

2^{ème} Chapitre : Mécanisme de circulation, dispersion et transfert des substances polluantes dans la biosphère

L'étude de la dispersion et circulation des polluants est très complexe et nécessite, en premier lieu, de bien comprendre le comportement d'un écoulement en présence d'obstacles. En effet, l'étendue de la zone de circulation, la nature de la couche traversée, les facteurs du milieu (climat, sols, topographie...etc.) tout comme celle des tourbillons qui se détachent de l'obstacle, vont interagir avec le polluant et donc influencer sa dispersion.

1- Circulation atmosphérique des polluants

Le problème de la pollution atmosphérique a débuté au début de l'ère industrielle, avec l'usage du combustible fossile qu'est le charbon, il y a environ 150 ans. Les progrès technologiques suivant cette époque ont aidé à développer plusieurs substances toxiques contribuant à la contamination de l'air, de l'eau et parfois même du sol. Jusqu'à la deuxième guerre mondiale, ces problèmes n'étaient pas très préoccupants. Par contre, à l'époque après-guerre, avec son lot de technologie moderne, nous avons vu croître de façon très inquiétante les émissions des foyers industrielles et urbains, l'accumulation de déchets provenant de la consommation massive de la population et des industries chimique, et la libération de substances très toxique et peu biodégradable, parfois même indestructible. Aujourd'hui, on évalue l'émission de polluants atmosphérique à 150 millions de tonnes métriques par année au Etats-Unis, et à 2 milliards de tonnes métriques par années dans le monde.

1-1- Structure de l'atmosphère et composition de l'air

1-1-1- Composition de l'atmosphère

L'atmosphère fait partie de la famille des gaz. Les gaz qui composent notre atmosphère viennent du centre de la terre ! Ces gaz ont été expulsés par les volcans au début de l'existence de la Terre.

Les constituants les plus importants dont la quantité est variable dans le temps sont : la vapeur d'eau, le gaz carbonique, l'ozone et certaines particules en suspension dans l'air (les polluants par exemple).

L'eau existe dans les trois états (ou phases) : liquide, solide et gazeux, et cela, à cause des températures caractéristiques et variables de notre planète.

L'atmosphère est plus épaisse à l'équateur (13-16 km) qu'aux pôles (7-8 km).

On évalue la quantité de molécules dans l'atmosphère à 10 exposants 44 (44 zéros après le 1 !!!). Toutes ces molécules sont soumises à deux forces :

- Les molécules elles-mêmes ont une vitesse d'environ 500 m/s qui tentent d'aller vers l'espace ;
- Le poids des molécules tend à les faire tomber sur notre globe (conséquence de l'attraction terrestre).

Le résultat de ces deux forces fait en sorte que la moitié de la masse de l'atmosphère se trouve dans les 5 premiers kilomètres d'altitude. Il faut s'élever jusqu'à 20 km pour atteindre 90% de la masse totale de l'atmosphère.

Tableau 02 : Composition actuelle de l'atmosphère près de la surface

Nom du gaz	% présent
Azote (N ₂)	78 %
Oxygène (O ₂)	21 %
Argon (A)	0,93 %
Vapeur d'eau (H ₂ O)	0 - 4 %
Gaz carbonique (CO ₂)	0,033 %
Néon (Ne)	0,0018 %
Krypton (Kr)	0,000114 %
Hydrogène (H)	0,00005 %
Oxyde d'azote (N ₂ O)	0,00005 %
Xénon (Xe)	0,0000087 %
Ozone (O ₃)	0 - 0,000001 %

1-1-2- Les couches de l'atmosphère

- **Troposphère** : La troposphère est la couche atmosphérique la plus proche du sol terrestre. 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 la 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 séparant la troposphère de la stratosphère). L'air près du sol est plus chaud qu'en altitude car la surface réchauffe cette couche d'air.

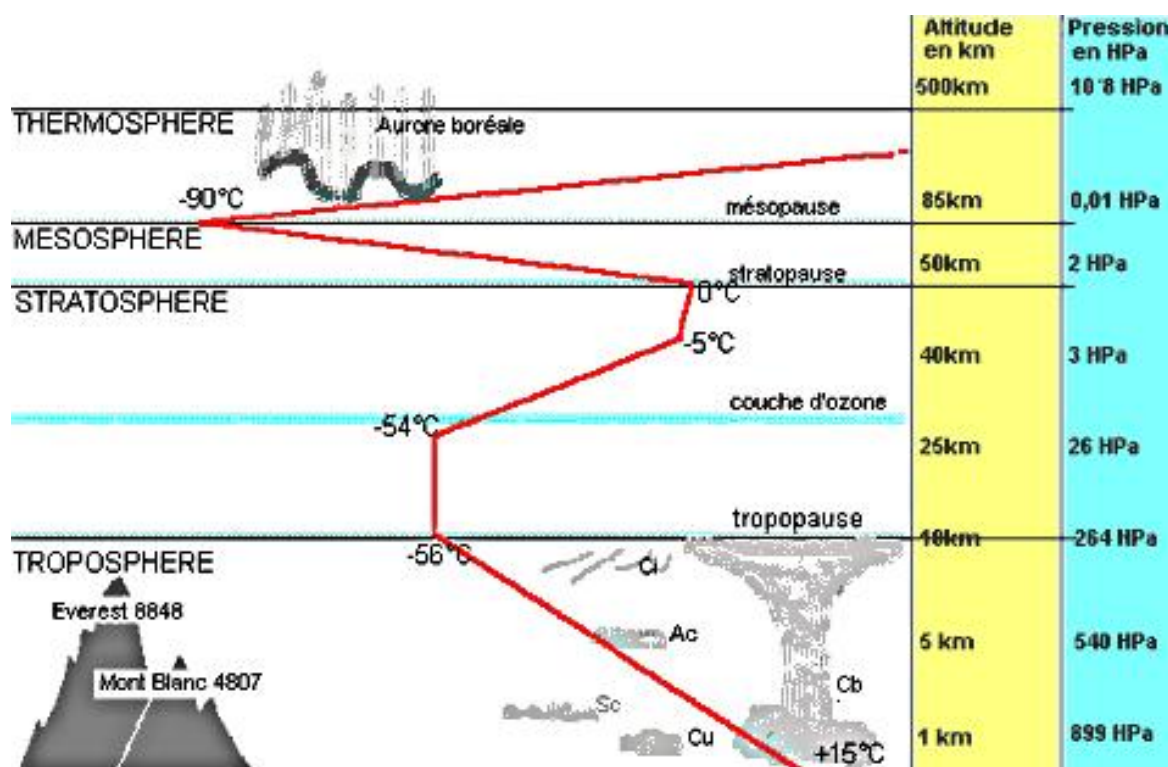


Figure 03 : Structure verticale de l'atmosphère

- **Stratosphère** : 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. Les mouvements de l'air y sont beaucoup moindres. Il s'agit d'un environnement beaucoup plus calme. La stratopause sépare la stratosphère de la mésosphère.

- **Mésosphère** : La mésosphère est au-dessus de la stratosphère. Dans cette couche, la température recommence à décroître avec l'altitude pour atteindre -80° C à une altitude d'environ 80 km.

Les poussières et particules qui proviennent de l'espace (les météores) s'enflamment lorsqu'elles entrent dans la mésosphère à cause de la friction de l'air. Ce phénomène nous apparaît sous la forme « d'étoiles filantes ».

- **Thermosphère** : La couche la plus haute est la thermosphère. Dans cette couche, la température augmente avec l'altitude et peut atteindre environ 100 degrés Celsius. La thermosphère atteint des milliers de kilomètres d'altitude et disparaît graduellement dans l'espace. La thermosphère est la région où près des pôles se forment les aurores boréales et australes. La pression y devient presque nulle et les molécules d'air sont très rares. La partie inférieure de la thermosphère est appelée l'ionosphère. L'ionosphère réfléchit les ondes courtes (ondes radio). Ces ondes, émises par un émetteur, rebondissent sur l'ionosphère et sont renvoyées vers la Terre. Si elles sont retournées avec un certain angle, elles peuvent faire presque le tour du globe. L'ionosphère permet donc de communiquer avec des régions très éloignées.

- La séparation entre la mésosphère et la thermosphère s'appelle la mésopause.

- La séparation entre la troposphère et la stratosphère porte le nom de Tropopause.

1-2- Mécanisme de circulation atmosphérique des polluants

Tout composé organique ou minéral, même s'il est solide, peut théoriquement passer dans l'air. Direct dans le cas des gaz, ce passage s'effectue sous forme d'aérosols pour les liquides à faible tension de vapeur et à l'état de fines particules dans le cas des solides non sublimables.

Certains des contaminants ainsi introduits par l'Homme dans l'atmosphère en sont des constituants naturels. L'anhydride sulfureux (SO_2), le gaz carbonique, les oxydes d'Azote, ou même le Mercure produits par l'homme s'ajoutent aux quantités normalement présentes dans l'air. Celles-ci proviennent des divers processus biogéochimiques donc des phénomènes naturels comme le volcanisme. D'autres substances polluantes : radionucléides, pesticides, PCB, agents plastifiants, etc., sont exclusivement d'origine technologique.

La connaissance des lois générales de circulation des masses d'air dans la troposphère (10-50km) et dans la stratosphère (> 50 km) est essentielle pour comprendre les mécanismes par lesquels s'effectue la contamination de la biosphère. Ces lois ont été précisées au cours de diverses investigations menées depuis quelques décennies à l'aide d'aéronefs, de ballons-sondes de hautes performances et plus récemment grâce aux divers satellites météorologiques.

Les mouvements atmosphériques jouent un rôle fondamental dans la dispersion des polluants et leur répartition dans les divers biotopes. Ce sont les courants ascendants et les vents qui les dispersent en altitude et en latitude et assure leur circulation :

1-2-1- Les mouvements horizontaux

Le sens et la vitesse des courants stratosphériques et troposphériques sont aujourd'hui connus avec précision. Ainsi a-t-on pu montrer l'existence d'un vent dominant d'ouest qui souffle au niveau de la tropopause, dans l'hémisphère Nord. Sa vitesse, de 35 m/s en moyenne, permet un transit circumterrestre de toute substance injectée à ce niveau en 12 jours ! Cela explique la célérité (rapidité) avec laquelle les particules émises par une éruption volcanique ou par une explosion nucléaire se dispersent dans l'ensemble de l'atmosphère planétaire.

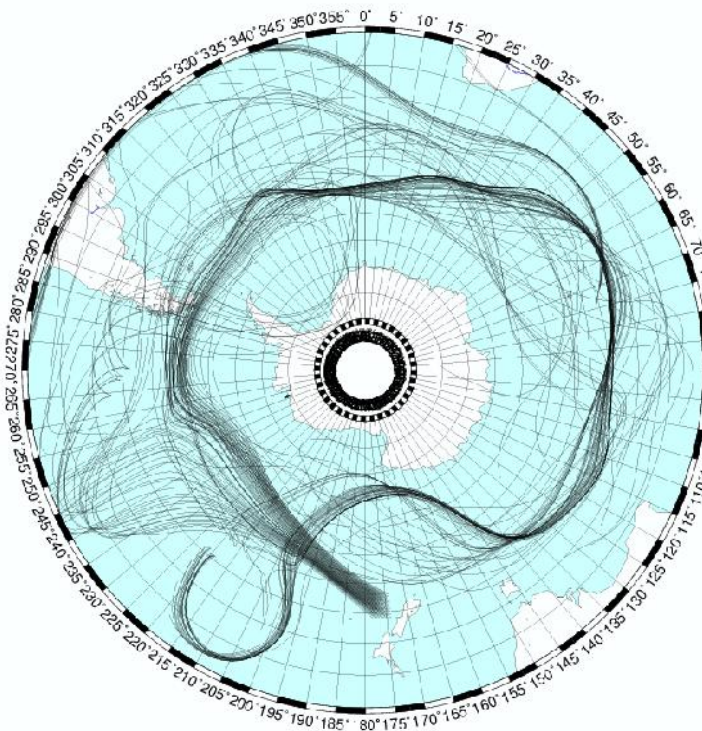


Figure 04. Trajectoire de particules atmosphériques durant 10 jours.

1-2-2- Les mouvements verticaux

A ces courants horizontaux se combinent des mouvements verticaux des masses d'air qui permettent une circulation atmosphérique du nord vers le sud. La combinaison des vents ouest-est avec une dérive ascensionnelle au niveau des basses latitudes engendre un type de circulation atmosphérique dénommé cellule de Hadley.

Celui-ci permet l'échange des masses d'air entre les deux hémisphères au niveau de la troposphère des régions équatoriales.

Cette cellule est un rouleau qui transporte de l'énergie depuis les régions excédentaires (zone convective du centre de l'Afrique) vers les régions déficitaires des deux hémisphères. En Juillet, c'est l'hémisphère Sud qui est le plus déficitaire en énergie, si bien que la cellule de Hadley y est la plus intense. En janvier, c'est dans l'hémisphère Nord que la cellule de Hadley est importante. Le voile de cirrus sur l'Afrique du Nord atteint parfois l'Égypte.

Ces cirrus ne dépassent pas le nord de l'Afrique car la subsidence induite par la branche descendante de la cellule de Hadley provoque un réchauffement de la masse d'air dont la pression de vapeur saturante augmente. En altitude, on observe un courant allant vers le Nord qui est dévié vers l'Est par la force de Coriolis comme le montre la figure suivante (fig.05).

THE HADLEY CELL

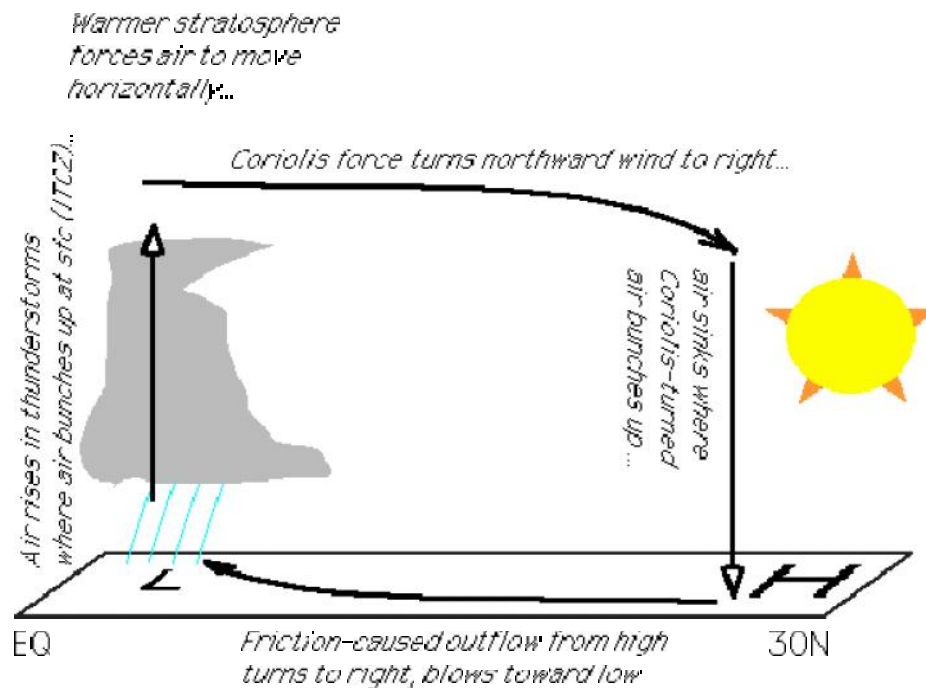


Figure 05. [Cellule de Hadley.](#)

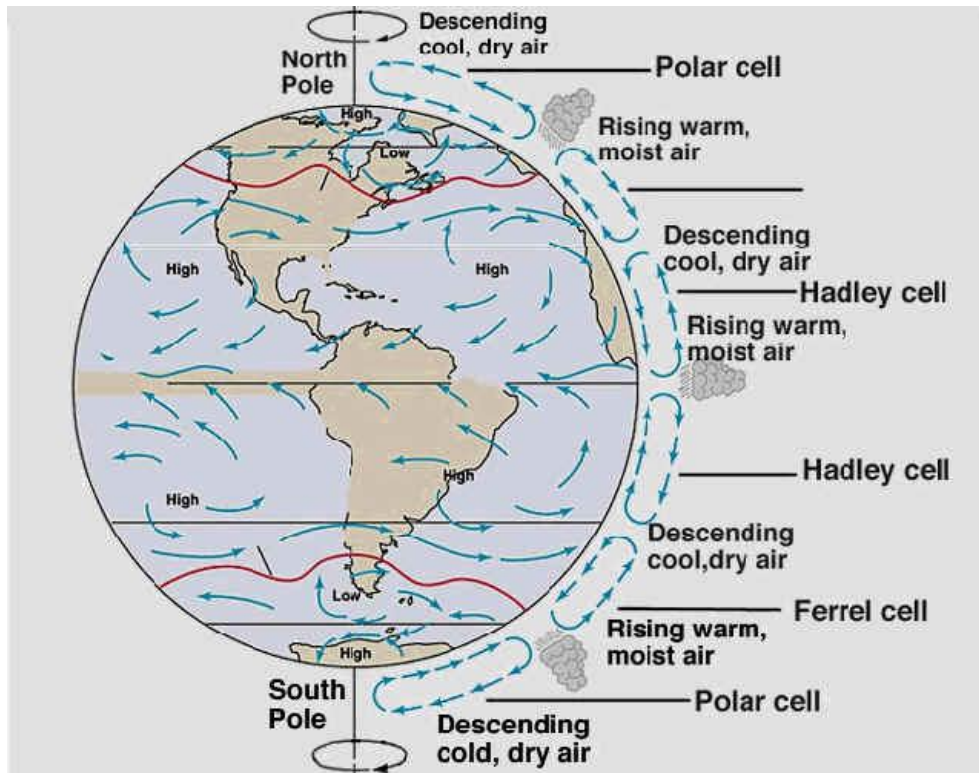


Figure 06 : les courants des mouvements horizontaux et verticaux de la circulation atmosphérique

Entre l'équateur et les régions polaires viennent se placer en contact avec les cellules de Hadley d'autres cellules, dites de Ferrel, qui assurent le transfert des masses d'air polaires vers les tropiques et des masses d'air tropicales vers les pôles (fig.06). Les déplacements verticaux des masses d'air interviennent aussi de façon déterminante dans la circulation et la dispersion des polluants. L'existence de cumulo-nimbus, ces énormes nuages d'orage, qui peuvent s'élever jusqu' à 16 km d'altitude sous les tropiques, atteste de l'importance de ces mouvements ascensionnels, dont la vitesse dépasse parfois 30 m/s.

1-4-3- Le transport à distance des polluants dans l'atmosphère

Les distances auxquelles les polluants introduits dans l'atmosphère vont être transportés dépendent de plusieurs paramètres, en particulier de l'intensité de l'émission, de son altitude d'injection, de la taille des particules (pour les contaminants solides et les aérosols), enfin, de la stabilité chimique de la substance considérée. On peut distinguer trois catégories de transport atmosphérique des polluants, qui correspondent à une circulation à l'échelle locale, moyenne ou globale.

2- Dispersion des polluants dans l'atmosphère

Les concentrations dans l'air des polluants primaires sont maximales à proximité des sources d'émission, puis tendent à diminuer au fur et à mesure que l'on s'éloigne de celles-ci du fait de leur dilution dans l'air.

Les distances parcourues par les polluants introduits dans l'atmosphère dépendent de plusieurs paramètres et en particulier de l'intensité de l'émission, de son altitude d'injection (hauteur des cheminées), de la taille des particules (pour les produits solides et les aérosols) et de la stabilité chimique de la substance considérée.

Les polluants se dispersent d'autant plus qu'ils sont rejetés à grande hauteur et verticalement et que leur température est élevée. Le vent et la pluie permettent également une bonne dispersion de la pollution atmosphérique. Le vent peut cependant être à l'origine d'un phénomène appelé **la retombée de panache** qui se produit par vent établi, modéré ou fort en toutes saisons. **L'inversion de température** constitue à son tour un autre phénomène contribuant à une augmentation de la pollution au niveau du sol.

2.1. La pression :

Les situations dépressionnaires (basses pressions) correspondent généralement à une turbulence de l'air assez forte et donc de bonnes conditions de dispersion. En revanche, des situations anticycloniques (hautes pressions) où la stabilité de l'air ne favorise pas la dispersion des polluants entraînent des épisodes de pollution.

Les mouvements des masses d'air s'effectuent initialement des zones de haute pression (anticyclones) vers les zones de basse pression (dépressions).

2.2. Le vent :

Le vent est un facteur essentiel expliquant la dispersion des émissions polluantes. Le vent intervient tant par sa **direction** pour orienter les panaches de fumées que par sa **vitesse** pour **diluer et entraîner les émissions**.

La dispersion des polluants augmente avec la vitesse et la turbulence du vent. Un vent faible favorise donc l'accumulation des polluants. La vitesse du vent augmentant généralement avec l'altitude, au fur et à mesure que les polluants s'élèvent, leur dispersion est facilitée.

- En **été**, un vent fort permet la dispersion de l'ozone, ce qui améliore la qualité de l'air.
- Par contre en **hiver**, un vent fort peut provoquer un apport d'ozone « naturel ». Lors de vent faible, dont la direction est souvent variable, les **polluants stagnent** ce qui engendre une stabilisation voire une dégradation de la qualité de l'air par cumul.

2.3. La turbulence atmosphérique :

Ce sont les mouvements à petite échelle qui vont brasser la masse d'air et permettent la dilution des polluants. L'atmosphère est constamment animée de mouvements qui se traduisent par des variations plus ou moins rapides de la vitesse et de la direction du vent. Ces mouvements ont plusieurs origines : convection thermique, présence de reliefs, etc.... Les mouvements à petite échelle brassent les masses d'air et permettent la dilution des polluants. Les mouvements à plus grande échelle vont en assurer le transport. Plus la turbulence est importante, meilleure est la dispersion atmosphérique. Les situations dépressionnaires (basses pressions) correspondent généralement à une turbulence de l'air assez forte et à de bonnes conditions de dispersion. En revanche, des situations anticycloniques (hautes pressions) favorisent les situations de pollution.

2.4. Influence de l'humidité :

L'humidité influence la **transformation des polluants primaires** émis, sous l'action de l'humidité :

- de l'acide sulfurique (H_2SO_4) se forme à partir du dioxyde de soufre (SO_2)
- de l'acide nitrique (HNO_3) se forme à partir des oxydes d'azote (NO_x).

2.5. Influence des précipitations

Les précipitations sont généralement associées à une **atmosphère instable**, qui permet également une **bonne dispersion** de la pollution atmosphérique.

Par ailleurs, elles entraînent au sol les polluants les plus lourds.

Elles peuvent parfois accélérer la dissolution de certains polluants. Mais, globalement, les **concentrations en polluants dans l'atmosphère diminuent nettement** par temps de pluie notamment pour les poussières et les éléments solubles tel que le dioxyde de soufre (SO_2).

Par ailleurs, la **topographie** ainsi que l'urbanisation jouent également un rôle dans le déplacement des masses d'air.

2.6. L'ensoleillement et la température :

L'ensoleillement provoque un réchauffement des sols et des surfaces. L'ensoleillement agit sur la chimie des polluants : l'énergie solaire (notamment les ultra-violets) peut "casser" certaines molécules dans l'air et ceci favorise la formation photochimique de l'ozone dans la troposphère.

La température agit également sur la chimie et les émissions des polluants : le froid diminue la volatilité de certains gaz et augmente les rejets automobiles et des bâtiments, tandis que la chaleur estivale entraîne la formation photochimique de l'ozone et l'évaporation des composés organiques volatils.

- En été, une augmentation de température (2 à 4°C) augmente la formation d'ozone.
- En hiver, une diminution de température (2 à 4°C) peut provoquer la formation d'une couche d'inversion, notamment par temps clair, et dégrader la qualité de l'air par accumulation des polluants primaires

2.7. La structure thermique de l'atmosphère

2.7.1. Stabilité et instabilité de l'atmosphère

La stabilité ou l'instabilité de l'atmosphère est un facteur principal de la dispersion atmosphérique.

- Une atmosphère est stable si une particule d'air, écartée de sa position d'équilibre, a tendance à y revenir ; instable dans le cas contraire. Si on élève une particule d'air d'une certaine altitude, elle va subir une chute de pression et donc une chute de température. Si la particule d'air que l'on vient de soulever est plus froide que le milieu environnant, elle sera plus lourde et donc redescendra à son niveau de départ. L'atmosphère est alors stable.
- L'atmosphère est instable lorsque la particule d'air subissant cette élévation est plus chaude et plus légère que le milieu environnant. Elle a donc tendance à continuer son ascension.

La stabilité va donc dépendre de la vitesse de croissance de la température avec l'altitude. Selon que l'air est saturé en vapeur d'eau ou non, les valeurs limites fixant la stabilité ou l'instabilité d'une atmosphère sont donc :

Air non saturé : Décroissance plus rapide que $-1^\circ/100$ mètres = instabilité

Décroissance moins rapide que $-1^\circ/100$ mètres = stabilité

Air saturé : Décroissance plus rapide que $-0.65^\circ/100$ mètres = instabilité

Décroissance moins rapide que $-0.65^\circ/100$ mètres = stabilité

Selon que l'atmosphère sera stable ou instable, la dilution des polluants sera faible ou importante :

- **Atmosphère instable** : Dans de telles situations, la dispersion des polluants est facilitée. Ces situations apparaissent par fort réchauffement du sol. Elles se retrouvent principalement le jour en absence de vent fort.
- **Atmosphère neutre** : Ces situations permettent la dispersion des polluants. Elles correspondent aux situations de vents modérés ou à des situations de ciel couvert. Il s'agit de la situation la plus fréquente en zone tempérée.
- **Atmosphère stable** : De telles situations freinent le déplacement des masses d'air. Elles sont induites par des inversions thermiques près du sol, ce qui limite la dispersion des polluants. Ces situations se retrouvent principalement la nuit par vent faible.

2.7.2 Inversion thermique ou diabétique thermique

La structure thermique verticale de la troposphère peut varier suivant les jours et les heures. En moyenne, la température décroît avec l'altitude ($0,65^\circ\text{C}$ par 100m, sous nos latitudes). L'air chaud contenant les polluants au niveau du sol se disperse verticalement.

- En situation normale de diffusion, la température diminue avec l'altitude. La structure thermique de l'atmosphère ne freine pas la diffusion des polluants (fig. 07).

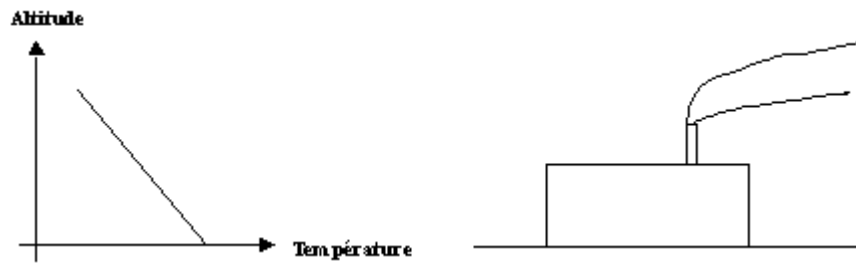


Figure 07 - En situation normale de diffusion

- Parfois, à partir d'une certaine hauteur, la température peut augmenter avec l'altitude. Il y a alors inversion thermique : une couche d'air chaud se trouve au-dessus d'une couche d'air plus froid. L'air pollué, qui se disperse vers le haut en situation normale de diffusion, est alors bloqué par cette couche d'air plus chaud qui agit comme un couvercle thermique (fig. 08).

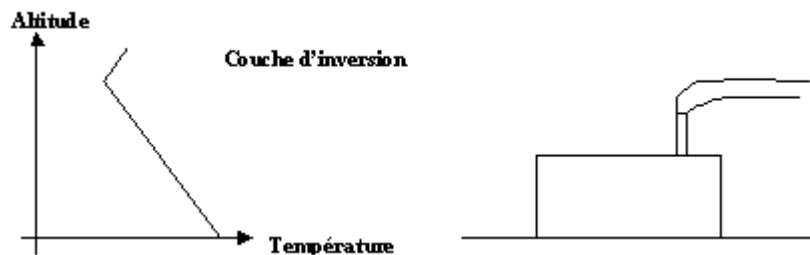


Figure 08- phénomène d'inversion thermique

- Ce phénomène contribue à la pollution locale et peut conduire à la formation de dôme urbain de pollution.

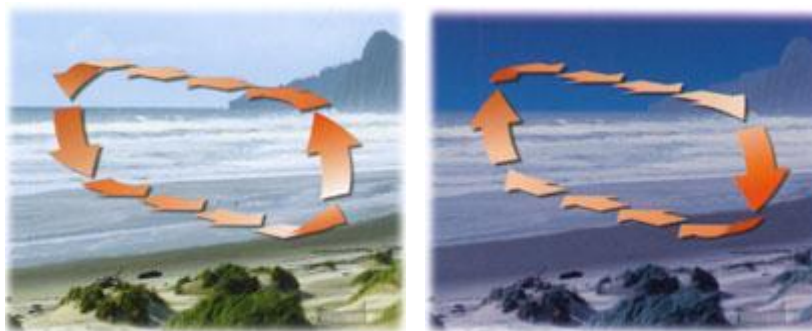
Il se rencontre lors de conditions météorologiques particulières :

- En début de matinée, à la suite d'une nuit dégagée et sans vent,
- En hiver, lors de conditions anticycloniques

2.8. La topographie locale

La topographie d'un site peut influencer la circulation des masses d'air. Par exemple, les rues gorges, les bords de mer et les vallées peuvent modifier la dispersion des polluants.

- Le littoral** : la nuit, les masses d'air ne se déplacent pas dans le même sens que de jour. En effet, durant la journée la brise de mer ramène les polluants sur les côtes. Mais de nuit, ce phénomène s'inverse car le sol se refroidit plus vite que la mer. La pollution est alors envoyée sur la mer (fig.09).

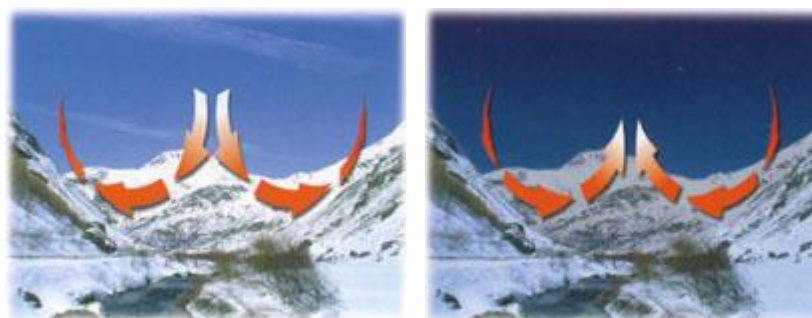


Le jour : brise de mer

La nuit : brise de terre

Figure 09- phénomène de brises côtières

- **Les vallées** : les masses d'air ne se déplacent pas dans le même sens de jour et de nuit. En effet, le jour l'air s'échauffe sur les pentes et crée un courant qui remonte la vallée. Les polluants se dispersent rapidement. Mais de nuit, ce phénomène s'inverse : l'air froid s'écoule le long des pentes et s'accumule au fond de la vallée, tout en la descendant. La pollution évacuée dans la journée est alors ramenée dans la vallée la nuit (fig.10).



Le jour: brise montante

La nuit: brise descendante

Figure 10 - phénomène de brises de vallée

3. Transformation des polluants

Les polluants primaires libérés dans l'atmosphère peuvent être soit transformés en une autre forme chimique, soit éliminés ou demeurer dans l'atmosphère, contribuant ainsi au phénomène général d'accumulation. Le cas de la transformation d'un ou plusieurs polluants primaires en une autre forme chimique conduit à la formation de polluants secondaires. C'est le cas de **la pollution photochimique** liée à l'ozone.

Ce polluant secondaire néfaste pour la santé, aussi appelé "mauvais ozone" doit être distingué de l'ozone stratosphérique, située à 25 km d'altitude environ et qui exerce un effet bénéfique en tant que filtre des rayonnements solaires énergétiques ultraviolets.

Les régions les plus sensibles à la pollution photochimique sont à la fois les zones urbaines et périurbaines en raison des émissions dues aux automobiles et à l'industrie, ainsi que les zones fortement ensoleillées, méridionales ou d'altitude.

L'ensemble des paramètres relatifs à la source d'émission du polluant (hauteur de rejet, débit, température...), météorologiques, climatologiques (rayonnement solaire, température, turbulence, vitesse et direction du vent...) et les paramètres topographiques, jouent un rôle prépondérant dans le transport et la transformation chimique des polluants.

Les paramètres climatiques et météorologiques varient fortement en fonction de la saison, ceci explique certaines fluctuations des concentrations saisonnières de polluants primaires (dioxyde de soufre) et secondaires (ozone, SO₃, H₂SO₄, HNO₃, nitrates, nitrate de peroxy acétyl...).

4. Le temps de séjour des polluants dans l'atmosphère

Le temps de séjour des polluants dans l'atmosphère, dépend de sa capacité à se déposer sous forme sèche sur sol, sur les végétaux, ou constructions) ou humide (lessivage ou dissolution) ou à se transformer chimiquement.

Les chlorofluorocarbures, du fait de leur très grande stabilité chimique, ont une durée de vie très élevée, et suffisante pour leur permettre d'atteindre la stratosphère dans laquelle ils sont décomposés sous l'action du rayonnement ultra violet en libérant des atomes d'halogènes actifs lesquels réagissent avec l'ozone (trou dans la couche d'ozone stratosphérique). Ainsi, par suite de la lenteur des migrations verticales dans la stratosphère, les particules introduites à ces altitudes peuvent y séjourner des années.

La durée moyenne pendant laquelle les particules insédimentables demeurent dans l'atmosphère est de deux ans. Celle-ci n'est que de quatre mois au niveau de la tropopause, de 30 jours dans la haute troposphère et seulement de 6 à 10 jours dans les couches les plus basses de l'atmosphère (3 Km d'altitude et au-dessous).

Tableau 05 : Durée de vie indicative de certaines substances polluantes dans l'atmosphère

Substance	Polluants
CH ₄	Année
CO	Mois
SO ₂	Jours à mois
Ozone	Quelque jours
COVNM	Heures à jours
Aérosols 1-10µm	Minutes à jours
Aérosols ≤ 1µm	Jours à semaines

COVNM (Composé Organiques Volatils Non Méthaniques).

suit

5. Passage des polluants de l'atmosphère dans l'eau et les sols

Il s'agit de dépôt de particules atmosphériques et de la diffusion vers le sol et les eaux ; une fois dans l'atmosphère, les polluants vont être adsorbés/ désorbés sur les poussières atmosphériques, dissous dans les gouttes d'eau des nuages et transportés par le vent et les nuages. Au cours de ces transferts, les produits subissent des transformations moléculaires par photo-oxydation ou hydrolyse, réactions de dégradation ou au contraire, formation d'entités chimiquement réactives.

Soumis à la gravitation, les granules de diverses dimensions de poussières sont soit maintenues en suspension par agitation thermique, soit soumis aux courants aériens et déplacés, soit précipités par les cocondensations, les brouillards et des nuage. La précipitation provoque leur chute directement dans les océans ou sur les terres émergées. Dans cette dernière éventualité, les phénomènes des lessivages des sols par les eaux continentales amèneront - tout au moins pour une partie d'entre elles - en milieu marin où les courants achèveront de les dispersés dans l'ensemble de l'hydrosphère.

6. Transfert dans le sol

Lorsque des contaminants se déposent sur un sol, ils se dissolvent partiellement et progressivement dans l'eau de pluie qui les transporte verticalement à travers le sol, puis le sous-sol, lors de son processus d'infiltration. Après avoir traversé la **zone non saturée** (figure 1), ces **éléments** ou ces composés chimiques peuvent ainsi parvenir jusqu'à la nappe d'eau souterraine, à plusieurs mètres ou plusieurs dizaines de mètres sous la surface du sol. Là, ces différentes substances se trouvent une nouvelle fois diluées puis transportées sub-horizontalement selon l'écoulement général des eaux souterraines dans la nappe. Celle-ci a pour exutoires naturels les rivières, quand elle n'est pas prélevée à l'aide de puits ou forages pour des usages d'alimentation en eau potable, domestique, agricole ou industrielle.

7. Transfert des polluants dans la biomasse

Toute substance qui contamine le milieu naturel peut être incorporée par être vivants, grâce aux multiples processus métaboliques. Elle va de la sorte pénétrer dans les réseaux trophiques des écosystèmes, s'intégrer au cycle de la matière dans les biocénoses et exercer une action néfaste sur d'innombrables espèces végétales et animales.

Le transfert dans les plantes s'effectue soit à partir du sol par absorption racinaire ou par diffusion gazeuse. Soit par le dépôt des particules atmosphériques d'origine locale ou lointaine. Dans le cas des polluants organiques, l'absorption racinaire est un processus passif, dépendant de la polarité des molécules (...), la contamination des parties aériennes des végétaux par voie gazeuse est une voie qui ne doit pas être négligée, surtout dans le cas des polluants organiques hydrophobes tels que les HAP.

Dans la chaîne trophique, les niveaux supérieurs peuvent avoir plusieurs sources d'alimentation et donc de contamination ; par exemple l'homme (omnivore), en plus d'un contact avec les milieux (air, sol, eau) peut être exposé aux toxiques par consommation d'aliments végétaux et animaux (généralement herbivores).

Le phénomène de transfert et d'amplification biologique de la pollution à l'intérieur des biocénoses contaminées est dénommé Bio-amplification ou encore Biomagnification. Il n'y a véritablement bio-concentration que si : BFC (facteur de bio-concentration) > 1.

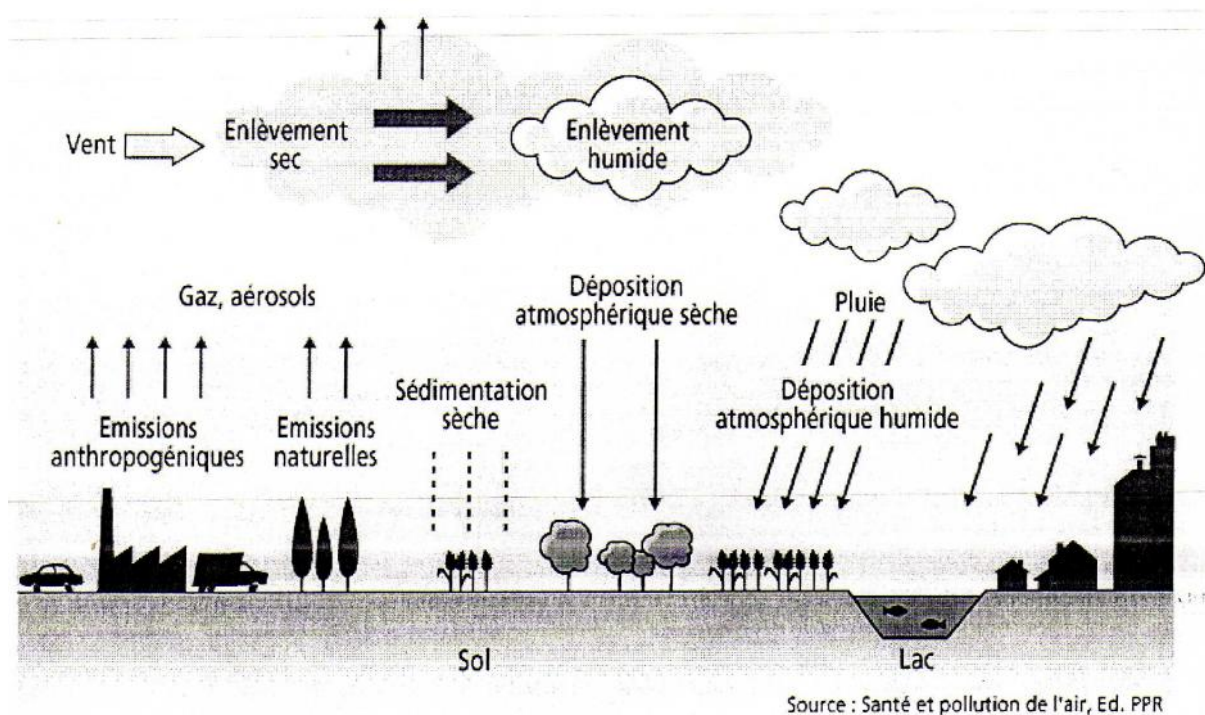


Figure 11 : processus de dépôt de polluants

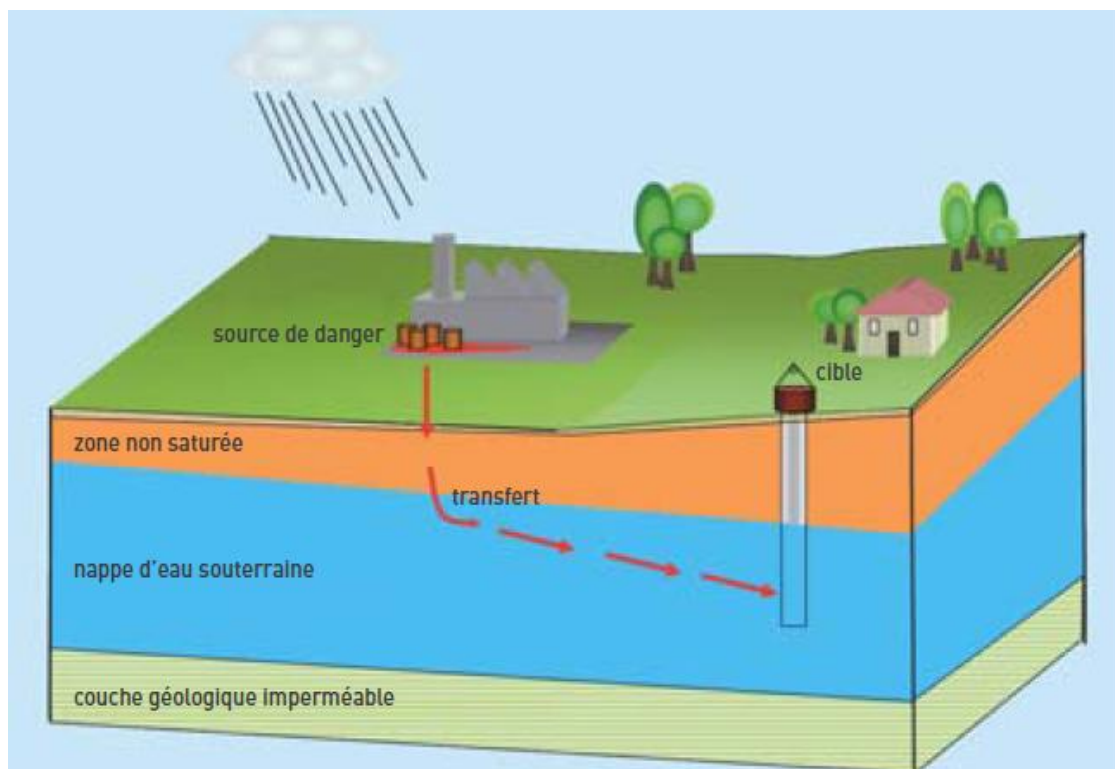


Figure 12: Schéma conceptuel des transferts Hydrogéologiques dans l'environnement résultant de la contamination d'un sol (modifié d'après Marjorie Miltenberger).

8. Le devenir des polluants dans l'écosystème

Alors que le nombre de pollutions générées par l'homme est en constante augmentation, il est intéressant de se pencher sur le devenir de ces polluants.

Les organismes animaux et végétaux absorbent, accumulent et concentrent un grand nombre de polluants. Trois voies d'absorptions sont à considérer:

- L'absorption trophique (ou alimentaire) consiste en l'absorption de polluants liquides ou solides. Elle se fait par voie digestive dans le cas des animaux, racinaire ou foliaire pour les végétaux.
- L'absorption par voie tégumentaire (ou cutanée)
- L'absorption par voie pulmonaire (ou respiratoire) à cause des polluants gazeux comme les aérosols ou les gaz.

Une fois que le polluant est absorbé par l'organisme, chez l'homme par exemple, il va passer dans le sang et se diriger vers les organes cibles - que sont le foie, les reins et le cerveau – où il va être par la suite biodégradé ou éliminé, bioaccumulé ou transformé par voie enzymatique. Parfois cette dégradation enzymatique rend le polluant toxique alors qu'il ne l'était pas au départ, c'est le phénomène de bioactivation. C'est le cas du DDT qui n'est pas toxique, alors que son produit de dégradation, le DDE, est toxique.

Nous citons dans ce qui suit quelques notions expliquant le devenir des polluants:

8-1- La biodisponibilité: La biodisponibilité est la forme sous laquelle la substance se présente dans le milieu et sa concentration. La toxicité est généralement corrélée avec la biodisponibilité, et est évaluée en termes d'effets nuisibles sur l'organisme (arrêt de la croissance, maladies,...).

8-2- L'exposition: L'exposition concerne les individus qui sont directement exposés à une substance toxique. Elle prend son sens dans le cas de pollution environnementale. Des valeurs réglementaires à ne pas dépasser sont fixées par les autorités.

8-3- La contamination: La contamination est l'introduction d'une substance physique, chimique ou biologique sans entraîner nécessairement un effet nocif. Elle se définit comme le passage d'une substance toxique dans l'organisme lors d'une exposition au polluant.

8-4- La biodegradation: La biodegradation est la dégradation des substances par les organismes qui peuvent assimiler les matières organiques et les transformer en matière vivante ou minérale.

Des bactéries de l'eau ou du sol vont jouer un rôle actif dans la décomposition. Ces substances capables d'être dégradées sont appelées substances biodégradables.

Il existe dans la nature une série de polluants non dégradables, comme les composés organophosphorés ou encore la majorité des matières plastiques. Ces substances contaminent l'ensemble des communautés animales et végétales.

8-5- La bioconcentration: La bioconcentration correspond à l'accumulation d'une substance chimique dans un organisme à partir du milieu environnant. Elle comprend plusieurs étapes : l'absorption de la substance chimique, la répartition interne au sein de l'organisme, la modification par le métabolisme et l'élimination.

L'organisme peut concentrer plusieurs dizaines de milliers de fois la concentration du milieu extérieur. C'est le cas par exemple des vers de terre qui absorbent plusieurs fois leur poids en détrit. C'est ce qu'exprime le facteur de bioconcentration.

$$FCB = C_{\text{organisme}} / C_{\text{eau}}$$

ou

$$F_c = [\text{PCB}]_{\text{organisme}} / [\text{PCB}]_{\text{eau ou sol}}$$

8-6- La bioaccumulation: La bioaccumulation désigne le processus par lequel les organismes vivants concentrent et extraient à la fois directement et indirectement à partir de leur milieu et à partir de leur nourriture.

8-7- La bioamplification: La bioamplification fait référence à l'accumulation progressive tout au long de la chaîne alimentaire d'un polluant. La concentration interne d'un polluant sera beaucoup plus importante chez un consommateur secondaire que chez un producteur primaire.

8-8- L'intoxication: L'intoxication est l'atteinte d'un organisme par une substance dite toxique ayant un effet sur l'organisme en entier ou sur un ou plusieurs organes de l'organisme.

Elle se manifeste lors d'une contamination exogène (comme les aliments, le tabac, les produits domestiques), lors de manifestations biologiques, lors d'une intoxication massive, et lors de contamination chronique (par exemple les canards qui se ingèrent du plomb provenant de la pêche et de la chasse lorsqu'ils se nourrissent). Les signes d'une intoxication sont neurologiques, d'hépatotoxicité, de néphrotoxicités et d'hématotoxicité.

8-9- La toxicité: Une substance n'est pas toujours toxique dans un organisme. C'est le cas du mercure qui n'est toxique que sous sa forme réduite (ou méthylée), une forme extrêmement toxique pour les vertébrés supérieurs.

On peut distinguer trois formes de toxicité :

- La *toxicité aiguë* correspond à la manifestation la plus spectaculaire de nocivité d'un produit. On peut considérer dans ce cas comme toxique toute substance entraînant la mort de façon violente et rapide d'un individu ou d'une population. Cette toxicité est définie comme celle qui provoque la mort en une ou plusieurs fois, suite à une exposition très importante. Exemple: monoxyde de carbone, cyanure.
- La *toxicité subaiguë*, à la différence de la toxicité aiguë, bien que tous les individus aient montré les mêmes signes cliniques, seulement une proportion significative de la population survit à la contamination.
- La *toxicité chronique* (ou à long terme). Elle correspond à des effets toxiques qui entraînent des troubles graves irréversibles par une exposition répétée à des concentrations très faibles. Il y a accumulation des résidus de produits dans l'organisme.