



Chapitre 3

Air (Atmosphère)

3.1. Définition de l'atmosphère :

Sous le terme atmosphère (du grec atmos, vapeur, fumée ; du latin sphaira, boule, globe terrestre). L'atmosphère est la couche d'air qui entoure le globe terrestre.

3.2. L'importance de l'atmosphère :

L'atmosphère est un élément de grande importance :

- L'homme peut vivre sans nourriture au plus environs deux semaines et deux jours sans eau, mais pas plus de cinq minutes sans air. Environ 0,5 L d'air est emmagasiné à chaque inspiration. A raison de 16 inspirations par minute (dans le cas de respiration au repos) c'est un volume d'air de $11,5 \text{ m}^3$ (soit environ 13,5 kg), qu'un homme respire quotidiennement ; cette quantité dépasse de loin celle de l'eau ou de la nourriture absorbée.
- Elle protège la planète des rayonnements nocifs du soleil, régule la température, et fournit l'air nécessaire à la respiration des êtres vivants.
- L'atmosphère est le compartiment le plus important par le transport des polluants. La pollution apparaît plus rapidement dans l'atmosphère que dans l'eau et le sol.

3.3. Composition et propriétés de l'atmosphère :

3.3.1. Couches de l'atmosphère :

L'atmosphère se compose de **5 couches distinctes** caractérisées par leur composition et leur température (**Fig. 3.1**):



Figure 2.1 : Couches de l'atmosphère.

3.3.1.1. La troposphère (la couche diffuse) :

La troposphère est la couche atmosphérique le plus proche du sol terrestre, et la dense, elle représente 90% de la masse de l'atmosphère, son épaisseur est variable : 7 kilomètres de hauteur au-dessus des pôles, 18 kilomètres au-dessus de l'équateur et environ 13 kilomètres selon les saisons dans le zone tempérée, c'est dans cette couche qu'on retrouve la plus grande partie des phénomènes météorologiques. Au fur et à mesure qu'on s'élève dans la troposphère, la température décroît de façon régulière d'environ 6 degrés Celsius tous les 1000 mètres pour atteindre -56 °C à **la tropopause** (zone séparent la troposphère de la stratosphère).

3.3.1.2. La stratosphère (couche d'ozone) :

La stratosphère est au-dessus de la troposphère. C'est dans la stratosphère qu'on trouve la couche d'ozone. Cette dernière est essentielle à la vie sur terre, car elle absorbe la majorité des rayons solaires ultraviolets qui sont extrêmement nocifs pour tout être vivant. Cette absorption provoque un dégagement d'énergie sous forme de chaleur. C'est pourquoi la température augmente lorsqu'on s'élève dans la stratosphère. **La stratopause** sépare la stratosphère de la mésosphère.

3.3.1.3. La mésosphère :

La mésosphère est au-dessus de la stratosphère. C'est une zone très froide et très instable avec des mouvements verticaux. La température recommence à décroître avec l'altitude. Les gaz sont ionisés et les météores s'enflamment lors qu'elles entrent dans la

mésosphère à cause de la friction de l'air. Ce phénomène nous apparaît sous la forme "d'étoiles filantes".

3.3.1.4. La thermosphère:

Zone de l'atmosphère d'une planète située au-dessus de la mésosphère et caractérisée par une forte croissance de la température avec l'altitude. La pression y devient presque nulle et les molécules d'air sont très rares. La thermosphère terrestre est située entre 85 et 600 km d'altitude. Entre 100 et 150 kilomètres d'altitude, le dioxygène moléculaire absorbe l'ultraviolet solaire de très courtes longueurs d'onde (entre 100 et 200 nm). En résulte une augmentation de température avec l'altitude qui oscille entre 300 °C et 1600 °C selon l'activité solaire. Les températures sont élevées, mais la densité de matière est extrêmement faible.

3.3.1.5. L'exosphère:

La couche la plus haute est l'exosphère. Dans cette couche, la température continue à augmenter, l'exosphère atteint des milliers de kilomètres (> 500 km), d'altitude et disparaît graduellement dans l'espace. C'est la région la plus calme et il n'y'a pas des réactions chimiques.

La séparation entre la troposphère et la stratosphère est appelée "**tropopause**". Celle entre la stratosphère et la mésosphère est appelée "**stratopause**". Celle entre la mésosphère et la thermosphère est appelée "**mésopause**". Celle entre la thermosphère et l'exosphère est appelée "**thermopause**".

3.3.2. Composition de l'atmosphère :

- l'air est inodore (sans odore), incolore (sans couleur) et invisible (ne se voit pas).
- L'air a une masse environ 1,17 kilogramme par mètre cube (à 15°C, 1 bar).
- L'air de l'environnement terrestre est humide car il contient de vapeur d'eau.

La composition actuelle de l'atmosphère près de la surface (jusqu'à 10 km d'altitude) est représentée dans le Tableau 3.1.

Tableau 3.1 : Composition de l'air sec.

| Gaz de l'atmosphère | Composition volumétrique (%) |
|-------------------------------|------------------------------|
| Diazote (N_2) | 78,084 |
| Dioxygène (O_2) | 20,946 |
| Argon (Ar) | 0,934 |
| Dioxyde de carbone (CO_2) | 0,035 |
| Néon (Ne) | 0,001818 |
| Hélium (He) | 0,000524 |
| Méthane (CH_4) | 0,0001745 |
| Krypton (Kr) | 0,000114 |
| Dihydrogène (H_2) | 0,000053 |
| Oxyde nitrique (N_2O) | 0,000031 |
| Xénon (Xe) | 0,0000087 |
| Ozone (O_3) | Trace – 0,0008 |
| Monoxide de Carbone (CO) | Trace – 0,000025 |
| Dioxyde de soufre (SO_2) | Trace – 0,00001 |
| Dioxyde d'azote (NO_2) | Trace – 0,000002 |
| Ammoniac (NH_3) | Trace – 0,0000003 |

Vapeur d'eau (H_2O) Très variable : entre moins de 0,5 % et environ 5 %

Il y'a d'autres gaz qui se trouvent en faibles quantités. L'atmosphère contient également des aérosols qui se composent de particules liquides ou/et solides en suspension. Ces particules peuvent être :

- Viables : bactéries, champignons, insectes, pollens, etc.
- Non viables : sables fins, poussières, etc.

3.4. La qualité de l'air :

La qualité de l'air est un critère fréquemment utilisé pour définir différentes zones géographiques. Cependant, les concepts employés manquent souvent d'homogénéité et de limites claires. Pour clarifier le propos, nous distinguerons trois types d'espaces :

- **Les zones polluées**, qui abritent les principales sources de pollution atmosphérique, qu'elles soient urbaines ou industrielles.
- **Les zones non polluées**, correspondant généralement aux régions rurales éloignées des foyers d'émission.
- **Les zones à air pur**, situées dans des régions très éloignées de toute activité humaine. Leur pollution, minime, provient exclusivement du transport naturel de polluants par le vent, les précipitations ou les poussières.

À proximité du sol, la composition de l'atmosphère varie considérablement entre une zone polluée et une zone rurale. Dans les zones polluées, la concentration des polluants, issus principalement de la circulation et des émissions anthropiques (dioxyde de soufre, oxydes d'azote, monoxyde de carbone, etc.) est accentuée par de faibles vitesses de vent, qui limitent la dispersion.

3.5. Pollution de l'atmosphère :

3.5.1. Définition de la pollution atmosphérique:

Selon la loi n° 83-03 du 05-02-1983 relative à la protection de l'environnement (Algérie) : « On entend par pollution atmosphérique, au sens de la présente loi, l'émission dans l'atmosphère de gaz, de fumées ou de particules solides ou liquides, corrosifs, toxiques ou odorants, de nature à incommoder la population, à compromettre la santé ou la sécurité publique ou à nuire aux végétaux, à la production agricole et aux produits agro-alimentaires, à la conservation des constructions et monuments ou au caractère des sites »

3.5.2. Polluant atmosphérique :

Est défini comme un contaminant de l'air, d'origine naturel ou anthropique, solide liquide ou gazeux, qui peut à une certaine concentration provoquer des nuisances pour l'environnement et donc pour la santé humaine.

3.5.3. Classification des polluants :

Deux grandes familles de polluants sont distinguées : les polluants primaires (émis directement) et les polluants secondaires (qui se forment dans l'air).

3.5.3.1. Les polluants primaires : Les polluants primaires sont principalement émis dans l'atmosphère. Ils sont issus des sources de pollution comme le trafic routier, les industries, le chauffage, l'agriculture, etc.

Il s'agit par exemple :

- ✓ Des oxydes de carbone
- ✓ Des oxydes de soufre
- ✓ Des oxydes d'azote
- ✓ Des hydrocarbures légers
- ✓ Des composés organiques volatils (COV)
- ✓ Des particules (PM_{10} et $PM_{2,5}$) (particules en suspension dans l'air, PM_{10} : diamètre < 10 μm et $PM_{2,5}$: diamètre < 2.5 μm : particules fines)
- ✓ Des métaux (plomb, mercure, cadmium...).

3.5.3.2. Les polluants secondaires : Les polluants secondaires ne sont pas directement rejetés dans l'atmosphère, mais ils proviennent de réactions chimiques de gaz entre eux. C'est le cas notamment :

- ✓ Des particules secondaires
- ✓ De l'ozone (O₃)
- ✓ Du dioxyde d'azote...

Certains polluants comme le dioxyde d'azote et les particules sont à la fois des polluants primaires et secondaires.

3.5.4. Temps de mélange (ou temps d'homogénéisation):

Le temps de mélange est la durée nécessaire pour qu'un polluant émis dans l'atmosphère se répartisse de manière homogène (uniforme) dans un volume d'air donné.

Ce temps varie considérablement selon l'échelle spatiale considérée :

- **À l'échelle d'un hémisphère** (par exemple, tout l'hémisphère nord) : le temps de mélange est de l'ordre de 1 à 2 mois.
- **À l'échelle du globe entier** : ce processus est beaucoup plus lent et nécessite généralement 1 à 2 ans. Cela s'explique par la relative lenteur des échanges atmosphériques à grande échelle, comme ceux entre l'hémisphère nord et l'hémisphère sud.

Le temps de mélange permet de comprendre à quelle vitesse un polluant, une fois émis, peut devenir un problème non plus local, mais régional ou global.

3.5.5. Durée de vie atmosphérique :

La durée de vie d'un composé dans l'atmosphère est le temps moyen pendant lequel une molécule de ce composé y reste avant d'être éliminée ou transformée. L'élimination se fait principalement par :

- Des réactions chimiques (oxydation, photolyse...).
- Un dépôt (le polluant est "lavé" par la pluie ou capté par le sol et la végétation).

La durée de vie des gaz dans l'atmosphère est extrêmement variable, allant de :

- Quelques secondes ou minutes pour les espèces très réactives (ex. : les radicaux libres).
- À plusieurs dizaines de milliers d'années pour les gaz très stables (ex. : les gaz fluorés comme le SF₆, ou certains gaz à effet de serre).

Remarque :

- Si la durée de vie d'un polluant est plus courte que le temps de mélange nécessaire pour atteindre une zone, il n'aura pas le temps de s'y répandre. Son impact sera donc local ou régional.
- Si sa durée de vie est plus longue que le temps de mélange global, il aura le temps de se répandre uniformément dans toute l'atmosphère terrestre. Son impact sera planétaire (ex. : le CO₂).

3.5.6. Temps de demi-vie ($t_{1/2}$) :

Le temps de demi-vie est une notion principalement utilisée en cinétique chimique. Il représente le temps nécessaire pour que la concentration initiale d'un composé diminue de moitié en raison d'un processus de dégradation spécifique (souvent une réaction chimique).

La durée de vie est une mesure de la persistance globale d'un polluant dans l'environnement, qui peut impliquer plusieurs processus d'élimination.

3.5.7. Puits :

Un puits est un domaine de l'environnement, d'où une substance est enlevée par « des processus de captation ». On entend par le terme de puits un processus, une activité ou un mécanisme, par lequel une substance est enlevée d'une partie de l'environnement. Dans un puits, un composé peut être :

- Adsorbé (par exemple un gaz ou un liquide sur une poussière) ;
- Absorbé (par exemple CO₂ dans les fleuves, les lacs ou dans les océans) ;
- Déposé (par exemple déposé sur les sédiments d'un fleuve) ;
- Biologiquement décomposé (par exemple l'absorption de CO₂ ou de H₂S par les plantes) ;
- Décomposé par des réactions chimiques (exemple : la transformation des hydrocarbures chlorofluorés en CO₂, HCl et HF).

On dit des composés gazeux que ce sont des gaz de puits, quand ils peuvent être enlevés de l'atmosphère par des processus naturels. Les gaz de puits sont en général solubles dans l'eau ; ils peuvent donc être entraînés hors de la troposphère par les précipitations et être ainsi déposés sur les sols

3.5.8. Sources :

Sous le terme de source, on entend une partie de l'environnement à partir de laquelle une substance est émise. On distingue deux types de sources :

3.5.8.1. Source naturelle: c'est l'ensemble des sources émettrices qui ne sont pas relatives à l'activité humaine et elles émettent des polluants naturels. Il existe plusieurs sources naturelles dont on cite les plus fréquents.

✓ La forêt

C'est la source de la majorité des polluants naturels dans l'atmosphère par les incendies accidentels. Ces feux de forêt émettent de larges quantités de polluant sous forme de fumés, CO₂, hydrocarbures imbrûlés (combustion partielle), oxyde d'azote et les cendres.

Le tableau ci-dessous résume les sources naturelles de la pollution atmosphérique

Tableau 3.2 : Les sources naturelles de la pollution atmosphérique.

| Source | Polluant |
|---------|---|
| Bétail | CH ₄ |
| Désert | Sable |
| Volcans | Cendre, H ₂ S, SO ₂ , CO, CO ₂ , HCl |
| Foudre | NO _x , HNO ₃ |

3.5.8.1. Sources anthropiques :

C'est l'ensemble des sources émettrices qui sont relatives à l'activité humaine, elles émettent des polluants naturels et/ou des polluants qui n'existent pas dans la nature et qui provoquent des perturbations à l'environnement.

Le tableau ci-dessous résume les sources anthropiques de la pollution atmosphérique

Tableau 3.3 : Les sources anthropiques de la pollution atmosphérique.

| Source | Polluant |
|-------------------|---|
| Industrie | CO ₂ , NO _x , SO _x , PVC, HFC, CFC |
| Domestique | CO ₂ , CO, etc. |
| Trafic automobile | CO ₂ , HAP, HAM, NO _x , SO _x |
| Combustion | Energie, cendres, CO ₂ , CO, etc. |

PVC : polychlorure de vinyle

HFC : hydrofluorocarbure

CFC : chlorofluorocarbure

HAP : hydrocarbures aromatiques polycycliques

3.5.9. Emission, transmission et déposition :

Le mécanisme complet du devenir d'un polluant dans l'atmosphère s'articule en trois phases. Tout commence par son **émission**, c'est-à-dire son rejet dans l'air depuis une source précise, qu'elle soit industrielle, liée au transport ou naturelle. Une fois libéré, le polluant entre dans la phase de **transmission** : il est transporté et dilué par les vents, étalé par les mouvements turbulents de l'air, et peut subir des transformations chimiques pour donner naissance à d'autres polluants secondaires. Enfin, il quitte l'atmosphère par **dépôt**, soit de manière sèche (par sédimentation ou adsorption sur le sol et la végétation), soit de manière humide, en étant lessivé par les pluies, ce qui conduit à son retour à la surface et à ses impacts sur les écosystèmes et la santé (Fig. 3.2).

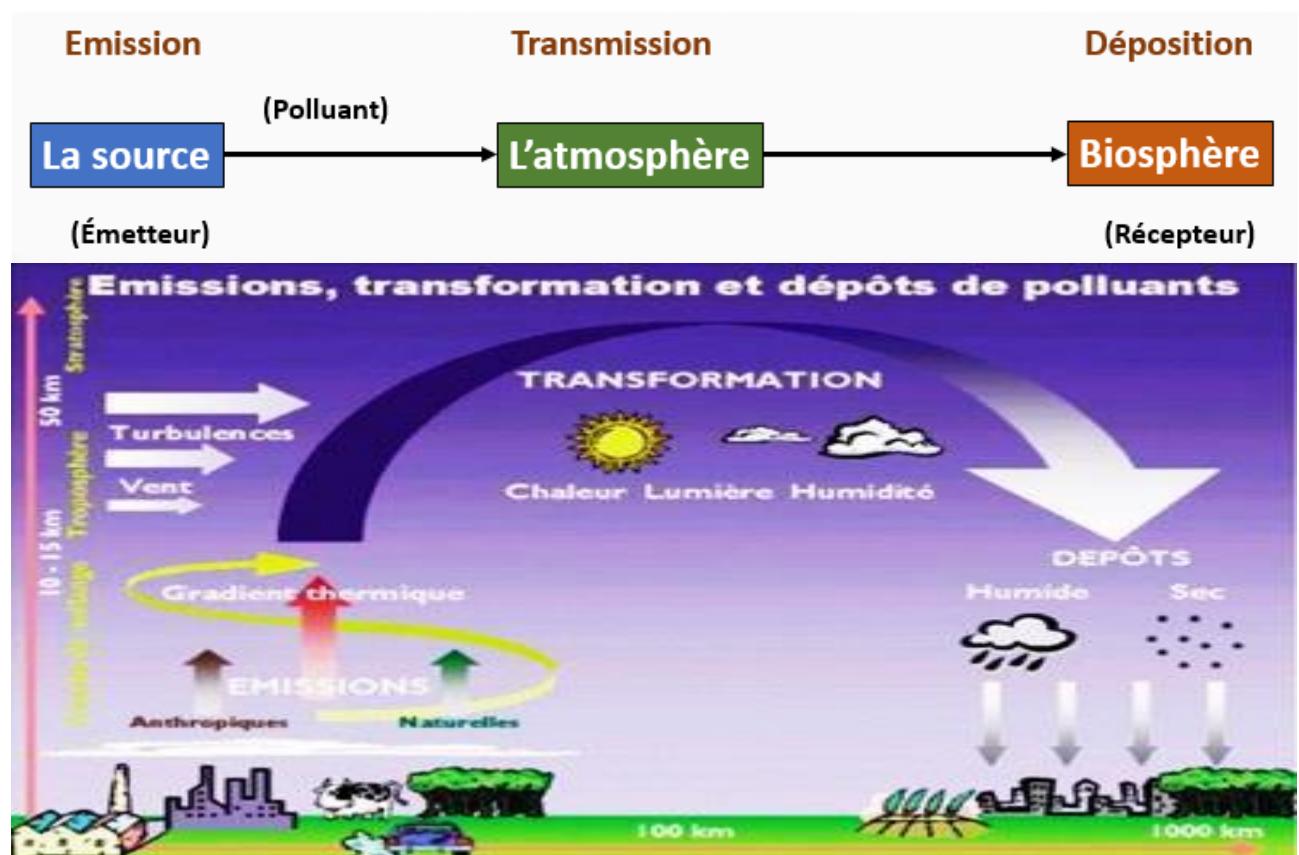


Figure 3.2 : Modèle simple pour l'émission, transmission et déposition des polluants dans l'atmosphère.

3.5.10. Effets de la pollution atmosphérique :

Les polluants atmosphériques peuvent exercer une influence néfaste (Fig. 3.3):

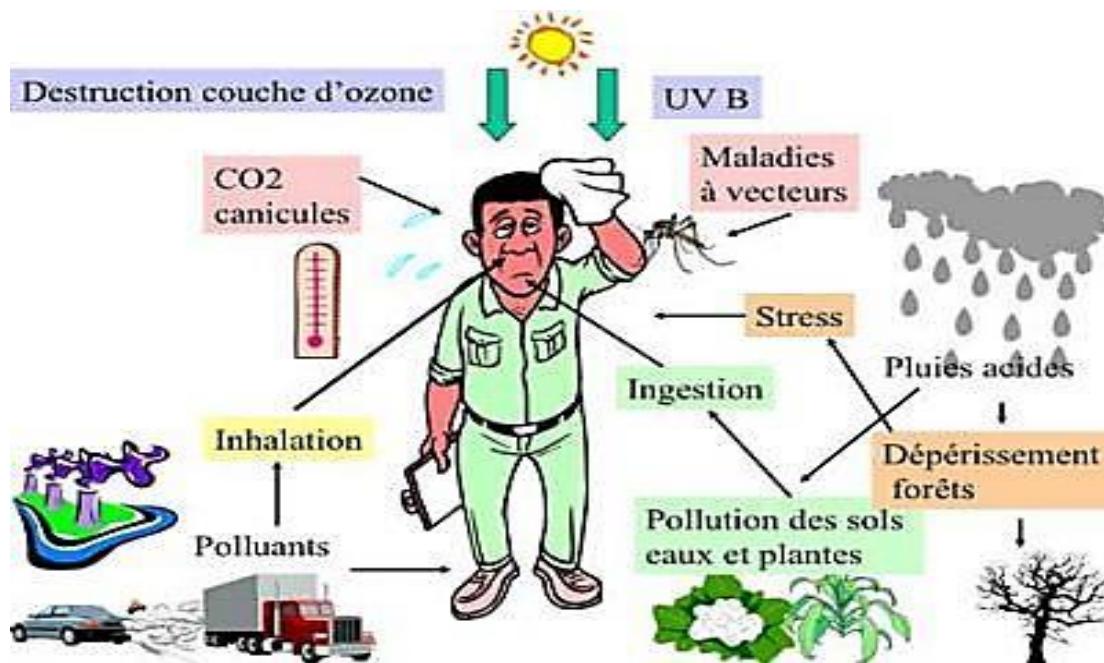


Figure 3.3 : Les principaux effets de la pollution atmosphérique.

A. Effet sur la santé :

La pollution affecte la santé d'une manière directe par inhalation et par exposition et d'une manière indirecte par nourriture et à travers l'eau. L'inhalation des polluants par l'homme provoque des maladies broncho pulmonaires intenses, des maladies cancéreuses et des divers cas d'allergie tout dépend de la taille et la nature des particules polluants, les grosses particules sont arrêter au niveau des voies respirations jusqu'aux alvéoles pulmonaires et les fines particules peuvent continuer jusqu'au sang, et l'exposition de l'homme à l'air contenant les particules polluantes provoque une irritation de la peau. En effet, les enfants sont la partie la plus touchée des effets nocifs de la pollution atmosphérique.

B. Effet sur la végétation et sur les sols :

Le dépôt des polluants atmosphériques par voie sèche et humide peuvent affecter la qualité des sols et des végétaux.

- ✓ Boucher les pores des feuillages (ils empêchent la respiration de la plante) et même, il forme une couche qui empêche la photosynthèse.
- ✓ L'adsorption des polluants affectent la qualité des plantes en les rendant toxiques.
- ✓ Dépérissement (affaiblissement) des forêts.
- ✓ Les polluants affectent la qualité des sols (on ne peut pas cultiver les plantes).

C. Effet sur le climat :

Les particules atmosphériques affectent le climat directement en perturbant le transfert des rayonnements solaires (par absorption et diffusion de la lumière) à travers l'atmosphère, ce qui a pour effet potentiel de perturber le bilan radiatif à l'échelle planétaire. Cette perturbation peut provoquer un refroidissement ou un réchauffement de la planète et par conséquent les changements climatiques (sécheresse en hiver, neige en été, cyclones, etc.)

D. Pluies acides :

Les pluies acides se forment lorsque les émissions industrielles et automobiles, principalement le dioxyde de soufre (SO_2) et les oxydes d'azote (NO_x), sont libérés dans l'atmosphère (Fig. 3.3). Ces polluants subissent alors des réactions chimiques complexes sous l'effet de la lumière solaire et de l'humidité, se transformant en acides sulfurique et nitrique. Transportés sur de longues distances par les vents, ces composés acides retombent finalement sur la terre sous forme humide (pluie, neige, brouillard) ou sous forme sèche (particules et gaz). Ce phénomène, dont l'acidité peut atteindre un pH très bas, entraîne des conséquences néfastes pour les écosystèmes aquatiques, les forêts, les sols et les constructions humaines,

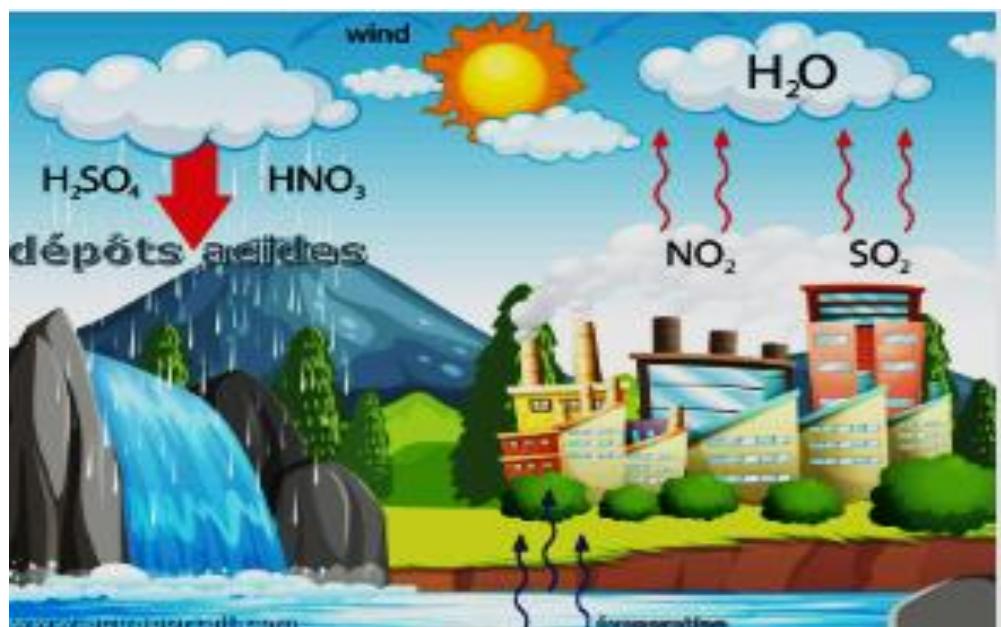


Figure 3.3 : Formation des pluies acides.

3.5.11. Les procédés de dépollution de l'air pollué :

Les activités industrielles émettent des polluants atmosphériques nocifs pour l'homme, les écosystèmes et les matériaux. Outre les particules, les polluants gazeux, du fait de leur miscibilité avec l'air et de leur caractère parfois indétectable, constituent une menace diffuse.

Ces émissions comprennent principalement : les COV, les SO_x (SO₂, SO₃), les NO_x (NO, NO₂), les oxydes de carbone (CO, CO₂), les acides halogénés (HCl, HF), l'ozone (O₃), les dioxines/furanes et certains métaux lourds volatils.

Il existe deux moyens d'assainir un flux d'air pollué : rendre les polluants inoffensifs (techniques destructives) ou les extraire (techniques séparatives).

3.5.11.1. Les techniques destructives : elles sont généralement non sélectives qui détruisent les molécules polluantes.

Exemple : L'oxydation thermique ou catalytique ; les traitements biologiques ; la photocatalyse ; les plasmas.

3.5.11.2. Les techniques séparatives (récupératives): ce sont des techniques qui permettent d'extraire du flux d'air de manière plus ou moins ciblée, les molécules polluantes en préservant leur intégrité.

Exemple : L'absorption, la condensation ; l'adsorption ; les techniques membranaires.

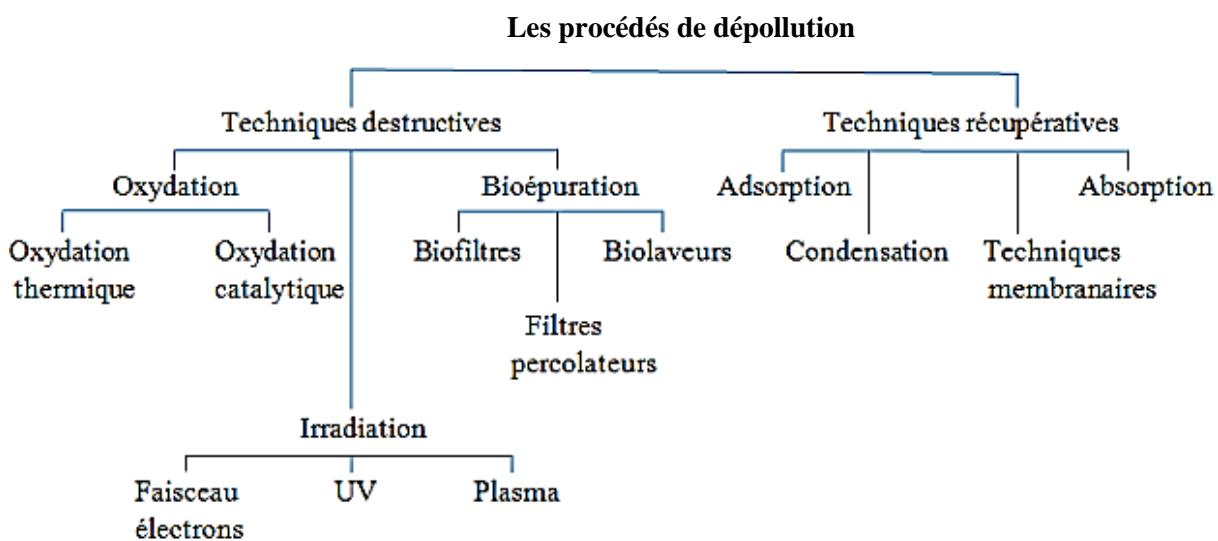


Figure 3.4 : Organigramme simplifié des principales techniques de dépollution de l'air pollué.

La récupération est techniquement possible lorsque le nombre de polluants est limité. Le procédé récupérait représente cependant des coûts d'investissement supérieurs, il est économiquement intéressant lorsque la substance récupérée est valorisable. La faisabilité économique et technique des différents procédés d'épuration, en fonction de débit et de concentration à traiter peut se résumer par le schéma suivant (**Fig. 3.5**).

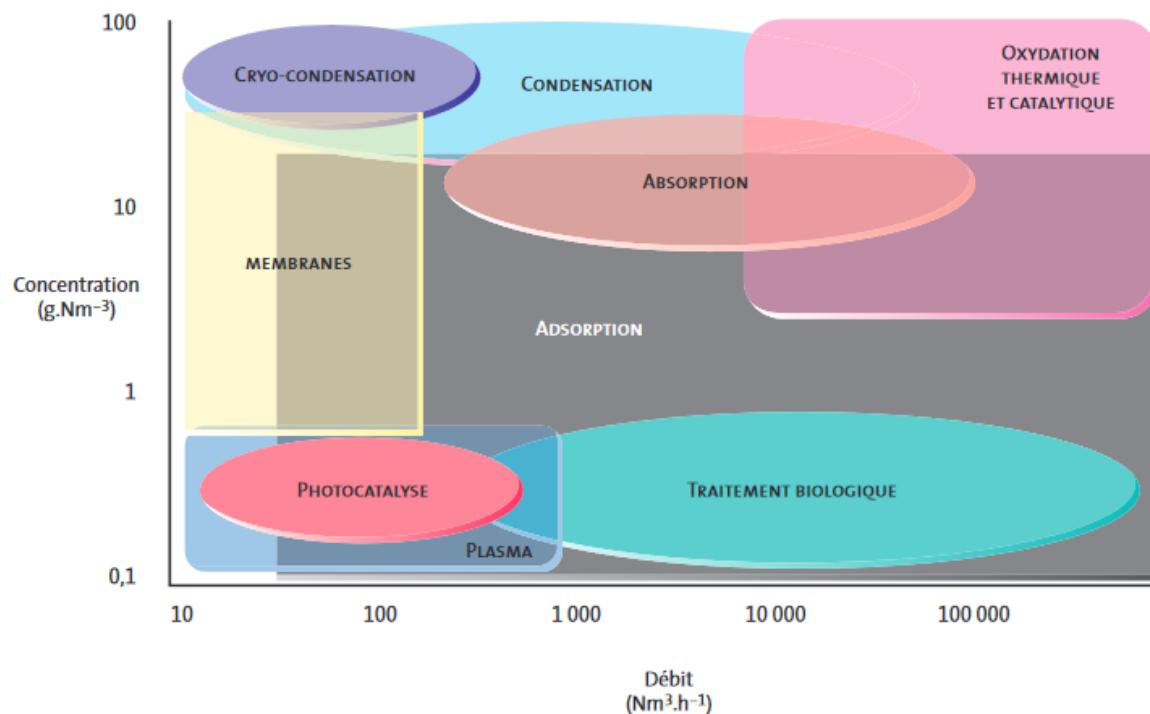


Figure 3.5 : Techniques d'épuration en fonction de la concentration et du débit.

g·N·m⁻³ (grammes par mètre cube normal) : Masse de polluant (en grammes) contenue dans 1 mètre cube d'air ramené aux conditions normales (0 °C, 1 atm).