SO<sub>2</sub> [9-11].

**Origine** En absence de toute pollution, l'atmosphère comporte une certaine quantité de composés soufrés : du SO<sub>2</sub> mais aussi SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>(sulfate) et H<sub>2</sub>S (sulfure d'hydrogène) issus essentiellement des volcans et de l'activité de fermentation anaérobique de certaines bactéries [11]. Les émissions totales de SO<sub>2</sub> naturelles sont estimées à 20 %. A la fin du XX<sup>e</sup> siècle, l'émission mondial de SO<sub>2</sub> était de l'ordre de 95 Tg.an<sup>-1</sup>. Elle est en régression notable à l'échelle globales [9]. Ce polluant provient surtout des combustibles fossiles contenant du soufre (gaz naturel très soufré mais souvent désulfuré avant utilisation, charbons pouvant en contenir jusqu'à 8 %, pétroles bruts à teneur en soufre variable allant jusqu'à 3 %), ainsi que de certaines fabrications industrielle (fabrication de l'acide sulfurique et des plastiques, raffinage du pétrole et frittage de minerais sulfureux tels que blende, galène, pyrites, ...etc.).

B. ► **Oxydes d'azote (NO<sub>x</sub>)** Ces oxydes d'azotes regroupent le monoxyde d'azote (NO), gaz incolore et le dioxyde d'azote (NO<sub>2</sub>), gaz roux et toxique. NO reste peu de temps dans l'air car il s'oxyde rapidement en NO<sub>2</sub> lequel est prépondérant dans les atmosphères polluées. Ils sont en constante augmentation en raison de la forte augmentation du parc automobile en passant de 108 Tg.an<sup>-1</sup> en 1985 à près de 150 Tg.an<sup>-1</sup> en 1998. Les émissions des NO<sub>x</sub> aux USA ont pu atteindre les 50 Tg.an<sup>-1</sup> actuellement [9].

**Origine** : Les oxydes d'azote sont produits par les microorganismes anaérobies du sol, les éclairs et le volcan. Ils sont émis par l'agriculture et la sylviculture (16 %) et par les installations de combustion (centrales thermiques, usines de traitement des déchets...).

Lorsque le NO est directement émis, il se transforme en NO<sub>2</sub> en présence d'O<sub>2</sub>, d'O<sub>3</sub>, de C.O.V. Le NO<sub>2</sub> est également un précurseur de l'ozone lorsque les conditions météorologiques

le permettent (action photochimique du soleil) ; c'est pourquoi il est mesuré aussi bien en zone urbaine que rurale [12].

**C. ► Monoxyde de carbone (CO)** Il est un produit de combustion incomplète. Gaz inodore et incolore, le monoxyde de carbone (CO) a une densité très proche de celle de l'air qui lui confère un haut pouvoir de dispersion. Sa concentration dans l'air pur varie de 0,05 à 0,2 ppm, mais peut atteindre quelques ppm en zone urbaine sans trafic automobile important, voire quelques dizaines de ppm sur un site d'intense trafic.

**Origine** Il existe de nombreuses sources naturelles de monoxyde de carbone, principalement les volcans, la foudre, la fermentation en milieu anaérobie, certains organismes marins (algues brunes), les incendies de forêt ou de savane. Ou l'oxydation des terpènes volatils émis par les végétaux (production annuelle de 850 millions de tonnes de CO sur un total estimé à un milliard de tonnes par an). Mais reste sa source principale est l'oxydation photochimique du méthane qui est les hydrocarbures naturels le plus abondant. Le CO se forme lors de combustions incomplètes en présence d'une quantité trop faible d'air, donc de dioxygène, par rapport au combustible. La principale source de monoxyde de carbone est le parc automobile dont les moteurs, mal réglés ou fonctionnant dans de mauvaises conditions, n'assurent qu'une combustion incomplète des hydrocarbures.

**D. ► Dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>)** Le gaz de dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>) a une concentration dans l'air de 0,035 % en volume. Ce gaz possède la propriété d'absorber le rayonnement infrarouge vers la longueur d'onde de 15 µm environ. Il constitue 15 % de l'énergie rayonnée par la Terre vers l'espace et représente 60 % du renforcement anthropique total de l'effet de serre.

**Origine** Le CO<sub>2</sub> atmosphérique provient essentiellement de la respiration ou de la fermentation des êtres vivants, de la précipitation des carbonates dans les océans, de l'altération des silicates sur les continents et du volcanisme. L'augmentation de la teneur en CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère est essentiellement due aux activités humaines : la combustion des énergies fossiles, la déforestation et les changements d'affectation des sols.

**► Composés organiques volatils (COV) :** Les composés organiques volatils sont des substances de faible masse moléculaire correspondant à des solvants et à divers liquides de faible tension de vapeur. Très présents dans la nature, notamment dans les pétroles, ce sont des composés organiques formés exclusivement d'hydrogène et de carbone. Les COV regroupent de nombreuses substances et ne correspondent pas à une définition très rigoureuse. Les

hydrocarbures appartiennent aux COV ainsi que le méthane et le propane [13]. Parmi les grandes familles de composés organiques volatiles, on peut distinguer différentes familles de COV : les alcanes (saturés, abondants, par exemple propane), les alcènes (liaison doubles, très réactifs), les diènes et les terpènes (multiples doubles liaisons), les aromatiques mono ou polycycliques (assez abondants et réactifs, par exemple, benzène, toluène ...), et les composés oxygénés (aldéhydes, cétones, esters, et alcool).

▪ **Les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) :** Ce sont des polluants organiques persistants (POP) émis par les activités humaines suite à la combustion incomplète de la matière organique (industrie, chauffage, trafic routier...). En raison de leur faible taux de dégradation, de leur toxicité, de leur capacité de transport sur de longues distances et de leur bioaccumulation dans la matière organique, les HAP font l'objet d'une surveillance atmosphérique (directive cadre européenne 96/62/CE du 27 septembre 1996). Ces polluants parmi d'autres polluants organiques tel que : polychlorobiphényles (PCB), les dioxines (polychlorodibenzo-p-dioxines ; PCDD), les furanes (polychlorodibenzofuranes; PCDF), l'hexa chlorobenzène (HCB), pesticides organochlorés (e.g. DDT, aldrine), les phénols polycycliques [13]. Parmi les HAP, seize sont recensés depuis 1976 sur la liste des polluants organiques prioritaires de l'Agence Américaine pour la Protection de l'Environnement (USEPA), cette classification est en fonction du nombre de cycles ou du nombre de noyaux aromatiques qu'ils contiennent. [15].

**Origine :** Chauffées par le soleil, les feuilles de certains végétaux des forêts de conifères et des zones humides exhale des substances constituées d'une agglomération de molécules d'hydrocarbures lourds et de composés oxygénés : les terpènes (polymères de l'isoprène C<sub>5</sub>H<sub>8</sub>). Ces substances sont pour la plupart aromatiques (odeurs caractéristiques des maquis, des forêts de résine) et donnent une couleur bleutée à la brume qui se forme au-dessus de la végétation. Les terpènes sont extraits des végétaux sous la forme d'« huiles essentielles » :-le pinène ou térébenthine (C<sub>10</sub>H<sub>16</sub>) qui constitue environ 20 % de la résine de pin et que l'on utilise comme solvant ;-le menthol (C<sub>10</sub>H<sub>19</sub>OH), alcool terpénique extrait de l'essence de menthe poivrée et utilisé comme anesthésique local ;-le camphre ;-la citronnelle, etc. Les hydrocarbures sont émis par les automobiles (présence d'hydrocarbures imbrûlés à la sortie du pot d'échappement), et par certaines activités telles que l'imprimerie, les ateliers de peinture, l'utilisation de solvants et de colles, les raffineries et unités pétrochimiques, le stockage et la distribution d'hydrocarbures, le traitement des déchets. 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. Cependant, ces rejets étant généralement très éloignés



dans le temps et dans l'espace, ils n'entraînent pas de risque d'exposition continue [13]. 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.

**E. ■ Composés halogènes et halogénés** Composés halogènes sont des composés à base de fluor, brome, chlore, iode, etc. Doués d'une forte stabilité chimique, ils constituent souvent de redoutables contaminants de l'environnement, alors que les Composés halogénés sont des composés fluorés, généralement présents sous forme de fines poussières.

**Origine** La pollution au fluor est due principalement à :

- La production de l'aluminium par électrolyse c'est-à-dire l'incorporation à la bauxite ( $Al_2O_3$ ) d'un fondant, la cryolite (fluorure double d'aluminium et de sodium), est responsable d'émanations allant de la cryolite aux composés gazeux (acide fluorhydrique HF) ;

- La fabrication des engrais phosphatés, l'attaque par l'acide sulfurique des phosphates naturels, contenant presque toujours du fluor en proportion variable, donne lieu à des dégagements d'acide fluorhydrique et de fluorure acide de silicium ( $H_2SiF_6$ ), pouvant représenter jusqu'à 10 g de fluor par  $m^3$  d'air. Du chlore et de l'acide chlorhydrique (HCl) sont rejetés dans l'atmosphère lors de l'incinération de certains déchets plastiques à base de polychlorure de vinyle (PVC), lors d'un dysfonctionnement dans la production de chlore ou lors de la combustion du charbon.

**F. ► Méthane ( $CH_4$ ) ou Composé Organique non Volatile (CONV)** Le méthane, appelé aussi gaz des marais, inodore et peu dense, se trouve naturellement présent sous forme de traces dans l'atmosphère et constitue d'importants gisements liés au phénomène de la fermentation, il provient de la décomposition de matières organiques sous l'action de microorganismes, en absence de dioxygène (milieu anaérobique). Plus de la moitié des émissions de méthane qui augmentent de façon exponentielle, ont une origine anthropique, dont 60 à 70 % d'origine agricole. Le méthane se forme au niveau de marécages, termitières, sols inondés, intestins de ruminants, rizières, décharges d'ordures ménagères, exploitations de gaz naturel et mines de charbon. Il est également produit par le métabolisme digestif des herbivores « vache pétante » et des termites. Le  $CH_4$  provient aussi de la putréfaction au niveau des décharges (biogaz) ainsi que des activités agricoles : rizières, élevage de ruminants [9].

**G. ► Les polluants particuliers « aérosols »** Le terme « aérosol » désigne la suspension dans le milieu gazeux, de particules solides ou liquides, ou les deux, présentant une vitesse de chute négligeable, il correspond à des particules de dimension inférieure à 100  $\mu\text{m}$ , les plus fines ayant des dimensions de quelques angströms. Ainsi, le spectre granulométrique de l'aérosol s'étend sur plusieurs ordres de grandeur, en plus l'aérosol inclut les particules et le gaz [11]. Les aérosols (sulfure de diméthyle, ammoniac, hydrocarbures réactifs, oxysulfure de carbone, dioxyde de soufre, carbone particulaire) bien que peu abondants et à faible temps de résidence dans l'atmosphère (excepté ceux d'origine volcanique), ils peuvent agir de deux façons : -rediffuser le rayonnement solaire, ce qui modifie l'albédo des nuages et contribuer au refroidissement de l'atmosphère ; -favoriser la modification des équilibres microphysiques et chimiques de l'atmosphère. En effet, les polluants particuliers sont classés en fonction de leur granulométrie [11].

-Particules sédimentables.

-Particules semi-fines.

-Particules insédimentables.

**Origine** Les poussières en suspension dans l'atmosphère proviennent essentiellement de l'érosion éolienne des sols : aérosol terrigène (taille supérieur de  $1\mu\text{m}$ ), aérosol crustal (croûte terrestre), des océans (aérosol marin), des volcans (aérosol volcanique), des feux de forêt ou de savane (aérosol de combustion de biomasse), et de la respiration des plantes (aérosol biogénique) [9]. Les sources anthropiques (principalement des particules carbonées et métalliques émises sous forme solide)

Une distinction entre les particules peut être faite en fonction de leur accessibilité aux différents niveaux de l'arbre respiratoire. Il est apparu récemment que les aérosols issus des activités humaines ou d'origine naturelle (éruptions volcaniques, embruns marins ...) contribuaient aussi à l'effet de serre.

**H. ► Le terme Éléments Traces Métalliques « ETM »** désigne les éléments de la classification périodique formant des cations en solution. Ce sont des éléments métalliques naturels, métaux ou dans certains cas métalloïdes (environ 65 éléments), caractérisés par une forte masse volumique supérieure à  $5\text{ g/cm}^3$  [16]. L'organisation mondiale de la santé (O.M.S, 1997) désigne sous le nom de métaux lourds l'ensemble des métaux présentant un caractère toxique pour la santé et l'environnement. Certains sont indispensables au déroulement des

processus biologiques des végétaux et des animaux à des quantités infinitésimales, ils sont alors nommés « Oligo-éléments », nécessaires à la vie en très faible quantité [17-18-19]. Les métaux lourds sont non biodégradables et persistants dans l'environnement pendant de longues périodes, provoquant ainsi des problèmes éco-toxicologiques graves [20]. Les ETM sont dangereux, car ils ont tendance à se bio-accumuler. La bioaccumulation des métaux dépend de la quantité totale, de la biodisponibilité de chacun des métaux dans le milieu et de la voie et les mécanismes de captation, de stockage et d'excrétion [16].

**Origine des métaux lourds** La plupart des métaux sont présents naturellement à l'état de traces dans le fond géochimique (sols, eaux), des quantités plus ou moins importantes sont également émises dans l'air par des sources d'émission naturelle ou liées aux activités humaines. Deux catégories principales de sources atmosphériques de métaux sont distinguées [19-20-21]. La première catégorie représente les sources d'origine naturelle comme : les volcans (ex : As, Ni, Hg, Zn), l'érosion de la croûte terrestre (ex : Si, Al, As, Cr, Fe, Ni, V), les feux de forêt (ex : Zn) et les embruns marins (ex : Hg, Na, Cl). Tandis que la deuxième catégorie concerne les sources d'origine anthropique qui sont majoritairement présentes en régions industrialisées et urbanisées. Ainsi, des éléments tels que : As, Cd, Cu, Pb ou Zn peuvent y être fortement concentrés. Ces sources dues à la combustion des fossiles, le pétrole et charbon dans l'industrie, le chauffage, (ex : As, Cd, Cr, Cu, Ni, Pb, Zn), l'extraction de minerais, (ex : As, Fe, Ni, V...), la métallurgie (industries du fer et de l'acier, (ex : Pb, Cd, Ni) ; des métaux non ferreux, (ex : As, Cd), l'incinération des déchets ménagers (ex : Hg, Pb, Cd...), les engrais et pesticides (ex : Cd, Cu, As, Hg...) le transport : trafic automobile (Cd, Cu, Fe, Ni, Pb et Zn), batteries automobile (Cd, Ni, Pb...), érosion des plaquettes de freins (Cu, Sb), .

Les principaux métaux sont les suivants :

**\*L'arsenic (As) :** provient, d'une part, de traces de ce métal dans les combustibles minéraux solides ainsi que dans le fuel lourd et, d'autre part, dans certaines matières premières utilisées notamment dans des procédés comme la production de verre, de métaux non ferreux ou la métallurgie des ferreux [27].

**\*Le cadmium (Cd) :** sa part est émise par la production de zinc et l'incinération de déchets essentiellement. Ainsi que de procédés industriels (métallurgie.).

**\*Le chrome (Cr) :** provient essentiellement de la production de verre, de ciment, de la métallurgie des ferreux et des fonderies.

**\*Le cuivre (Cu) :** La concentration de cuivre dans l'écorce terrestre est estimée à environ 70 mg/kg [31]. Le transport par le vent des poussières de sol, les éruptions volcaniques, les décompositions végétales, les feux de forêts et les aérosols marins constituent les principales sources naturelles d'exposition [21]. Les principales sources anthropiques sont l'industrie du cuivre et des métaux en général, l'industrie du bois, l'incinération d'ordures ménagères, la combustion de charbon, d'huile et d'essence et la fabrication de fertilisants (phosphate) [19].

**\*Le mercure (Hg) :** le mercure est le seul métal liquide à température ambiante. Il se combine très aisément avec d'autres composés et a une volatilité importante émis en quantité faible, mais toujours trop importante, par la combustion du charbon, du pétrole, la production de chlore, l'incinération de déchets ménagers, hospitaliers et industriels.

**\*Le nickel (Ni) :**Le nickel est, par ordre d'abondance, le 22ème élément dans la croûte terrestre avec une teneur de 20 mg/kg [31]. Il est fréquemment utilisé sous forme de sulfures et d'oxydes. 35 % des émissions sont naturelles, majoritairement par les particules terrigènes, et par le volcanisme, la végétation et les embruns marins [20]. Les principales utilisations anthropiques de Ni se font sous la forme d'alliages lui conférant des nouvelles propriétés, en particulier pour la fabrication d'aciers inoxydables (pour la grande distribution) et réfractaires (pour l'industrie). Il est de l'ordre de la dizaine de pourcentage dans ce type de matériaux. Ces alliages sont utilisés dans beaucoup d'appareils électroménagers et d'équipements médicaux [20].

**\*Le Sélénium (Se) :** provient essentiellement de la production de verre.

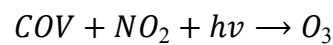
**\*Le Zinc (Zn) :** Le zinc est le 23ème élément par ordre d'abondance dans la croûte terrestre avec une teneur de 70 mg/kg [31]. 25 % de ses émissions sont naturelles (érosion de la croûte terrestre, volcanisme et feux de forêts) [20]. Les apports anthropiques peuvent se diviser en trois groupes d'activités majeures. L'agriculture, l'urbanisation et les sources industrielles et/ou minières [19].

**\*Le plomb (Pb) :** Le plomb est moyennement abondant dans la croûte terrestre où sa concentration moyenne est comprise entre 10 et 20 mg/kg. Dans le minerai, le plomb est souvent associé à l'argent et au zinc. L'antimoine, l'arsenic, le cuivre sont d'autres éléments fréquemment présents dans les minerais de plomb [16]. Les apports naturels de plomb dans l'environnement ne représentent qu'environ 4% des émissions totales et se font essentiellement sous forme inorganique. [20]. Les émissions de cet élément sont notamment liées à des activités anthropiques, l'industrie.

### I.3,2 Les polluants secondaires

Les polluants primaires peuvent se transformer dans la basse atmosphère, sous l'action des rayons solaires et de la chaleur, en polluants dits secondaires tels que l'ozone et autres polluants photochimiques (nitrates de peroxyacétyle, aldéhydes, cétones, etc.). Ces composés constituent le smog photochimique, qui produit des nuages bruns qui stagne parfois au-dessus des grandes villes.

- A. ► **L'ozone (O<sub>3</sub>)** troposphérique formé à partir de la réaction d'oxydes d'azote (NO<sub>x</sub>) et des composés organiques volatils (COV) en présence de chaleur et des rayons ultraviolets.



B. ► **Proxy-acyle-nitrates (PAN)** Ils se forment dans les atmosphères urbaines par réactions photochimiques complexes entre divers polluants : oxydes d'azote, ozone et hydrocarbures imbrulés rejetés dans l'air par chaufferies industrielles ou domestiques ainsi que par les échappements des véhicules à moteur à explosion. Les PAN sont plus fréquents dans les villes à climat méditerranéen et tempéré. Ce sont des composés organiques du groupe des photo-oxydants qui se forment dans les environnements urbains des régions chaudes et ensoleillées.

## I.4 Échèle d'émission de pollution atmosphérique

Les phénomènes de pollution atmosphérique concernent différentes échelles. Local ; régional ; planétaire

Lorsqu'une fraction des polluants retombe dans un faible rayon autour du point d'émission, on dit qu'on a une pollution d'ordre locale. Mais le reste des polluants en se dispersant dans la basse couche de l'atmosphère, provoquant ainsi une contamination atmosphérique à l'échelle régionale. Ces polluants peuvent pénétrer dans les couches plus élevées de l'atmosphère à la faveur de mouvements ascendants, ils sont susceptibles de parcourir des distances allant jusqu'à plusieurs milliers de kilomètres. On parle alors de pollution atmosphérique transfrontière. [15].

### I.4,1 Échelle locale :

La pollution dite de proximité est principalement causée par des sources fixes (panaches industrielles ou résidentielles) ou mobiles (émissions dues au trafic routier). Elle est généralement liée à des phénomènes visibles ou odorants, et les polluants impliqués ont une

courte durée de vie dans l'atmosphère. Dans le cas d'activités intensives, des niveaux de pollution élevés peuvent couvrir toute la ville.

#### **I.4,2 Échelle régionale :**

La pollution urbaine ou industrielle peut se propager sur de longues distances et affecter les environnements urbains et suburbains, voire ruraux. Cela concerne en particulier les polluants dits « secondaires », tels que l'ozone (phénomène de pollution photochimique) ou les poussières sous forme de pluies acides. On constate que ces rayonnements sont à des dizaines voire des centaines de kilomètres du lieu où ils sont émis.

#### **I.4,3 Échelle planétaire :**

A cette échelle, deux principaux phénomènes de pollution ont été mis en évidence, à savoir la destruction de l'ozone stratosphérique ou les « trous » dans la couche d'ozone. En raison de l'augmentation des gaz à effet de serres, le réchauffement ou la destruction de la planète est provoqué. A cette échelle, la localisation des émissions n'a pas d'importance : tous les composés émis vont s'accumuler dans l'atmosphère et persister dans l'atmosphère pendant des décennies voire des centaines d'années, participant ainsi aux impacts planétaires.

### **I.5 Effet de la pollution atmosphérique**

#### **I.5,1 5,1 Sur les végétaux :**

L'impact de la pollution de l'air sur les végétaux résulte essentiellement de trois polluants : oxydes d'azote ( $\text{NO}_x$ ), dioxyde de soufre ( $\text{SO}_2$ ) et l'ozone ( $\text{O}_3$ ). Il se traduit par une réduction de la croissance des plantes sans dommages apparents, et des nécroses visible en cas de fortes concentrations de polluants ou une résistance amoindrie à un certains agents infectieux [22].

La pollution atmosphérique représente des dommages qui peuvent se manifester en plusieurs façons, Ils peuvent apparaître rapidement sur le feuillage, sous la forme de lésions nécrotiques (tissus morts). Ils peuvent également se développer lentement et provoquer un jaunissement ou une chlorose des feuilles. On peut également remarquer un ralentissement du taux de croissance des différentes parties de la plante. Il arrive que les plantes meurent tout de suite, mais la mort se produit habituellement après des attaques répétées [23]. L'effet de la pollution sur la végétation dépend en premier lieu de la concentration du polluant, de la durée d'exposition, ainsi que l'espèce végétal affectée et son stade de croissance [24-25].

La pénétration des polluants s'effectue par deux voies l'une est aérienne et l'autre est racinaire (par le sol). Les particules métalliques par exemple, elles se déposent à la surface des feuilles, et ne pénètrent pratiquement pas à l'intérieur, elles peuvent être facilement lavées, soit de façon naturelle par la pluie, soit artificiellement. Flanagan et ses collaborateurs en 1980, ont prouvé qu'il est impossible d'éliminer tout le plomb et le zinc de la surface de feuilles de rhododendrons exposés en bordure de route à la circulation automobile, qu'on utilise le  $\text{NH}_4\text{-EDTA}$  qui est un chélateur très puissant. Le résultat obtenu par un lavage avec  $\text{NH}_4\text{EDTA}$  est identique à celui qu'ils obtiennent lorsqu'ils effectuent un arrachage d'épiderme. Le plomb associé à la végétation, ainsi que le zinc, sont donc présents en tant qu'enduits inertes et dépôts superficiels [26]. La rugosité, le caractère lipophile des cires épicuticulaires et la présence d'eau sont autant de paramètres permettant de capter les polluants particulaires et gazeux. Une fois que le polluant s'accumule sur la structure lipidique, il va pénétrer dans le tissu foliaire et être métabolisé, stocké ou éliminé dans les mêmes conditions que le polluant intégré dans la voie stomatique. [4]. (Tableau 1).

**Tableau I-1. Impact de la pollution atmosphérique sur la végétation (Griffiths ; 2003 ; ramande ; 2005 et kebiche ; 2006)**

Polluants atmosphériques	Symptômes des polluants sur les végétaux
Anhydride sulfureux ( $\text{SO}_2$ )	<ul style="list-style-type: none"> <li><input type="checkbox"/> Nécroses entre les nervures de la feuille ;</li> <li><input type="checkbox"/> Inhibition de la photosynthèse en raison de</li> <li><input type="checkbox"/> L'augmentation de membranes cellulaires et de la perte d'ions indispensables comme le potassium ;</li> <li><input type="checkbox"/> Substitution du dioxyde de Carbone (<math>\text{CO}_2</math>) par le <math>\text{SO}_2</math> dans la fixation photosynthétique :</li> <li><input type="checkbox"/> Inactivation d'enzymes indispensables ;</li> <li><input type="checkbox"/> Disparition d'espèces sensibles : pin sylvestre ;</li> <li><input type="checkbox"/> Diminution de la productivité forestière ;</li> <li><input type="checkbox"/> Perturbe la floraison de certaines plantes (vigne, blé ...) et diminue leurs rendements :</li> <li><input type="checkbox"/> Jaunissement (d'ocre clair ou presque blanc à rouge orangé ou brun) des feuilles et leurs chutes prématurées</li> </ul>
NOx	<ul style="list-style-type: none"> <li><input type="checkbox"/> Diminution du rendement des plantes (cultivées)</li> </ul>

	<ul style="list-style-type: none"> <li><input type="checkbox"/> Formation de zones nécrotiques irrégulières et décolorées sur les deux faces des feuilles :</li> <li><input type="checkbox"/> Des stries nécrotiques internervales rougeâtres ou une décoloration sombre de la face supérieure des feuilles (graminées).</li> </ul>
Ozone (O <sub>3</sub> ) et les autres photo-oxydant (PAN, éthylène)	<ul style="list-style-type: none"> <li><input type="checkbox"/> Nécroses importantes chez les végétaux se traduisant par l'accélération de la sénescence ;</li> <li><input type="checkbox"/> Réduction de la photosynthèse chez les végétaux chlorophylliens ;</li> <li><input type="checkbox"/> Feuillage devient bronze ou décoloré, en cas de</li> <li><input type="checkbox"/> PAN une teinte argentée vitreuse ou métallique à la face inférieure du limbe foliaire ; Foliaires ; Défoliation totale de la plante.</li> </ul>
Les particules (poussière de ciment, les métaux, la chaux dolomitique en poudre et la suie carbonique)	<ul style="list-style-type: none"> <li><input type="checkbox"/> Nuisance à la respiration normale à la feuille ;</li> <li><input type="checkbox"/> Perturbation des mécanismes de la photosynthèse à l'intérieur de la feuille ;</li> <li><input type="checkbox"/> Chlorose et la mort des tissus foliaires par la combinaison d'une croûte épaisse et de la toxicité alcaline produite par temps humide ;</li> <li><input type="checkbox"/> Les éléments émis se fixent sur les sites chargés extracellulaires (pariétaux et membranaires, généralement des groupes carboxyliques).</li> </ul>
Fluore	<ul style="list-style-type: none"> <li><input type="checkbox"/> Ralentir la croissance de certaines plantes (pin sylvestre, épicéa, prunier, poireau...) ;</li> <li><input type="checkbox"/> Inhiber les fonctions d'assimilation et de reproduction chez les plantes.</li> <li><input type="checkbox"/> Perturber le développement des organes (en agissant sur l'hormone de croissance (l'auxine) ;</li> <li><input type="checkbox"/> Nécroses et la chute des feuilles ou des aiguilles ;</li> <li><input type="checkbox"/> Carence en sels minéraux chez les plantes en bloquant le calcium et le magnésium sous forme de complexes insolubles ;</li> </ul>

### I.5,2 Sur la santé humaine

L'impact de la pollution dépend essentiellement du type et de la concentration des différents polluants, de la durée d'exposition à ces polluants, ainsi que de l'état de santé et de la morphologie des populations exposées [24-25]. Des études épidémiologiques ont prouvé les effets nocifs de la pollution atmosphérique. Ces effets sont divisés en deuxième catégories :



**I. ► Effets à court terme :** Ce sont des manifestations cliniques, fonctionnelles ou biologiques qui se produisent dans un court laps de temps (jours ou semaines).

**II. ► Effets à long terme :** ils peuvent survenir après une exposition à long terme (des mois ou des années) à la pollution atmosphérique, et peuvent entraîner une mortalité élevée et une espérance de vie raccourcie. Selon l'Organisation mondiale de la santé (OMS), la pollution de l'air dans les grandes villes cause chaque année 2 millions de décès dans les pays en développement. En outre, des millions de personnes souffrent de différentes maladies respiratoires.

Le risque n'est pas grand à un niveau individuel (par rapport au tabagisme), la forte proportion de personnes exposé est l'absence de seuil d'innocuité font de la pollution atmosphérique (urbaine)un problème majeur de santé publique ainsi que l'illustrent les évaluations d'impact sanitaire réalisées à ce jour [28]. Des études récentes ont fait apparaître que l'inhalation de particules de petites tailles ( $< 10 \mu\text{m}$ ) permettait d'atteindre les alvéoles pulmonaires et en altérait gravement le fonctionnement [30].

Sur ce point, il a aussi été démontré que les nano particules ( $0,010$  à  $0,056 \mu\text{m}$ ) contiennent plus d'éléments métalliques dus au trafic (Pb, Cd, Cu, Zn, Br et Ni) que les [29].(Tableau .02)

**Tableau I-2. Une vue récapitulative de l'impact de pollution sur la santé humaine (Yamanie; 2005; Rahel; 2009et Rahel; 2005)**

Les polluants	Effets sur la santé	Les risques en chiffres
Oxyde d'azote (NO, NO <sub>2</sub> )	Un gaz irritant qui pénètre dans les plus fine. Ramifications des voies respiratoires, entraînant une hyperréactivité bronchique chez les patients asthmatiques et un accroissement de la sensibilité des bronches. Aux infections chez l'enfant. Irritation des branches chez un publique sensible.	600 à 1 100 décès par cancer du poumon (6 % à 11 % de la mortalité par cancer du poumon). 3 000 à 5 000 décès par maladie cardiorespiratoire (5 % à 7 % de la mortalité de cette nature).
Particules en suspension (PM <sub>10</sub> )	Les plus grosses particules sont retenues par les voies respiratoires supérieures. Elles sont moins nocives pour la santé que les particules plus fines ( $<10 \mu\text{m}$ de diamètre) qui pénètrent plus profondément	Un total de 6 000 à 9 000 Décès (soit 3 % à 5 % de

	dans l'organisme : elles irritent la fonction respiratoire dans l'ensemble. Selon leur nature, elles ont également des propriétés mutagènes et cancérigènes.	la mortalité totale pour la population concernée).
Monoxyde de carbone (CO)	Il se fixe à la place de l'oxygène sur l'hémoglobine du sang conduisant à un manque d'oxygénation du système nerveux, du cœur et des vaisseaux sanguins.	Diminution de l'espérance de vie : 100 000 décès et 725 000 années de vie perdues par an sont attribuables à l'exposition aux particules fines.
Composés organiques volatils (COV) dont Le benzène	Ces molécules ont des effets très divers selon leur famille. Du simple gêne olfactif (odeur), certains provoquent une irritation (aldéhydes), une diminution de la capacité respiratoire. D'autre, comme le benzène, provoquent des effets mutagènes et cancérigènes. Diminution de la fonction respiratoire.	Un total de 6 000 à 9 000 Décès (soit 3 % à 5 % de la mortalité totale pour la population concernée).
Métaux lourds (Pb, Cd, Ni, Hg, As, ...)	<b>Cadmium</b> : Lésions rénales, pulmonaires, <b>Nickel</b> : Cancer du poumon <b>Plomb</b> : neuropathie et encéphalopathie <b>Vanadium</b> : Irritation des yeux, des voies nasales, des bronches. <b>Manganèse</b> : Lésions pulmonaires, problèmes neurologiques. <b>Arsenic</b> : entraîne des problèmes dermatologiques, gastro-intestinaux, neurologiques et hématologiques.	Diminution de l'espérance de vie : 100 000 décès et 725 000 années de vie perdues par an sont attribuables à l'exposition aux particules fines.
Polluant biologique (pollen)	Allergie et asthmes	

### I.5.3 Sur les animaux

L'intoxication par le fluor est réduite par des troubles de gravité croissante chez les ruminants. Les premiers symptômes sont de nature dentaire où les dents deviennent moins

résistantes, des déformations osseuses, des nécroses des reins, des lésions du tube digestif et enfin une cachexie progressive des animaux contaminés [11]. Une étude faite sur des lièvres à proximité d'une autoroute en Prague Brno (ex Tchécoslovaquie) a démontré que les poils de cette espèce contiennent 3fois plus de plomb [26].

---

## **Chapitre II. Généralités sur les plantes**

---

## II.1 Introduction

Les plantes sont des organismes qui occupent une place importante dans le monde vivant, leur métabolisme est vital pour les autres organismes qui bénéficient de l'oxygène. Rejeté par ces organismes autotrophes. Le règne végétal se caractérise par sa structure d'abord de ses cellules puis par la structure de ses tissus

Le terme « plante » regroupe les organismes végétaux composés de tiges feuillues aériennes fixées au sol, principalement des organismes terrestres. Cette définition est désormais cohérente, elle est la plus récente et remonte à la fin du XXe siècle.

Historiquement et traditionnellement, les biologistes ont assimilé les plantes au « règne végétal », qui comprend également les champignons et la plupart des algues, plutôt qu'au « règne animal ». Par exemple, Ernst Haeckel (Ernst Haeckel) a proposé un arbre de classification des espèces d'arbres du trijumeau en 1866 : famille de plantes (regroupant les plantes, la plupart des algues, champignons et lichens), règne animal (animaux) et protistes (protistes).

## II.2 Classification des végétaux

La classification des plantes est basée sur plusieurs critères cytologiques, anatomiques et morphologiques, selon la structure des plantes, le règne végétal est traditionnellement divisé en deux grandes catégories : l'existence du genre hall ou Cormus, on distingue donc thallophytes et Cormophytes.

### II.2,1 Les thallophytes

Ces plantes ont une structure très simple appelée thalle, le thalle est composé de cellules similaires les unes aux autres et sans différenciation physiologique, nous ne pouvons donc pas distinguer les racines, les tiges, les feuilles ou les vaisseaux conducteurs. Ils sont formés de cellules isolées ou de filaments. Selon les espèces, certaines plantes d'algues sont unicellulaires, comme les cyanobactéries (cyanobactéries), et parfois, les bactéries ont des structures multicellulaires complexes, telles que les champignons et les levures. Cette reproduction se fait par des gamètes ou des spores.

## **II.2,2 Les cormophytes**

Ce groupe est composé par les végétaux supérieurs qui correspondent à des organismes toujours pluricellulaires et dont les cellules eucaryotes sont combinées dans les tissus. Les organes formés par ces tissus sont à leur tour beaucoup plus complexe que le thalamus appelé cormus. Les cormophytes se divisent en plusieurs embranchements :

### **II.2,2,1 Embranchement bryophytes (les mousses)**

La plante est composée de différentes « tiges » et « feuilles », mais elle n'a pas de racines et pas de tissu conducteur.

### **II.2,2,2 Embranchement ptéridophytes (les fougères)**

Le système racinaire et l'équipement conducteur apparaissent, mais il n'y a ni fleurs ni graines.

### **II.2,2,3 Embranchement Préspermaphytes (Préphanérogames)**

C'est un groupe intermédiaire entre les ptéridophytes et les spermaphytes.

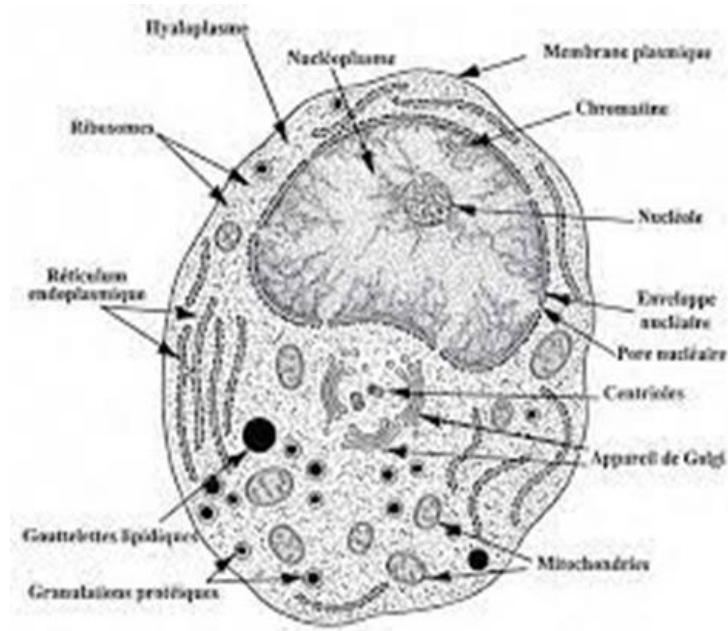
### **II.2,2,4 Embranchement spermaphytes phanérogames**

La plante est composée de graine et l'apparition des fleurs d'où le nom de spermaphytes il a été divisé en trois sous-embranchements :

- Gymnospermes : (Gymnos: nu ; sperma: graine), dans lesquelles les ovules et les graines ne sont pas entourées d'enveloppes closes.
- Chlamydospermes: (Chlamydos: enveloppe; sperma : graine), leurs organes sont entourés d'une enveloppe simple. Ces végétaux sont isolés dans la flore actuelle et considérés comme des intermédiaires entre les gymnospermes et les angiospermes.
- Angiospermes : Regroupe les plantes qui portent des fruits. Ils représentent la plus grande partie des espèces végétales terrestres, Les Angiospermes comprennent les Dicotylédones et les Monocotylédones.

## **II.3 Particularité de la cellule végétale**

Les angiospermes sont des plantes eucaryotes supérieures, leurs cellules sont composées de vrais noyaux, de parois cellulosiques de la peau, de grandes vacuoles, de plastes et des cytotomes.



**Figure II-1. Schéma d'une cellule végétale eucaryote**

### II.3,1 Les membranes cellulaires

Les composants les plus importants de la membrane sont les lipides et les protéines. La membrane est formée d'une double couche de phosphoglycérolipide et de cholestérol. Deux membranes sont particulièrement importantes

- a. **Le plasmalemme** ou membrane plasmique, son épaisseur est de 6 à 9 nm, délimite le cytoplasme de la périphérie de la cellule grâce à une perméabilité très sélective, il joue un double rôle de protection et de contrôle des échanges entre les milieux intracellulaire et extracellulaire. Ce plasmalemme n'isole pas complètement la cellule car il existe des ponts cytoplasmiques ou des canaux qu'on appelle : plasmodesmes.
- b. **Le tonoplaste** qui entoure la vacuole du cytoplasme.

### II.3,2 La paroi cellulaire

L'originalité du règne végétal sur le règne animal est la présence de parois cellulaires en dehors de la membrane plasmique. Grâce aux plasmodesmes, il peut assurer la rigidité de la cellule sans empêcher l'eau et les solutés de la traverser pour atteindre la membrane plasmique. Il constitue le compartiment extra-cytoplasmique appelé apoplaste, qui est composé d'une couche intermédiaire, d'une paroi primaire et d'une paroi secondaire.

La paroi cellulaire est composée à 90 % de glucides et à 10 % de protéines. Les trois groupes de glucides qui composent les parois cellulaires végétales sont : la pectine, l'hémicellulose et la cellulose. Ce sont les composants permanents de la paroi cellulaire

**La lamelle moyenne** : est la couche la plus externe de la paroi cellulaire, elle est essentiellement de la pectine, elle est produite lors de la division cellulaire et forme le ciment qui garantit la connexion entre les cellules.

**La paroi primaire** : elle existe seule dans les cellules juvéniles et indifférenciées formées par un réseau de microfibrilles de cellulose et d'hémicellulose. Elle est souple et extensible, permettant la croissance cellulaire. Elle se dépose entre la lamelle moyenne et la membrane plasmique.

**La paroi secondaire** : se forme lors du processus de différenciation cellulaire. Elle est plus épaisse que la paroi primaire et se dépose entre la paroi primaire et la membrane plasmique. Elle est composée de cellulose et d'hémicellulose et riche en composés phénoliques comme la lignine (la rigidité), la subérine et la cutine (pour l'imperméabilité).

### II.3,3 Les vacuoles

Les cellules végétales différenciées par les vacuoles sont caractérisées par une grande vacuole centrale. Ils occupent généralement plus de 40 % du volume cellulaire total et finissent par pousser tout le contenu cellulaire vers la paroi. Chaque vacuole est entourée d'une membrane de vacuole, qui peut stocker de l'eau, des éléments minéraux, des substances organiques et des pigments (par exemple : les anthocyanes). Les vacuoles jouent également un rôle dans la régulation des fonctions physiologiques (pH, concentration ionique, pression osmotique).

### II.3,4 Les plastes

Ce sont des organites intracellulaires ovales ou sphériques de plusieurs microns de long, séparés par une double membrane dérivée du précurseur. Certains plastes synthétisent de nouvelles molécules, tandis que d'autres les stockent.

#### II.3,4,1 Les chloroplastes

Le chloroplaste est entouré d'une double membrane. L'extérieur est continu, et l'intérieur présente des invaginations dans le stroma. Les chloroplastes contiennent de la chlorophylle, essentielle à la photosynthèse. En coupe longitudinale, on observe d'abord un tissu à grains, dont chacun contient des bacs à grains (ou ballons ou thylakoïdes). Ces particules peuvent être



constituées de 2 à 100 disques, qui sont reliés les uns aux autres par des flocons interstitiels, et l'ensemble des flocons forme un réseau continu. Le stroma contient également des ribosomes et de l'ADN circulaire.

### **II.3,4,2 Les chromoplastes**

Certains plastes contiennent des pigments autres que la chlorophylle, comme le carotène (pigment jaune et orange) ou la lutéine (pigment jaune clair). On les trouve dans les cellules de plusieurs fruits colorés (comme les tomates) ou de fleurs (comme les roses rouges).

### **II.3,4,3 Amyloplastes**

Ce sont des plastes avec peu de membrane interne mais beaucoup de grains d'amidon. Le développement de plusieurs particules va provoquer la rupture de l'enveloppe, et l'ensemble est libéré dans le cytoplasme. Par exemple : pommes de terre

### **II.3,5 Les cytochromes**

« Microbodies », ce sont des organites cellulaires ronds, limités par une membrane simple. L'intérieur contient un certain nombre d'enzymes :

- a. Les lysosomes, contiennent des enzymes lytiques qui coupent de nombreuses macromolécules comme les polysaccharides et les acides nucléiques.
- b. Les glyoxysomes, ce sont des organites cellulaires qui assurent la transformation des lipides de réserve en glucides en collaboration avec la mitochondrie.
- c. Les peroxyssomes, se trouvent dans les cellules photosynthétiques actives. Ils sont le siège des principales étapes de la photorespiration, en particulier le dégagement de CO<sub>2</sub>.

## **II.4 Anatomie des végétaux**

### **II.4,1 Les racines**

La racine est l'organe souterrain d'une plante servant à la fixer au sol et d'absorber l'eau et les sels minéraux indispensables. La racine peut aussi jouer un rôle d'accumulation de réserves.

La racine présente une structure bien définie. Une coupe transversale d'une racine jeune présente une symétrie axiale et nous permet de distinguer deux zones essentielles : l'écorce (composée de rhizoderme et parenchyme cortical) et le cylindre central (composé de l'endoderme, le péricycle, les tissus conducteurs et le parenchyme médullaire) on distingue de l'extérieur vers l'intérieur plusieurs structures :

## a. Poils absorbantes

Ce sont les prolongements des cellules du Rhizoderme. Ils permettent l'absorption de l'eau et des sels minéraux. La présence de ces nombreux Poils permet d'augmenter considérablement la surface d'absorption de la racine. Ils ont un diamètre de 12 à 15 micromètres et de 1 à plusieurs millimètres de long. Il peut y avoir jusqu'à 2 000 poils par cm<sup>2</sup> De surface racinaire.

## b. Ecorce (parenchyme cortical)

C'est un tissu composé de cellules plus grosses et moins bien organisées (présence de méats). Il est le siège de la photosynthèse dont les cellules de la périphérie renferment des chloroplastes mais leur nombre diminue au fur et à mesure qu'on s'enfonce vers l'intérieur. Il peut servir aussi de réserve à la plante. Souvent on trouve au-dessous un parenchyme lignifié, c'est le sclérenchyme. Dans les organes jeunes, on trouve le collenchyme mais parfois, on peut rencontrer des cellules de collenchyme avant le parenchyme cortical.

## c. L'endoderme

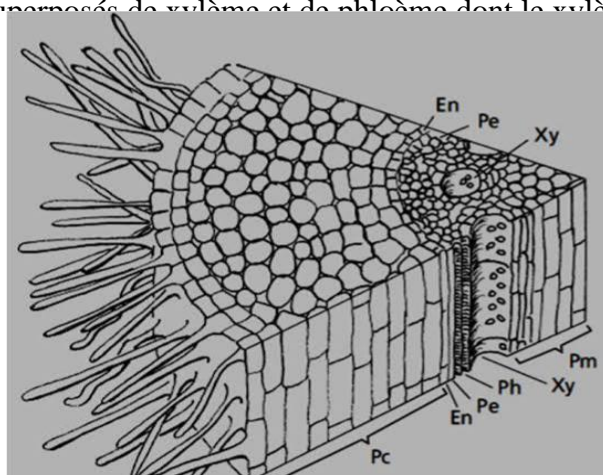
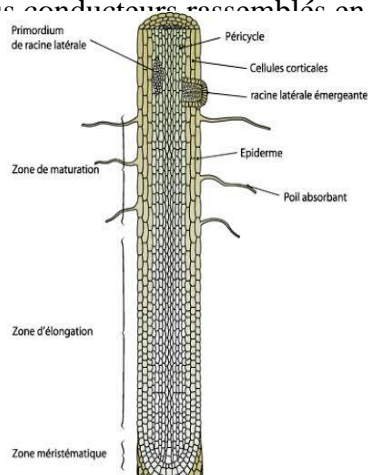
L'endoderme est une couche de cellules qui se trouve entre l'écorce (le cortex) et la stèle (cylindre central), il constitue un anneau uni stratifié (composé d'une seule assise de cellules), joue le rôle de barrière sélective qui règle le passage des substances provenant du sol vers les tissus conducteurs de la stèle. Les cellules sont en forme de parallépipède dont les parois possèdent un épaissement formant Les bandes de Caspary constituées de lignosubérine, imperméable à l'eau.

## d. Le péricycle

Le péricycle formé d'une seule assise de cellules responsable de l'apparition des racines secondaires.

## e. Le cylindre central

Il est situé sous l'écorce et réunit dans un parenchyme médullaire, des faisceaux cribrovasculaires (faisceaux libéro-ligneux) répartis sur un même cycle, présentés sous forme de tiges conductrices rassemblées en arcs superposés de xylème et de phloème dont le xylème



**Figure II-2. Coupe longitudinale dans une racine avec un schéma tridimensionnel d'une racine jeune.**

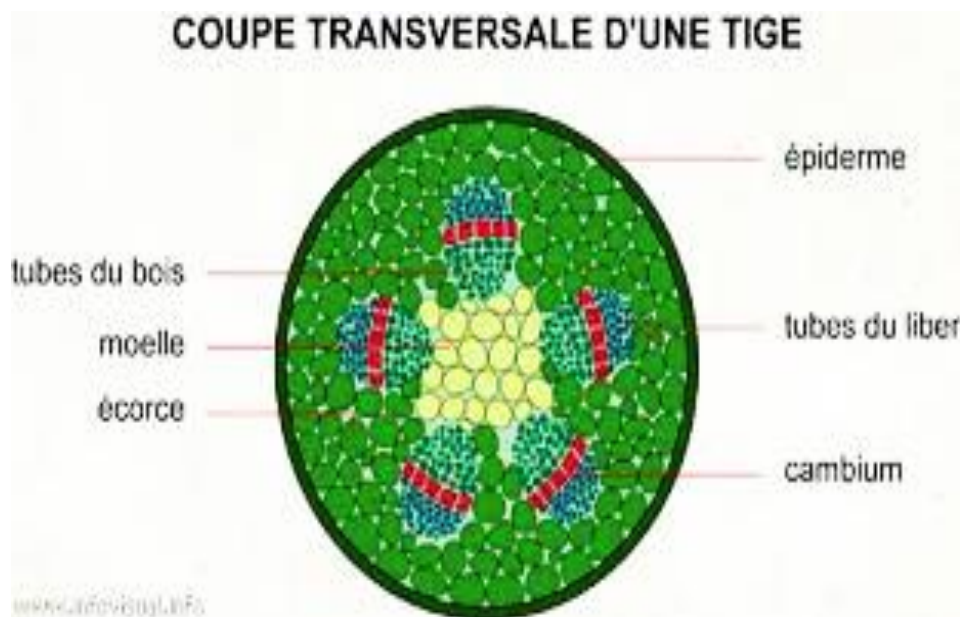
### II.4,2 La tige

La tige est chez les plantes, l'axe généralement aérien, qui prolonge la racine et porte les bourgeons et Les feuilles. La tige se ramifie généralement en branches et rameaux formant l'appareil caulinaire. Chez Les arbres et les plantes ligneuses on distingue le tronc, La tige diffère de la racine par la présence de nœuds où s'insèrent les bourgeons axillaires et les feuilles, Par l'absence de coiffe terminale et par sa structure anatomique. La transition entre racine et tige se fait Dans le « collet ». Il peut exister des tiges souterraines comme il existe des racines aériennes. Par son mode de croissance et de ramification, la tige détermine le port de la plante ; elle assure une Fonction de soutien et une fonction de transport des éléments nutritifs entre les racines et les feuilles.

Ce qui caractérise la tige de point de vue anatomique c'est la disposition du xylème et phloème, ils sont superposés, le xylème est interne (qui tend vers le centre) montre une différenciation centrifuge (le protoxérie) le phloème est externe (qui va vers la périphérie) et on observe un Parenchyme médullaire important ainsi qu'une présence de tissus de soutien. La coupe transversale d'une tige jeune présente plusieurs zones :

- a. **L'épiderme**, constitué d'une couche de cellules juxtaposées. Leur paroi est peu épaisse et elles ne Contiennent pas de chloroplaste.
- b. **Le parenchyme cortical**, composé de grandes cellules polyédriques. Les cellules de la périphérie Renferment des chloroplastes, mais leur nombre diminue au fur et à mesure qu'on s'enfonce vers L'intérieur.
- c. **Les tissus conducteurs**, rassemblés en amas superposés de xylème et de phloème. Le xylème, vers le Centre de la tige, est coiffé, vers l'extérieur, par le phloème. Ce sont les

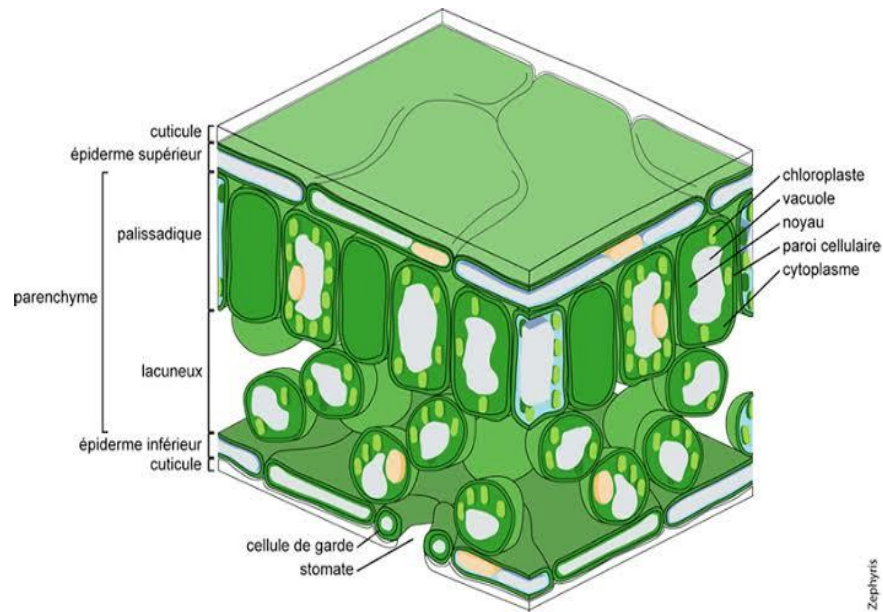
faisceaux criblovasculaires (parfois encore appelés faisceaux libéroligneux). Les diamètres des cellules de xylème ne sont pas Identiques, ils diminuent au fur et à mesure que l'on se rapproche du centre (le protoxylème à petit Diamètre près du centre et le métaxylème à grand diamètre près de la périphérie). Le phloème lui non Plus n'est pas homogène, même si les différences entre les cellules sont moins marquées. Il est possible de distinguer du protophloème et du métaphloème. La différenciation du xylème est centrifuge dans la tige. On observe une moelle remplie par parenchyme formé de cellules très large.



**Figure II-3. Coupe transversale d'une tige**

### II.4.3 La feuille

Les feuilles sont le centre de la photosynthèse. Les vaisseaux conducteurs de xylème (dans les Nervures de la feuille) apportent l'eau et les sels minéraux nécessaires à la photosynthèse. Les Stomates permettent l'entrée des gaz et donc l'apport du CO<sub>2</sub>. La photosynthèse permet la synthèse De matières organiques qui seront redistribuées aux autres organes par le phloème. La feuille est un appendice latéral de la tige sur laquelle elle s'insère au niveau d'un nœud. Elle se Met en place grâce au fonctionnement du méristème caulinaire situé à l'apex d'un bourgeon et se Compose le plus souvent d'un pétiole et d'un limbe. Sa forme aplatie lui permet de capter un maximum de lumière ce qui permet la photosynthèse dans les cellules du parenchyme.



**Figure II-4. Structure de la feuille**

Comme la stipule la figure II-4, la feuille est composée de :

- a. **L'épiderme supérieur** constitue toute la face supérieure (ventrale) du limbe. Il est formé de cellules serrées les unes contre les autres et recouvertes d'une cuticule qui protège la feuille.
- b. **Le parenchyme palissadique** est logé sous l'épiderme supérieur. Il se compose de cellules Remplies de chloroplastes. Le parenchyme lacuneux, constitué d'une couche de cellules moins régulières, peu jointives et Laissant entre elles d'importantes lacunes. Ces cellules sont plus pauvres en chloroplastes, surtout vers le centre de la feuille.
- c. **Les faisceaux criblovasculaires**, ce sont les tissus conducteurs superposés, les faisceaux Criblovasculaires, sont identiques à ceux observés dans la tige. Ils sont en réalité, la suite de ceux de La tige et du pétiole et correspondent aux nervures du limbe. Des formations secondaires Apparaîtront rapidement.
- d. **L'épiderme inférieur** est aussi formé de cellules serrées les unes contre les autres et recouvertes D'une couche cireuse. Il est perforé de cellules stomatiques qui permettent à l'air de passer dans la Feuille ou d'en sortir. L'ostiole est l'ouverture au centre du stomate.



---

# **Chapitre III. Répercussion positive de la pollution atmosphérique sur les plantes**

---

### III.1 Introduction

Les végétaux sont en première ligne face aux pollutions atmosphériques car ils vivent dans l'immobilité totale et constituent la base du fonctionnement des écosystèmes terrestres et aquatiques. La nature et l'importance de l'impact des polluants atmosphériques sur les végétaux va dépendre des caractéristiques physiologiques et biochimiques du végétal touché, et des propriétés du ou des polluants rencontrés. Les perturbations physiologiques des plantes sont variées et sont observables, selon la nature du polluant, sur des zones plus ou moins étendues qui vont de l'échelle locale jusqu'à l'ensemble de la planète. Ces réponses vont immédiatement se répercuter sur le fonctionnement des écosystèmes et en particulier sur les relations plantes-insectes. Elles peuvent aussi avoir des effets sur la santé humaine, les végétaux étant à l'origine de nombreuses chaînes alimentaires.

### III.2 Réponses physiologiques des plantes

Si les plantes, de par leur vie fixée et leur large répartition, sont parmi les premières victimes de la pollution atmosphérique, elles peuvent également constituer une source de pollution secondaire. Lors de fortes chaleurs, elles émettent des composés organiques volatiles (COV) comme les terpènes [32], un des gaz précurseurs de l'ozone (Figure III-1).

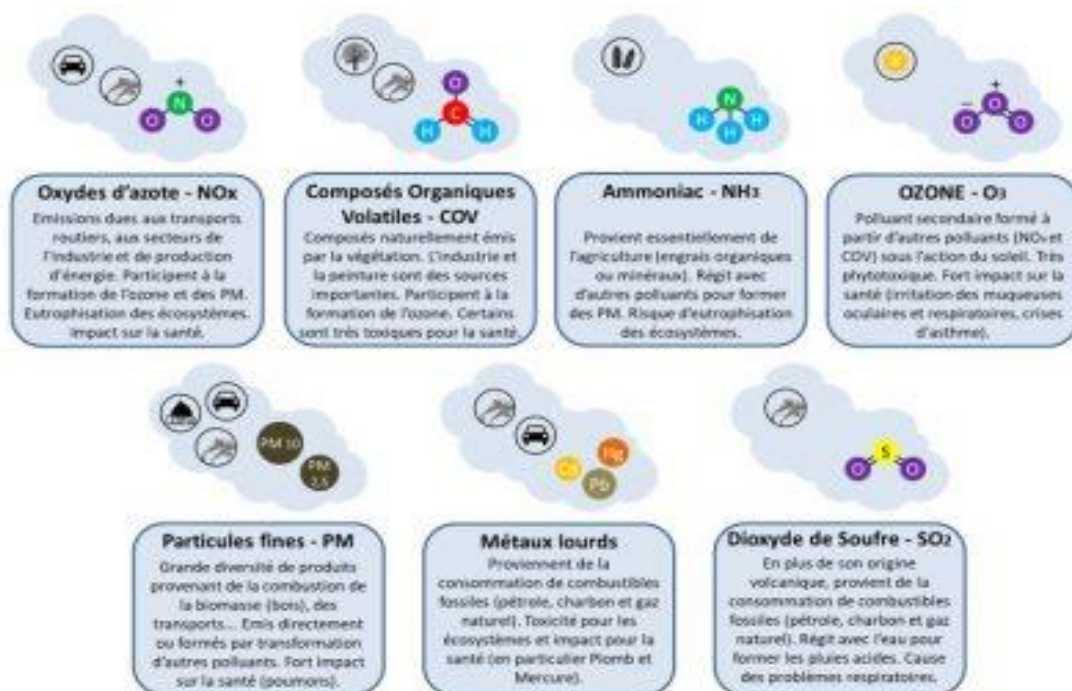


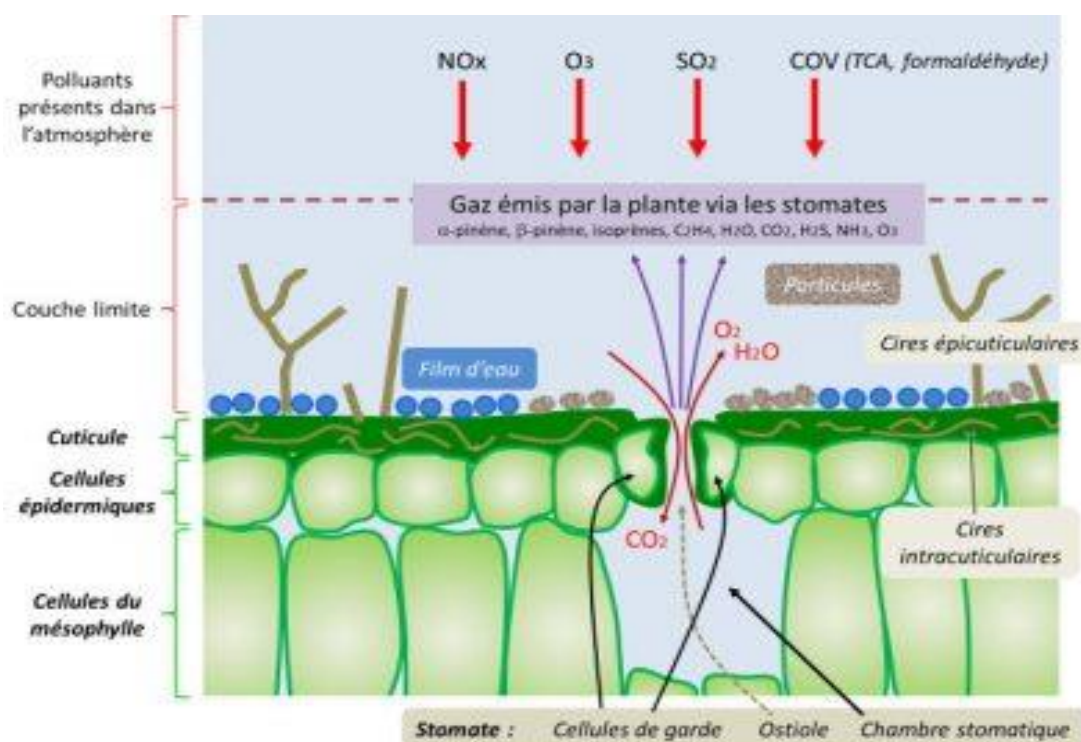
Figure III-1. Quelques polluants atmosphériques.



Dans les villes des régions chaudes des USA, il est recommandé de ne pas planter certains arbres (pins, chênes, etc.) pour ne pas augmenter les niveaux d'ozone. Les plantes émettent également des particules fines (pollens, spores, composés cireux, divers particules) qui, si elles n'ont pas d'effet sur les végétaux, peuvent avoir des effets sur la santé humaine (allergies).

### III.2,1 Pénétration

La pénétration des polluants dans les plantes se fait essentiellement par l'intermédiaire des feuilles (Figure III-2).



**Figure III-2. Représentation schématique de l'environnement des surfaces foliaires**

Il peut aussi exister une légère pénétration par les tiges et le tronc. Avant d'arriver dans la feuille, le polluant va d'abord devoir traverser la 'couche limite' qui correspond à la couche d'air non agitée au contact de celle-ci (Figure III-2). Les stomates, situés essentiellement à la surface des feuilles, sont le site privilégié des échanges gazeux de la plante avec l'atmosphère. Parmi les composés organiques volatiles émis par la plante, on trouve de nombreux terpènes -  $\alpha$ -pinène,  $\beta$ -pinène, isoprènes- responsables de pollution atmosphérique estivale, en particulier dans les zones de forêts et les vallées de montagne. La taille des cellules est de l'ordre de 10 à 100  $\mu\text{m}$ . La pénétration des polluants dans les plantes se fait essentiellement par l'intermédiaire des feuilles. Il peut aussi exister une légère pénétration par les tiges et le tronc. Avant d'arriver

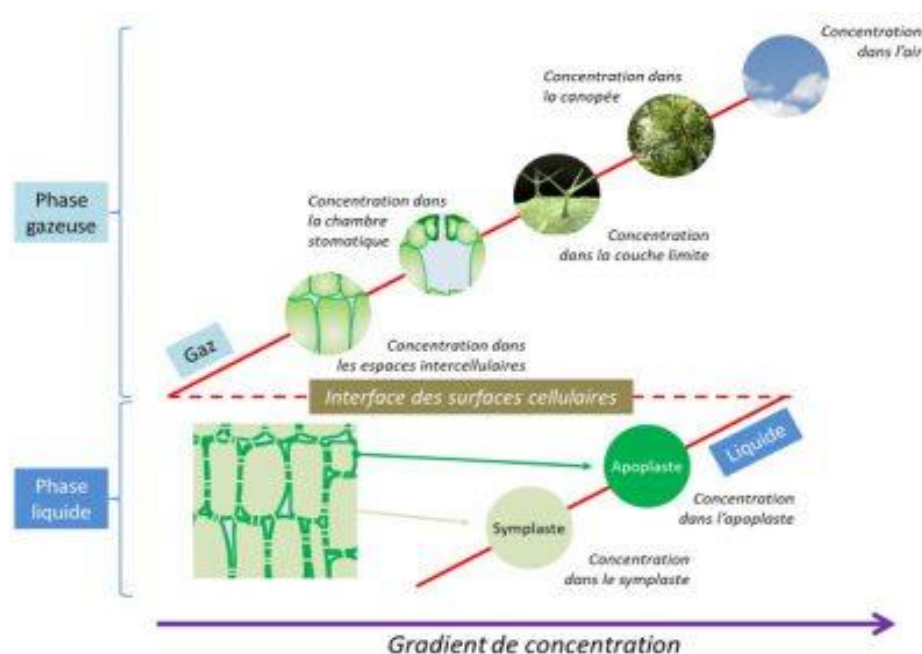
dans la feuille, le polluant va d'abord devoir traverser la 'couche limite' qui correspond à la couche d'air non agitée au contact de celle-ci.

L'épaisseur de cette couche est fonction de la taille et de la forme de la feuille, de la présence de poils foliaires (ou trichomes) et de la vitesse du vent. Son épaisseur est de l'ordre de quelques dixièmes de millimètres [33].

Lors de sa présence temporaire dans cette couche limite, de nombreuses réactions sont susceptibles de se produire car le polluant incident va réagir avec [34].

- Une phase aqueuse constituée du film d'eau présent en surface de la feuille ainsi que de l'eau liée aux groupes polaires de la cuticule ;
- Une phase lipidique constituée des cires présentes au sein (cires intracuticulaires) ou situées en surface (cires épicuticulaires) de la cuticule ;
- Une phase gazeuse constituée des composants de l'atmosphère et des émissions de la feuille.

Selon la nature des réactions qui auront lieu ou non au niveau de la couche limite, la concentration du polluant qui va pénétrer dans la plante peut varier énormément. Certains produits de ces réactions sont même plus phytotoxiques que le polluant lui-même [35].



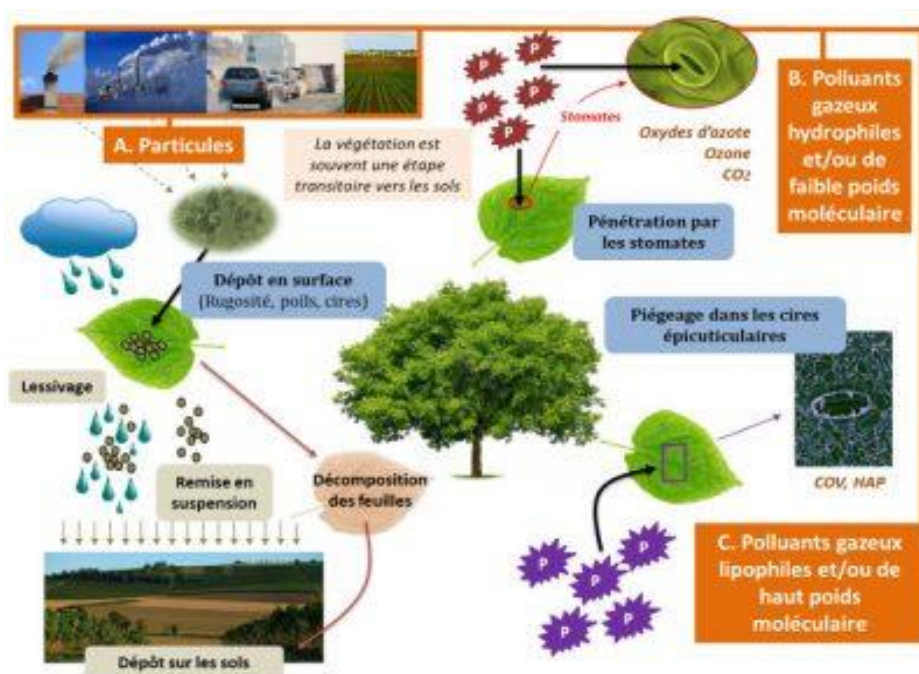
**Figure III-3. Représentation schématique de l'évolution décroissante de la concentration d'un polluant depuis l'atmosphère jusqu'à l'intérieur de la feuille**

Les polluants gazeux pénètrent dans la plante comme les autres gaz atmosphériques ( $\text{CO}_2$ , Oxygène, etc.), principalement par l'intermédiaire des stomates présents sur les surfaces

foliaires. Par contre, une large partie des polluants organiques va surtout être absorbée par la structure lipidique que constitue la cuticule (Figure III-2). Seule une faible partie va pénétrer dans la feuille, puis diffuser et réagir entre et dans les différents compartiments internes que constituent l'apoplaste et le symplaste (Figures III-3 & III-4).

Les polluants particulaires (organiques ou inorganiques) sont d'abord captés par les surfaces foliaires (grâce au micro-relief créé par la présence des cires épicuticulaires, des trichomes, etc.), dans une gamme de tailles qui est généralement comprise entre 1 et 10  $\mu\text{m}$ . En forêt, ce dépôt particulaire peut osciller entre 280 et 1000 kg par hectare. Par la suite, les conditions météorologiques comme le vent, le soleil et surtout la pluie (lessivage des feuilles, dissolution des particules inorganiques) influencent les caractéristiques de ce dépôt (Figure III-4). Grâce à l'efficacité de la barrière cuticulaire, le dépôt foliaire organique ou inorganique n'est souvent à l'origine que d'une légère pénétration de polluants dans les feuilles et il a donc de faibles impacts physiologiques.

Après pénétration, la réponse physiologique des plantes à la pollution atmosphérique va dépendre des deux acteurs en jeu : d'une part les caractéristiques de la plante et d'autre part la nature de la pollution.



**Figure III-4. Représentation schématique du comportement des divers polluants vis-à-vis des végétaux**

Les polluants particulaires (organiques ou inorganiques) sont d'abord captés par les surfaces foliaires (grâce au micro-relief créé par la présence des cires épicuticulaires, des trichomes,

etc.), dans une gamme de tailles qui est généralement comprise entre 1 et 10  $\mu\text{m}$ . En forêt, ce dépôt particulaire peut osciller entre 280 et 1000 kg par hectare. Par la suite, les conditions météorologiques comme le vent, le soleil et surtout la pluie (lessivage des feuilles, dissolution des particules inorganiques) influencent les caractéristiques de ce dépôt (Figure III-4). Grâce à l'efficacité de la barrière cuticulaire, le dépôt foliaire organique ou inorganique n'est souvent à l'origine que d'une légère pénétration de polluants dans les feuilles et il a donc de faibles impacts physiologiques.

Après pénétration, la réponse physiologique des plantes à la pollution atmosphérique va dépendre des deux acteurs en jeu : d'une part les caractéristiques de la plante et d'autre part la nature de la pollution.

### III.2,2 La réponse dépend de la plante

La plante réagit à la pollution atmosphérique en produisant des dérivés réactifs de l'oxygène. Après pénétration dans les feuilles, et comme pour la majorité des stress biotiques et abiotiques, les polluants vont tout d'abord entraîner chez la plante un stress oxydatif avec production de radicaux libres (radicaux hydroxyles) et de dérivés réactifs de l'oxygène (DRO) susceptibles de provoquer des dégâts à différents niveaux (Figure III-5) [36]. En particulier ces DRO vont avoir trois cibles principales au niveau des cellules : les lipides (au niveau des membranes), les protéines (au niveau des acides aminés) et les acides nucléiques (formation d'adduits).



Figure III-5. La production de dérivés réactifs de l'oxygène.

Parallèlement le polluant va entraîner un stress spécifique lié à ses caractéristiques physico-chimiques propres [37] :

- Ainsi, dans le cas d'une pollution par l'acide fluorhydrique (HF), on observera une perturbation du métabolisme cellulaire du calcium (précipitation du calcium sous forme de  $\text{CaF}_2$ ).
- Dans le cas d'une pollution aux oxydes de soufre, les propriétés réductrices de ce gaz vont perturber le fonctionnement de l'appareil photosynthétique (dégradation de la chlorophylle)
- De leur côté, les pluies acides sont à l'origine de carences minérales entraînant le jaunissement des feuilles suite au pluvio-lessivage des éléments minéraux Ca, K et Mg.

Face à ces stress, la stratégie classique de défense de la plante vise à limiter l'absorption du polluant et augmenter sa tolérance à celui-ci. Elle consiste à mettre en œuvre [38] :

- Des processus physiques : fermeture des stomates, chute de feuilles... ;
- Des processus chimiques et biochimiques.

Ces facteurs chimiques et biochimiques correspondent à :

- La fabrication de précipités insolubles (formation de  $\text{CaF}_2$  dans le cas d'une pollution par le fluor) ;
- La détoxification par l'émission de forme réduite du polluant ( $\text{H}_2\text{S}$  dans le cas d'une pollution par  $\text{SO}_2$ ,  $\text{NH}_3$  dans le cas d'une pollution par les  $\text{NO}_x$ ) ;
- Des dégradations enzymatiques par les cytochromes P450 et par un certain nombre d'enzymes antioxydantes. Des composés antioxydants non enzymatiques comme le glutathion, les vitamines E et C et les caroténoïdes peuvent aussi intervenir.

Lors de l'installation d'un 'stress pollution', la plante va donc mettre en place (plus ou moins rapidement) des processus qui viendront s'ajouter au pool de processus de défense déjà présent dans la plante. Suite à l'agression, la résistance de la plante au polluant résultera de la combinaison de ces divers processus. C'est pour cette raison qu'il existe une échelle spécifique de sensibilité des plantes pour chaque polluant et pour chaque plante.

Dégâts visibles et invisibles. Lors de faibles pollutions et/ou lorsque les systèmes de défense de la plante sont suffisants pour limiter l'impact physiologique d'un polluant, cette résistance a tout de même un coût physiologique, qui se caractérise par des diminutions de taille, des baisses de rendement... On parle alors de « dégâts invisibles ».

Lors de fortes pollutions et/ou lorsque les systèmes de défense de la plante ne sont pas suffisants, des dommages irréversibles apparaissent comme des morts cellulaires (les nécroses foliaires entre autres). On parle alors de « dégâts visibles » liés à la pollution atmosphérique

La plante réagit en fonction des conditions environnementales. La plante, comme tous les systèmes biologiques, est sensible en même temps aux facteurs abiotiques (température, humidité, lumière...) et aux facteurs biotiques (âge, maladies, géotypes...) de son environnement. Si les maladies ont un impact négatif, d'autres facteurs peuvent avoir des répercussions positives sur la réponse de la plante à la pollution atmosphérique. Ainsi, la sécheresse conduit à la fermeture des stomates, ce qui protège la plante, tandis que l'augmentation du CO<sub>2</sub> favorise la photosynthèse. L'évolution journalière de la pollution atmosphérique va aussi se répercuter sur la réponse des plantes. C'est ce que montrent les observations de terrains :

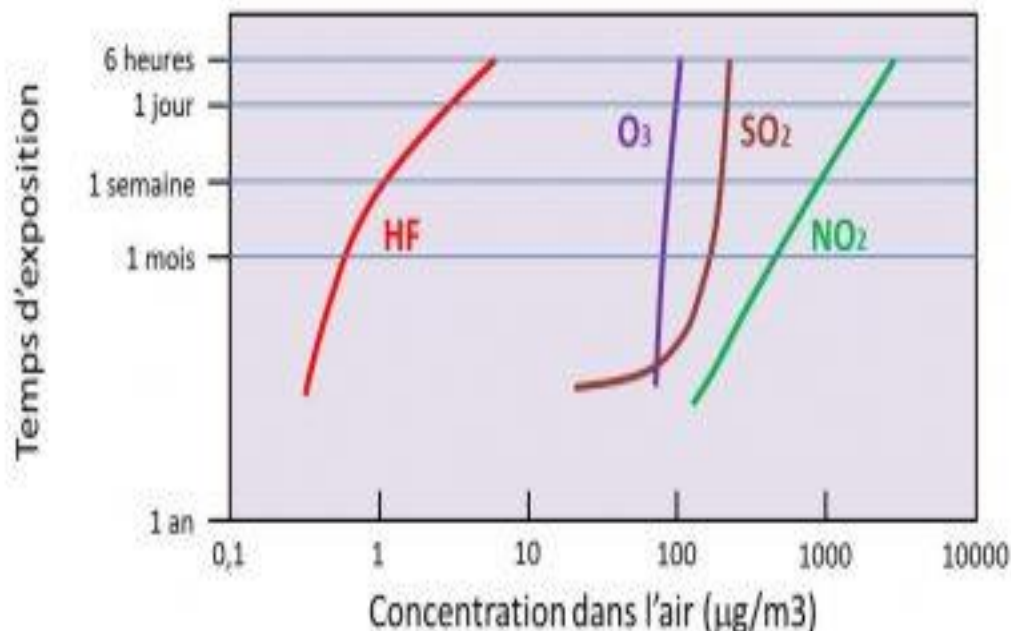
Durant les périodes de canicule, les fortes chaleurs entraînent de très fortes concentrations en ozone dans l'air mais parallèlement une fermeture des stomates. Le résultat est alors un très faible impact de ce polluant sur la végétation durant ces périodes. C'est ce qui a été constaté au niveau des forêts durant la canicule de 2003 [8].

Durant les périodes estivales, les concentrations d'ozone dans l'air autour des forêts d'altitude sont fortes avec de faibles variations jour-nuit. Comme parallèlement la forte humidité de l'air dans ces zones entraîne une large ouverture des stomates, on observe alors un fort impact de l'ozone présent.

Par contre, au niveau des forêts de plaine, la pollution de l'air se caractérise par des concentrations moyennes d'ozone avec cette fois de fortes variations jour-nuit. Comme parallèlement dans ces zones l'humidité de l'air est plus faible, l'ouverture des stomates sera moins importante : pour ces deux raisons, on observe un plus faible impact de l'ozone

### III.2,3 La réponse dépend du polluant

Selon leur nature chimique, les polluants sont plus ou moins phytotoxiques. Des expériences en laboratoire ont permis de classer les principaux polluants atmosphériques (à concentrations égales dans l'air) dans l'ordre suivant de phytotoxicité décroissante (Figure III-6)



**Figure III-6. Apparition de nécroses foliaires sur la végétation en fonction de différents polluants atmosphériques. Concentrations seuils moyennes en fonction du temps d'exposition**

Le classement, Acide FluorHydrique (HF) > Ozone (O<sub>3</sub>) > Dioxyde de Soufre (SO<sub>2</sub>) > Dioxyde d'Azote (NO<sub>2</sub>), est seulement donné à titre indicatif car il existe toute une gamme de sensibilité des différentes plantes pour chaque polluant [39]. Par exemple le tabac est très sensible à l'ozone mais peu touché par la pollution par le fluor.

En plus de la phytotoxicité du polluant, la réponse des plantes va dépendre de la dose reçue (concentration x temps). La dose est souvent calculée à partir des concentrations en polluant présentes dans l'atmosphère. C'est le calcul des flux de polluants qui ont réellement pénétré dans les organes foliaires [40] qui donne les meilleures informations sur les relations pollution-dégâts dans la végétation.

Enfin, à doses égales, l'impact du polluant est d'autant plus important que le temps d'application est court. On explique généralement cet « effet pic » par le fait que, sur de courtes périodes, la plante n'a pas le temps de mettre en route ses systèmes de défense.

### III.3 Symptomatologie

La symptomatologie consiste à étudier les signes ou les manifestations (symptômes) exprimés par les plantes en réponse aux perturbations physiologiques induites par les polluants atmosphériques.

Cette symptomatologie est importante car elle peut être utilisée comme méthode de bio-surveillance végétale de la qualité de l'air [41]. Cette méthode originale permet de détecter et d'estimer les niveaux de polluants atmosphériques uniquement à partir de l'étude des perturbations visibles (par observation des nécroses) ou invisibles (par des analyses biochimiques) qu'ils entraînent sur les végétaux.

Les polluants présents autour des plantes étant très nombreux, il est intéressant de les classer, pour les observations en symptomatologie, selon l'étendue de leur zone d'impact : locale, régionale ou globale

### III.4 La résistance chez les plantes

Au cours de leur évolution, toutes les plantes ont élaboré un véritable « système immunitaire » capable de déceler un danger, que ce dernier soit de nature biotique (microorganisme pathogène, insecte ravageur) ou abiotique (pluie, grêle, gel, vent). En l'absence des lymphocytes et anticorps que l'on retrouve dans le système immunitaire humain, le « système phytoimmunitaire » se distingue par la variété des molécules de défense qu'il produit en réponse à un stress. Cette stratégie défensive, activée par l'agression, conduit à des modifications considérables de l'activité métabolique des cellules végétales, se traduisant par une cascade d'événements destinés à restreindre la progression des agents infectieux et à réduire les dommages causés par des blessures.

On retrouve chez les plantes deux types de résistance : la résistance passive, impliquant des barrières préformées ou constitutives dont la plante s'est dotée à la suite d'une adaptation climatique, et la résistance active, impliquant des barrières nouvellement formées en réponse au stress [42].



### III.4,1 La résistance passive

Chaque plante possède, de façon naturelle, une variété de moyens de défense constitutifs. Ces mécanismes varient d'une plante à l'autre, car ils sont très souvent le résultat d'une adaptation temporelle à des conditions climatiques ou environnementales particulières. Ainsi, les feuilles des plantes poussant dans des zones tropicales auront tendance à être recouvertes d'une cuticule plus épaisse que celles poussant sous des climats pluvieux. De la même façon, les plantes aromatiques qui poussent à l'état sauvage dans les pays méditerranéens ont une concentration plus élevée en métabolites secondaires (huiles essentielles) en raison de leur adaptation à une certaine sécheresse du sol sur une longue période. La résistance passive, responsable de la protection des plantes à la plupart des agents pathogènes et des prédateurs auxquels elles sont confrontées en permanence, existe donc chez toutes les plantes, mais à des degrés divers. Elle se divise en deux grandes catégories : 1) les barrières structurales constitutives et 2) les substances chimiques préformées.

Les barrières structurales constitutives représentent le premier obstacle qu'un agent pathogène rencontre avant son contact avec les parois des cellules épidermiques de la plante où s'effectuera le premier niveau de reconnaissance responsable du devenir de l'interaction. Les virus et les bactéries pénètrent ces barrières de façon purement passive en profitant de microblessures causées, par exemple, par les piqûres d'insectes, la pluie, le gel ou les oiseaux. Les champignons pathogènes peuvent aussi traverser ces barrières de façon passive, mais ils ont également acquis au cours de leur évolution la capacité de produire des enzymes susceptibles d'hydrolyser certains composés structuraux de ces barrières. Parmi toutes les barrières constitutives présentes chez les plantes, la cuticule est probablement la structure de protection la plus efficace. Composée de cutine, un polymère insoluble intimement imbriqué dans un réseau de cires [43], la cuticule est hydrophobe. La plupart des champignons pathogènes ont acquis la capacité de traverser cet obstacle au moyen d'enzymes spécifiques que l'on nomme cutinases [44]. Les autres barrières structurales susceptibles de contrer la progression d'un agent pathogène sont représentées par les poils, les trichomes, les épines et les aiguillons.

Les barrières chimiques constitutives sont fabriquées continuellement, même en l'absence d'agents pathogènes. Au sein de ces molécules, appelées phytoanticipines, sont regroupés les composés phénoliques, les alcaloïdes, les lactones, les saponines, les glycosides cyanogéniques et les huiles. Les composés phénoliques regroupent une large gamme de substances possédant un noyau aromatique comportant des résidus hydroxyles (OH-) ainsi que leurs dérivés

fonctionnels [45]. Il y a quatre principales familles de composés phénoliques : les acides phénoliques simples, comme le catéchol et l'acide protocatéchuïque, les flavones, l'acide chlorogénique et les quinones [46]. Les composés phénoliques sont bien connus pour leur potentiel antifongique et antibactérien. En règle générale, les composés phénoliques peuvent avoir un effet délétère sur :

- La germination des spores ;
- La croissance mycélienne ;
- La production d'enzymes hydrolytiques comme les pectinases ;
- La synthèse et l'activité biologique des toxines fongiques (par une détoxification).

Lorsque cette résistance dite passive (parce qu'elle est constitutive) est insuffisante pour contrer une attaque par des agents biotiques ou abiotiques particulièrement agressifs, une résistance active se met alors en place ayant pour objectif la destruction de l'agresseur ou, à tout le moins, son confinement au site de pénétration potentielle. La résistance induite, dite active parce qu'elle est induite en réponse à un stress, est un phénomène très bien synchronisé au plan spatiotemporel. Elle est la résultante de toute une cascade d'évènements cytomoléculaires impliquant une large gamme de molécules produites de façon coordonnée, selon divers sentiers métaboliques.

#### **III.4,2 La résistance active**

Lorsqu'un agent pathogène réussit à contourner la première ligne de défense passive (ex. : la cuticule), un nouveau système de résistance se met en place au moment où il est détecté par la plante ayant pour unique objectif le confinement de l'agresseur dans les cellules attaquées ; la plante est prête, dans certains cas, à sacrifier ces cellules pour assurer sa survie. Cette confrontation plante-agent pathogène est responsable de l'activation de plusieurs voies métaboliques pour [47] :

- 1) Renforcer les barrières externes, comme la paroi, afin de retarder ou même d'empêcher la pénétration de l'agent pathogène ;
- 2) Favoriser la création d'un environnement toxique au cas où le parasite parviendrait à franchir les barrières structurales nouvellement formées. Bien que les modalités de la résistance soient variables (résistance généralisée ou spécifique), on assiste dans tous les cas à un scénario relativement identique au cours duquel les cellules végétales, ayant perçu une alarme, réagissent en émettant à leur tour des signaux d'alerte (Figure III-1).

Ces cellules « alertées » s'activent pour élaborer une stratégie défensive qui sera coûteuse sur le plan énergétique.

La résistance spécifique est une résistance dite génétique selon la théorie « gène pour gène » découverte par Flor (1971) [48]. Pour que la plante soit résistante à un agent pathogène spécifique, les deux protagonistes doivent posséder des gènes complémentaires : un gène de résistance R pour la plante et un gène d'avirulence Avr pour l'agent pathogène. L'interaction entre les produits (ou leurs dérivés) de ces deux gènes (R et Avr) conduit à une résistance spécifique se traduisant par une réaction hypersensible (RH) caractérisée par une lésion nécrotique des cellules végétales aux sites agressés (Figure III-1). L'absence ou l'altération de l'un ou l'autre des gènes conduit inévitablement à la manifestation des symptômes de la maladie.

La résistance généralisée ou non spécifique, quant à elle, peut s'exercer au niveau local (résistance locale acquise, ou RLA), c'est-à-dire au site de l'agression, ou au contraire se propager à distance des cellules attaquées. On parle alors de résistance systémique acquise (RSA), un phénomène de résistance générale induite qui protège efficacement la plante contre son agresseur initial et la rend également plus performante envers d'autres attaques potentielles.

### **III.4,3 La résistance non spécifique**

Toutes les plantes, même si elles ne possèdent pas de gène R de résistance, ont la capacité de se défendre contre un agresseur. En revanche, la rapidité avec laquelle s'exprime la réponse de la plante est, sans nul doute, le critère le plus crucial dans l'issue d'une interaction plante-agent pathogène puisqu'il déterminera l'établissement de la résistance ou l'expression de la maladie. Cependant, dans tous les cas, la résistance d'une plante ne peut se manifester qu'à la suite d'une infection préalable par un agent pathogène ou d'un traitement avec un produit capable de mimer une situation de stress. On parle alors de résistance généralisée ou de résistance non spécifique, car les stratégies la plante ne sont pas seulement ciblées contre l'agresseur ayant déclenché la machinerie, mais plutôt contre tout agresseur éventuel. Ainsi, la réponse de la plante s'inscrit dans une dualité d'action où la priorité est, dans un premier temps, de limiter la progression de l'agent pathogène envahisseur, voire de le détruire (RLA), et, dans un deuxième temps, d'alerter les cellules voisines afin qu'elles préparent activement leur propre défense (RSA). Il existe un troisième type de résistance non spécifique exclusivement induite par des rhizobactéries bénéfiques : la résistance systémique induite (RSI) (Tableau 1).

La résistance systémique acquise (RSA). Dans les années 1930, Chester mentionnait déjà la possibilité qu'une « immunité physiologique acquise » puisse exister chez les plantes [49]. Il faudra cependant attendre les années 1960 pour que Ross reprenne ce concept, l'explique et introduise les termes de « résistance locale acquise » et de « résistance systémique acquise ».

L'expression de la RSA implique nécessairement la diffusion du message de stress en direction des tissus sains. Plusieurs molécules, appelées des messagers secondaires, ont été identifiées sans pour autant connaître avec précision leur rôle exact. Par exemple, l'acide salicylique, un composé phénolique de faible poids moléculaire, a longtemps été considéré comme le candidat idéal pour assurer cette signalisation (Gaffney, 1993). Les raisons ayant conduit à croire en l'implication majeure de l'acide salicylique dans le processus de diffusion du signal résultent de plusieurs observations. Ainsi, des dosages de l'acide salicylique ont montré que sa concentration augmentait considérablement (x 100) chez plusieurs plantes à la suite d'une attaque par un agent pathogène [50].

Par ailleurs, plusieurs chercheurs ont montré qu'un traitement exogène d'acide salicylique était capable d'induire la RSA, même en l'absence d'infection). Il a également été rapporté que des plants de tabac et d'*Arabidopsis thaliana* (L.) transgéniques (plants dits « nahG » car ils expriment la salicylate hydroxylase bactérienne NahG, une enzyme qui catalyse la conversion de l'acide salicylique en catéchol) n'étaient plus capables de synthétiser et d'accumuler l'acide salicylique. En l'absence d'acide salicylique, ces plants n'exprimaient plus la RSA envers différents agents pathogènes (viraux, fongiques et bactériens). Enfin, la mobilité de l'acide salicylique dans la plante a été démontrée par des expériences de marquage qui ont révélé que cette petite molécule, produite lors des interactions tabac-virus de la mosaïque du tabac ou tabac/virus de la nécrose du tabac, était transloquée dans toute la plante et s'accumulait dans les tissus non infectés. L'ensemble de ces données scientifiques militait donc en faveur d'une implication majeure de l'acide salicylique en tant que signal de la RSA. D'autres expériences ont par la suite nuancé ces conclusions concernant le rôle réel de l'acide salicylique dans l'expression de la RSA. En effet, les travaux de Rasmussen. (1991) [51], réalisés sur des feuilles de concombre (*Cucumis sativus* L.) excisées 6 h après l'inoculation de la bactérie *Pseudomonas syringae*, (c'est-à-dire avant que l'acide salicylique ne s'accumule dans le phloème) ont montré qu'une RSA s'exprimait au niveau de la plante. Par ailleurs, des plants de tabac greffés (partie racinaire de la plante nahG, partie foliaire de type sauvage) dont les racines sont inoculées avec le virus de la mosaïque du tabac n'accumulent que très peu d'acide salicylique dans les racines, mais expriment une RSA dans les parties aériennes [52]. À l'heure actuelle, le rôle exact de

l'acide salicylique dans la transmission du signal de stress n'est pas totalement élucidé et il est probable qu'il partage cette fonction biologique avec d'autres molécules telles que l'acide jasmonique, l'éthylène, le peroxyde d'hydrogène ou les protéines phosphorylées dans le contexte d'une résistance non spécifique. Dans le cas de l'éthylène, les résultats sont controversés. Pour certains auteurs, l'éthylène serait un messenger indispensable à la stimulation des gènes de défense alors que pour d'autres, l'activation de ces gènes serait indépendante de l'éthylène [53]. L'acide jasmonique, un dérivé lipidique issu de l'hydroperoxydation de l'acide linoléique membranaire par la lipoxygénase (LOX), semble être une molécule importante dans la régulation des réponses de défense chez les plantes [54].

Le RSA contribue donc à l'établissement d'un état de veille permanent qui permet à la plante d'être en alerte en cas d'attaque potentielle et de répondre promptement à l'agression.

La résistance systémique induite (RSI). Proche de la RSA, la RSI est une forme de résistance stimulée spécifiquement par des rhizobactéries plus connues sous l'appellation « PGPR » (Plant Growth Promoting Rhizobacteria). Au cours des années 1980, les PGPR ont surtout attiré l'attention en raison de leur capacité à stimuler la croissance végétale (Kloepper et Schroth 1981). Bien que ces bactéries aient fait l'objet de nombreuses investigations physiologiques et biochimiques en relation avec leur effet bénéfique sur la croissance, plusieurs études descriptives ont aussi montré que certaines souches de ces bactéries (en particulier des *Pseudomonas* spp.) avaient la capacité de réduire l'impact de plusieurs maladies racinaires chez une multitude de plantes cultivées [55]. La possibilité que ces rhizobactéries puissent devenir des agents de lutte biologique n'a cessé de se confirmer depuis la première démonstration par Scheffer (1983) qu'un prétraitement de l'orme (*Ulmus americana* L.) avec des souches du *P. fluorescens* résultait en une réduction importante des symptômes causés par le champignon *Ophiostoma ulmi* (Buisman) Nannf. Par la suite, une protection accrue contre différentes maladies a été observée dans plusieurs systèmes biologiques.

Les mécanismes exacts au moyen desquels ces rhizobactéries contribuent à réduire l'incidence des maladies racinaires sont encore assez mal connus, même si plusieurs hypothèses, incluant la compétition pour les nutriments, l'antibiose, la production d'enzymes hydrolytiques des parois fongiques et la sécrétion de facteurs antifongiques, ont été émises. Bien qu'il ne fasse aucun doute que des effets antimicrobiens directs sur les populations pathogènes soient responsables, au moins partiellement, de la protection accrue décrite par plusieurs auteurs, la possibilité que les PGPR puissent aussi induire des effets indirects en sensibilisant la plante à se défendre contre l'attaque microbienne par l'activation des gènes de

défense a été prouvée dans les années 1990, ouvrant ainsi une nouvelle voie de recherche [56]. Ce concept de la résistance systémique induite par les PGPR trouvait sa justification dans certaines études biochimiques indiquant que la protection des plantes traitées avec des PGPR était associée à de profonds changements métaboliques incluant la production de phytoalexines (Van Peer. 1991), l'accumulation de protéines de stress (Zdor et Anderson 1992) et la déposition de polymères structuraux (Albert et Anderson 1987). C'est en 1996 que Benhamou. (1996a, b, c) vont montrer, pour la première fois, que les PGPR se multiplient activement à la surface racinaire et ne colonisent que quelques espaces intercellulaires des cellules épidermiques et corticales de la plante. Lorsque ces plantes sont inoculées avec un champignon pathogène, le microorganisme ne parvient pas à se multiplier et à se propager dans les tissus comme il le fait chez les plantes témoins (non traitées avec les PGPR). Bien qu'une action antifongique directe soit détectée à la surface racinaire, probablement en relation avec des antibiotiques.

---

# **Conclusion générale**

---

Les êtres humains ne sont pas les seuls à être touchés par la pollution de l'air : par son interaction avec les organismes vivants, la pollution de l'air peut être transférée dans d'autres milieux (eaux, sols, végétation) et être à l'origine d'effets néfastes ou bénéfiques. Dans le cas particulier des plantes, de par leur vie fixée et leur large répartition, sont parmi les premières victimes de la pollution atmosphérique mais peuvent aussi subir des effets positifs sur leur évolution.

Au terme de ce travail, nous constatons que :

- Les polluants atmosphériques gazeux pénètrent dans les plantes par l'intermédiaire des stomates des feuilles alors que les polluants particulaires sont captés par le micro-relief des surfaces foliaires.
  - La phytotoxicité des polluants atmosphériques dépend de leur nature chimique.
  - Les polluants induisent un stress oxydatif dans la plante avec production de radicaux libres (radicaux hydroxyles) et de dérivés réactifs de l'oxygène (DRO) qui provoquent des dégâts dans la feuille.
  - La plante met en œuvre des processus tels que la fermeture des stomates pour limiter l'absorption du polluant.
  - Certains facteurs externes peuvent avoir des répercussions positives sur la réponse de la plante à la pollution atmosphérique. Ainsi, la sécheresse conduit à la fermeture des stomates, ce qui protège la plante.
  - La pollution atmosphérique, en modifiant la physiologie et la biochimie des végétaux, a un effet déterminant sur les écosystèmes, et notamment sur les interactions plantes-insectes.
  - Les composés azotés sont peu phytotoxiques mais ont un fort impact sur la végétation : un effet bénéfique fertilisant dans un premier temps et un impact négatif à la longue en entraînant l'eutrophisation des écosystèmes.
-



- 90% des pertes de rendement dues à la pollution atmosphérique dans le monde végétal proviennent de l'ozone.
  - Si les différents polluants particuliers ont peu ou pas d'impact sur la végétation, ils entraînent la contamination des chaînes alimentaires de l'homme et des animaux via les plantes qui sont consommées.
  - La pollution atmosphérique modifie les qualités nutritives des plantes utilisées par les insectes phytophages.
  - Les systèmes de défenses des plantes vis-à-vis des insectes sont altérés par la pollution atmosphérique.
-

---

## **Références bibliographiques**

---

- [1] Semadi A. ; 1989 : Effets de la pollution atmosphérique (pollution globale, fluorée et plombique) sur la végétation dans la région de Annaba (Algérie). Thèse de Doctorat d'Etat en Science Naturelle, Univ. Paris 6, , 339p.
- [2] Amri B. ; 2007 : Pollution et nuisances dans la ville de Constantine effet et impact sur l'environnement.
- [3] Maizi N. ,Alaoua A. , Tahar A. Samadi F. et Fadel D. ; 2010 : Utilisation des végétaux inférieurs comme bio indicateur de la pollution plombique d'origine automobile dans la région de Annaba Algérie j mater environ SCI 251,266.
- [4] Garrec J-P. ;2007 : Expertises techniques et scientifiques de référence laboratoire pollution atmosphérique INRA centre de recherche de Nancy.
- [5] Ahluwalia V.K. ; and Kidwai M.; 2004: Environmental pollution in new trends in green chemistry ;Springer ; Dordrecht.
- [6] Vallero D.; 2004 : Fundamental of air pollution Elsevier.
- [7] Elivhegaray C. ; 2008 : La pollution de Lair sources effets prévention dunod .
- [8] Beauchamp J. ; 2005 : L'atmosphère université de Picardie jules verne.
- [9] Masclet P. ;2005 : Pollution atmosphérique : causes, conséquences, solution ; perspectives .Edition ELIPSES, 13, 14, 22 35-213 p.
- [10] Gombert S. ; Galsomies L. and Rausch de Traubenberg C. ; 2005 : Pollution atmosphérique par les métaux : bio surveillance des retombées. EDP Sciences ,118.
- [11] Ramade F. ;2005 : dunod Paris. Les différents facteurs de la dégradation de la biosphère.
- [12] Boussaboua K. ; 2010 : Etudes des émissions polluantes et des moyens de dépollution dans les moteurs à combustion interne. thèse doctorat en science de génie mécanique 7-49p.
- [13] Lacour S. ; 2009 : Cours de pollution atmosphérique inventaire d'émission. école nationale des pots et chaussées centre d'enseignement et de recherche sur l'environnement atmosphérique p34.
- [14] Jones K.C. et Vogt P. ; 1999 : Persistent organic pollutants (pops) state of the science environmental pollution 100 (1-3), 209-221.
- [15] Fouan L.M. ; 2012 : Biosurveillance des retombées atmosphériques à l'aide de bryophytes : suivi des hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) à divers échelles spatio-

- temporelles. Thèse de doctorat de l'université de Toulouse , option science des agro-ressources, 54 55 56-320.
- [16] Adriano D.C.; 2001: Traces elements in terrestrial environments biogeochemistry, bioavailability and risks of metals. Spriger-Verlag,Berlin.
- [17] Bliefert C. and Perraud.; 2008: chimie de l'environnement : air, eau, sol, déchet. de boeck supérieur .
- [18] Duffus J.H.; 2002: « Heavy metals » a meaningless term pure, and applied chemistry 74 793-807.
- [19] Pancyna J. and Pancyna E.G.; 2001: An assessment of global and regional emissions of trace metals to the atmosphere from anthropogenic source worldwide .Environmental review 9 269-98
- [20] Nriagu J.O.; 1979: The biogeochemistry of lead in the environment. Elsevier, Amsterdam.
- [21] Pycyna J.M.; 19986: Atmospheric trace elements from natural and anthropogenic sources .In: Nriagu J.O. and Davidson C.L (EDS) toxic metals in the atmosphere , John wiley. and sons, New York,33-52.
- [22] DGAC. ; 2013 : Direction général d'aviation civile (France). Pollution atmosphérique et aviation . ;2003 :Rapport réseau environnement.
- [23] Griffith H. ; 2003 : Effet de la pollution atmosphérique sur les cultures agricoles ministère de l'agriculture, de l'alimentation et des affaires rurales. Antario (Canada).
- [24] Martin R-R., Naftel S-J .,Macfie S-M., Jones K-W and Trembley C. ;2006: High variability of the metal content of tree growth rings as measured by synchrotron micro x-ray fluorescence spectrometry.X-Ray spectrometry, 35 , 57 -62.
- [25] Cation M. ; 2010 : Détermination de la pollution atmosphérique métallique : étude critique de l'utilisation des écorces d'arbres. Thèse de doctorat de l'université de Grenoble 1 Ecole doctorale ingénierie pour la sante, la cognition et environnement, 46 48-148,206p laboratoire d'écologie Alpine-UMR 5559.
- [26] Deletraz G. et Paul E. ; 1998 : Etat de l'art pour l'étude des impacts des transports routiers à proximité des routes et autoroutes ADEME.
- [27] Mouaci k. ;2002 : Etudes de quelque source de pollution atmosphérique dans la région de Bejaia, Mémoire a l'université de (Bejaia) .

- [28] Laid (2011) effets sanitaires de la pollution atmosphérique urbaine par les poussières (pm10) en Algérie : cas de la ville d'Alger. ministère de l'environnement du développement durable.
- [29] Lin C-C., Chen S.J and Huang K.L.;2005: characteristics of metals in nano\_ultrafine\_fine\_coarse particules collected beside a heavily trafficked road . Environmental Science , and Technology ,39 8113-8122.
- [30] El yamani M.; 2006 : pollution atmosphérique urbaine. Environnement et milieu. Afsset .
- [31] Bradl H.B. ;2005: Heavy metals in the environment : origin , interaction and remediation . Elsevier academic press, Amsterdam, Boston.
- [32] Abellan-Nebot J.V., Subiron F.R. ; 2010: A review of machining monitoring systems based on artificial intelligence process models. Int J Adv Manuf Technol 47(1):237–257.
- [33] Bell JNB., Honour S.L and Power SA .;2011: Effects of vehicle exhaust emissions on urban wild plant species. Environ Pollut 159(8–9):1984–1990.
- [34] Biočanin R., Obhodaš S. ; 2011 : Environmental pollutants. International University of Travnik. Faculty for Civil Engineering, Novi Pazar, pp 322–323.
- [35] Borgström S.T.; 2009: Patterns and challenges of urban nature conservation-a study of southern Sweden. Environ Plan A 41(11):2671–2685.
- [36] <https://www.airparif.asso.fr/pollution/effets-de-la-pollution-batiment>
- [37] Misztal, P.K., Hewitt, C.N., Wildt, J., Blande, J.D., Eller, A.S.D., Fares, S.; and Goldstein, A.H. 2015:. Atmospheric benzenoid emissions from plants rival those from fossil fuels. Scientific Reports, 5, 12064. <http://doi.org/10.1038/srep12064>.
- [38] Baier M., Kandlbinder A., Gollack D. and Dietz K.J.; 2005:Oxidative stress and ozone: perception, signalling and response. Plant, Cell & Environment, 28(8), 1012–1020.
- [39] Foyer CH and Noctor G., 2005: Redox homeostasis and antioxidant signaling: a metabolic interface between stress perception and physiological responses. Plant Cell. 17, 1866-1875.
- [40] Garrec J.P., and Van Haluwyn C. ; 2002 :Biosurveillance végétale de la qualité de l'air. Concepts, méthodes et applications. Editions Tec et Doc Lavoisier, Paris, 118 pages.
- [41] Annual Indicator Report Series (AIRS)., In support to the monitoring of the 7th Environment Action Programme. En date du 30 Novembre 2017 ; Jones L.; 2014: A review

- and application of the evidence for nitrogen impacts on ecosystem services. *Ecosystem Services*, 7, 76-88, ISSN 2212-0416.
- [42] Garrec J.P and Sigoillot I.E. ;1992 : Les arbres malades de la mer. *La Recherche*, 245, 940-941.
- [43] Holland M., Kinghorn S., Emberson L., Cinderby S., Ashmore M., Mills G and Harmens H. ; 2006: Ozone and Crop Losses 2006 (ICP Vegetation Report for Defra Contract EPG 1/3/205).
- [44] Mills G., Hayes F., Jones M.L.M. and Cinderby S. ;2007: Identifying ozone-sensitive communities of (semi-) natural vegetation suitable for mapping exceedance of critical levels. *Environmental Pollution* 146: 736-743.
- [45] Tseng C.C.and Chang N.B.; 2001: Assessing relocation strategies of urban air quality monitoring stations by GA-based compromise programming. *Environ Int* 26:523.
- [46] Vosniakos F., Triandafyllis J., Prapas D., Karyda A., Mentzelou P., Vasilikiotis G., Karagiannis D., Lazou P., Papastamou A., Vosniakos K.and Argiriadis V.; 2008: Urban air pollution due to vehicles in katerini city on comparison basis (1999–2006). *J Environ Prot Ecol* 9(3):485.
- [47] Aas E., Beyer J., Jonsson G., Reichert W.L.and Andersen O.K. ; 2001: Evidence of uptake, biotransformation and DNA binding of polyaromatic hydrocarbons in Atlantic cod and corkwing wrasse caught in the vicinity of an aluminium works. *Mar Environ Res* 52:213–229.
- [48] Bidleman T.F.; 1988; Atmospheric processes. Wet and Dry deposition of organic compounds are controlled by their vapor-particle partitioning. *Environ Sci Technol* 22:361–367.
- [49] Gerdol R., Bragazza L., Marchesini R., Medici A., Pedrini P., Benedetti S., Bovolenta A.and Coppi S.; 2002: Use of moss ( *Tortula muralis* Hedw.) for monitoring organic and inorganic pollution in urban and rural sites in Northern Italy. *Atmos Environ* 36:4069–4075.
- [50] Gurjar B.R., Jain A., Sharma A., Agarwal A., Gupta P., Nagpure A.S.and Lelieveld J.; 2010: Human health risks in megacities due to air pollution. *Atmos Environ* 44:4606–4613.
- [51] Harmens H., Mills G., Hayes F.and Norris D.;2015: The participants of the ICP Vegetation Air pollution and vegetation. ICP vegetation annual report 2014/2015.

- [52] Holoubek I., Korínek P., Seda Z., Schneiderová E., Holoubková I., Pacl A., Tríska J., Cudlín P. and Cáslavský J.; 2000: The use of mosses and pine needles to detect persistent organic pollutants at local and regional scales. *Environ Pollut* 109:283–292.
- [53] OECD (2012) OECD environmental outlook to 2050: the consequences of inaction. doi .
- [54] Oishi Y.; 2012: Does uptake of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) differ between pine needles and mosses? *J Environ Inf Sci* 40:31–36.
- [55] Oishi Y.; 2013: Comparison of pine needles and mosses as bio-indicators for polycyclic aromatic hydrocarbons. *J Environ Prot* 4:106–113.
- [56] Ötvös E., Kozák I.O., Fekete J., Sharma V.K. and Tuba Z.; 2004: Atmospheric deposition of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in mosses ( *Hypnum cupressiforme* ) in Hungary. *Sci Total Environ* 330:89–99.
- [57] Pankow J.F.; 1987: Review and comparative analysis of the theories on partitioning between the gas and aerosol particulate phases in the atmosphere. *Atmos Environ* 21:2275–2283.