

## **1 Définition de la pollution atmosphérique**

On entend par pollution de l'atmosphère, l'émission dans l'atmosphère, de gaz, des fumées ou de particules solides ou liquides, corrosifs, toxiques ou odorantes de nature à incommoder la population, à compromettre la santé ou la sécurité publique ou à nuire aux végétations, la production agricole et aux produits agro-alimentaires, à la conservation des constructions et monuments ou au caractère des sites.

## **2 Sources de pollution atmosphériques**

### **2.1 Les sources naturelles**

L'atmosphère renferme, à côté des éléments de base, une quantité variable de substances naturelles provenant de sources très diverses qui, dépassant un seuil, crée une source de pollution :

Les feux des forêts, des cultures ou des prairies contribuent à des émissions importantes de noyaux de condensation, d'imbrûlés et de gaz.

Les volcans émettent des gaz comme le dioxyde de soufre et de l'hydrogène sulfureux, et des particules des cendres en grande quantité, dont les nuages peuvent parcourir des distances considérables.

Les embruns marins sont constitués par des aérosols renferment des cristaux de sels qui peuvent entraîner à une pollution.

Les végétaux sont à leur tour à l'origine d'une pollution par les pollens, les spores et les champignons.

L'homme et les animaux rejettent des quantités importantes de dioxyde de carbone et sont à l'origine d'une pollution microbienne.

L'ozone est formé naturellement à haute altitude à partir de réaction photochimique impliquant l'oxygène de l'air, ainsi une fois transporté dans les zones rurales par le vent, l'ozone se forme en grande quantité lorsque l'insolation est très élevée.

### **2.2 Les sources dues aux activités industrielles**

De nombreux types d'installations industrielles émettent cependant également des polluants dans l'atmosphère, constituent généralement un problème local à l'échelle d'une région ou d'un quartier, et planétaire à grande échelle.

### **2.2.1 Les installations fixes de combustions**

Parmi ces installations, nous pouvons citer les centrales thermiques, les foyers de combustions de l'industrie et les usines d'incinérations des ordures ménagères.

### **2.2.2 Les installations industrielles**

Très diverses, citons la sidérurgie comme la poussière métallique, la pétrochimie, le stockage des produits pétroliers, la métallurgie de l'aluminium, les industries des dérivés azotés, et les cimenteries.

### **2.2.3 Les sources automobiles**

Le trafic automobile occupe sans conteste une place déterminante. Les prestations de circulation ont en effet subi une croissance très marquée au cours des dernières décennies. Les principaux polluants sont le monoxyde de carbone ( $CO$ ), les oxydes d'azote ( $NO_x$ ), les composés organiques volatiles ( $COV$ ), le dioxyde de soufre ( $SO_2$ ).

## **3 Facteurs intervenant dans le transport et la diffusion de polluants**

### **3.1 Facteurs météorologiques**

Nous dénombrons trois facteurs prédominants : le vent, le gradient vertical de température et la turbulence. Nous allons voir successivement leurs influences.

#### **3.1.1 Le vent**

Il résulte du déplacement des masses d'air et dilue continuellement la pollution libérée au point d'émission. Une absence de vent contribuera donc à l'accumulation des polluants près des sources. Sa vitesse augmente généralement avec l'altitude.

#### **3.1.2 Le gradient vertical de température**

Les mouvements des masses d'air sont dus aux différences de densité entre elles. Le gradient de température conditionne ainsi le mouvement ascendant ou descendant d'une couche ou l'absence de celui-ci. La température de l'air diminue généralement avec l'altitude de  $1^\circ C$  tous les  $100 m$ .

Le gradient vertical de température est également utilisé pour définir la stabilité de l'atmosphère.

Si la température décroît trop rapidement, l'atmosphère est instable, ce qui favorise la dispersion des polluants. Une inversion thermique conduira au contraire à de forts niveaux de pollution. Cette inversion peut se produire la nuit quand le sol refroidit rapidement ainsi que l'hiver par temps clair. L'absence de vent en général favorise l'apparition d'une inversion thermique.

### **3.1.3 La turbulence**

La turbulence est l'irrégularité du mouvement du vent. Elle est caractérisée par le croisement des trajectoires des masses d'air et par la superposition d'une fluctuation irrégulière, aléatoire et non reproductible de l'écoulement moyen du vent. Ce facteur est très difficile à traiter mathématiquement. La diffusion tourbillonnaire est le processus de mélange le plus important dans les basses couches de la troposphère. Il provoque la dispersion des polluants dans l'air.

Nous pouvons distinguer deux types de turbulence : la turbulence mécanique (*tourbillons créés par la différence de vitesse des masses d'air, ou par le mouvement de l'air qui entre en contact avec des objets*), et la turbulence thermique (*tourbillons créés par la différence de température des masses d'air*).

## **3.2 Facteurs physiques**

Il s'agit d'obstacles (*relief, bâtiments...*) qui modifient le régime des vents. La direction des vents sera déviée autour des obstacles. Le vent pourra suivre des trajectoires préférentielles (*Vallée...*). La vitesse sera elle aussi modifiée (*plus élevée au sommet des ondulations du terrain et plus faible au fond de celles-ci*).

## **4 Les différentes échelles de la pollution atmosphérique**

Nous pouvons scinder la pollution atmosphérique en trois catégories :

### **4.1 Pollution de proximité et à l'échelle locale**

Elle concerne les sources d'émission de gaz ou d'autres substances indésirables le plus souvent produites en milieu urbain (*industries, chauffage, trafic...*). Elle affecte en premier lieu la santé des populations par son action directe à court terme mais exerce aussi une toxicité à plus long terme pour certaines pathologies. Elle peut également procurer une gêne olfactive importante et participer à la dégradation du patrimoine bâti (*corrosion, salissure*).

## 4.2 Pollution à l'échelle régionale

Elle concerne les zones situées à quelques dizaines de kilomètres (*voire des centaines de kilomètres*) des sources d'émission de pollution. Elle regroupe souvent sous ce terme les deux phénomènes de pollution que sont :

Les pluies acides qui participent au dépérissement des forêts et des lacs. Elles désignent les phénomènes de retombées au sol de dépôts acides, secs et humides, qui touchent des zones étendues et éloignées des sources en raison des transformations physico-chimiques et des conditions climatiques (*HCl, H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> issu des émissions de SO<sub>2</sub>, HNO<sub>3</sub> liées à celles des NO<sub>x</sub>*).

La pollution photochimique qui désigne les mécanismes conduisant à la rupture naturelle de formation et de destruction de l'ozone troposphérique (*à basse altitude*) et à l'augmentation de sa concentration dans l'air.

## 4.3 Pollution planétaire

Qui concerne les deux problèmes identifiés :

La diminution (*trou*) de la couche d'ozone stratosphérique due essentiellement à l'action des composés halogénés (*chlore, brome, iode*) libérés par les activités humaines, et la réduction du pouvoir filtrant de la couche d'ozone a des conséquences néfastes sur la santé (*cancers de la peau*).

L'augmentation de l'effet de serre qui constitue un processus naturel à la vie terrestre car sans ce phénomène, la température de l'air serait inférieure de 30°C à la valeur moyenne actuelle qui est de 15°C sur notre planète. Cependant, son augmentation liée à la production excessive de certains gaz (*CO, CO<sub>2</sub>, COV*) entraînera de graves changements climatiques (*élévation de la température du globe et modifications climatiques lourdes de conséquences pour la vie terrestre*).

## 5 Polluants atmosphériques

Trop de n'importe quelle substance au mauvais endroit ou au mauvais moment est un polluant. Plus spécifiquement, la pollution atmosphérique peut être définie comme 'la présence de substances dans l'atmosphère, résultant des activités synthétiques ou des processus naturels, entraînant des effets nuisibles pour l'homme et pour l'environnement'. La pollution atmosphérique est un terme employé pour décrire tous les

produits chimiques non désiré ou d'autres matériaux qui contaminent l'air que nous respirons ayant pour résultat la dégradation de la qualité de l'air.

## 5.1 Monoxyde de carbone

Le monoxyde de carbone ( $CO$ ) est un gaz sans couleur, inodore, toxique produit lorsque des carburants contenant du carbone sont brûlés où il y a trop peu d'oxygène. Il se forme également en raison de la brûlure des carburants à une température trop élevée. Il brûle dans l'air ou avec de l'oxygène avec une flamme bleue, et est légèrement plus léger que l'air.

En présence d'un approvisionnement adéquat en ( $O_2$ ), la plupart du monoxyde de carbone produit pendant la combustion est immédiatement oxydée en dioxyde de carbone ( $CO_2$ ). Cependant, ce n'est pas le cas dans l'étincelle du moteur d'allumage dans les automobiles, particulièrement au ralenti et dans les conditions de décélération. Ainsi, la source principale du monoxyde de carbone dans l'atmosphère est le transport routier. De plus petites contributions viennent des processus impliquant la combustion de la matière organique, par exemple dans les centrales électriques et l'incinération des ordures.

### ❖ Emetteurs

- Les transports.
- Les chauffages collectifs et individuels.
- Les industries.
- Plus généralement la combustion incomplète de composés contenant du carbone.

### ❖ Effet sur la santé

A fortes doses, il est un toxique cardio-respiratoire souvent mortel.

A faibles doses, il diminue la capacité d'oxygénation du cerveau, du cœur et des muscles. Sa nocivité est particulièrement importante chez les insuffisants coronariens et les fœtus.

### ❖ Effet sur l'environnement

Le  $CO$ , au même titre que les  $NO_x$  et  $COV$ , intervient en tant que précurseur dans le processus de formation de la pollution photochimique, notamment de l'ozone troposphérique.

## 5.2 Dioxyde d'azote

L'oxyde nitrique ( $NO$ ) est un gaz inodore et sans couleur qui est produit pendant la brûlure à hautes températures du carburant à l'intérieur, par exemple, des voitures et d'autres véhicules routiers, radiateurs et cuisinières. Une fois qu'il est mélangé à de l'air, il se combine rapidement avec de l'oxygène, formant du dioxyde d'azote ( $NO_2$ ). La plupart du dioxyde d'azote dans l'atmosphère est formé de l'oxydation de l'oxyde nitrique ( $NO$ ) de cette façon, bien qu'une partie soit émise directement de la source. Il est également présent dans la fumée de tabac. C'est un gaz d'un brun rougeâtre, ininflammable, avec une odeur discernable. Dans des concentrations importantes, il est fortement toxique, endommageant sérieusement les poumons avec un effet retardé. Le dioxyde d'azote est un oxydant fort qui réagit dans le ciel pour former de l'acide nitrique corrosif, ainsi que des nitrates organiques toxiques. Il joue également un rôle important dans les réactions atmosphériques qui produisent de l'ozone ou le smog au niveau du sol.

### ❖ Emetteurs

- Les industries.
- Les chauffages collectifs et individuels.
- Les transports routiers (*véhicules environ 70 % des émissions*).
- Plus généralement, toute combustion vive.

### ❖ Effet sur la santé

Gaz irritant pouvant pénétrer profondément dans les poumons. Il altère l'activité respiratoire et augmente les crises chez les asthmatiques.

Chez les plus jeunes, il favorise des infections microbiennes des bronches. Les effets de ce polluant ne sont pas tous identifiés. Il est un bon indicateur de la pollution automobile.

### ❖ Effet sur l'environnement

Les  $NO_x$  interviennent dans le processus de formation de l'ozone dans la basse atmosphère. Ils contribuent également au phénomène des pluies acides.

Les dépôts azotés issus des émissions d'oxydes d'azote peuvent aggraver les problèmes nutritionnels des peuplements de végétaux sensibles.

Les  $NO_x$ , en présence de divers autres constituants et de rayonnement solaire énergétique ultraviolet, constituent, en tant que précurseurs, une source importante de pollution photochimique et, notamment, d'ozone troposphérique.

### 5.3 L'ozone

L'ozone ( $O_3$ ) est la forme triatomique de l'oxygène moléculaire ( $O_2$ ). C'est un gaz toxique bleuâtre et instable, avec une odeur piquante, trouvé naturellement dans l'atmosphère, en particulier dans la stratosphère, 19 à 30 kilomètres au-dessus de la surface de la Terre où il forme la couche d'ozone. À ces altitudes, l'ozone filtre les rayons ultraviolets (UV) entrant dans l'atmosphère. Cependant, près du niveau du sol, il peut altérer la fonction des poumons et peut causer des irritations de l'appareil respiratoire. Les asthmatiques sont connus pour adopter ces symptômes plus facilement. Les dommages irréversibles au tissu de la région respiratoire et des poumons peuvent se produire si l'ozone est présent en quantité suffisamment élevée. L'ozone au niveau du sol est formé indirectement par l'action de la lumière du soleil sur les composés organiques volatils en présence du dioxyde d'azote, et c'est pourquoi il s'agit d'un polluant secondaire. Il n'y a aucune émission synthétique directe de l'ozone à l'atmosphère. Environ 10 à 15% de l'ozone au niveau du sol est transporté vers la stratosphère. Étant donné que les concentrations en ozone sont particulièrement dépendantes de la lumière du soleil, les épisodes sont toujours susceptibles de se développer après des périodes soutenues de chaleur et un temps calme. Une fois formé, l'ozone est nettoyé par l'oxyde nitrique (NO), habituellement présent dans des zones urbaines, à cause des vapeurs du trafic, mais moins dans la campagne. Par conséquent, l'ozone se produit habituellement dans des concentrations plus élevées en été plutôt qu'en hiver, et dans des zones rurales plutôt que des zones urbaines. Les niveaux de l'ozone à travers l'Europe sont généralement moins de 15 ppb mais peuvent être aussi élevés que 60 ppb. Pendant des épisodes photochimiques de smog, les niveaux peuvent monter à plus de 100 ppb.

### 5.4 Les particules en suspension

Les particules en suspension sont un mélange complexe des substances organiques et inorganiques, présentes dans l'atmosphère en tant que liquides et solides. Les particules brutes peuvent être considérées comme celles avec un diamètre plus grand que 2,5  $\mu m$ , et les fines particules plus petites que 2,5  $\mu m$ . Les grosses particules contiennent habituellement des matériaux provenant de la croûte terrestre et de la poussière des véhicules routiers et des industries. Les particules fines contiennent les aérosols secondairement formés, les particules de combustion et les vapeurs organiques et métalliques décondensées. Le composant acide des particules en suspension dans l'air se présente souvent en tant que fines particules. Une autre distinction qui peut être faite est de classer les particules en suspension en tant que primaires ou secondaires, selon leur origine. Les particules en suspension primaires sont celles émises directement dans l'atmosphère, tandis que les particules en suspension secondaires sont celles constituées

par des réactions impliquant d'autres polluants. Dans l'environnement urbain, la plupart des particules secondaires se produisent lorsque les sulfates et les nitrates ont formé, pendant des réactions impliquant le dioxyde de soufre, les oxydes d'azotes.

❖ **Emetteurs**

- Les volcans.
- Les industries.
- Les usines d'incinération.
- Les chauffages collectifs et individuels.
- Les transports routiers.
- Les activités de bricolage.

❖ **Effet sur la santé**

Les plus grosses sont retenues par les voies aériennes supérieures. Les plus dangereuses sont les plus fines, car elles peuvent pénétrer profondément dans les poumons et transporter des composés toxiques.

Elles augmentent le risque d'infections respiratoires aiguës chez l'enfant et renforcent des sensibilités allergiques ou des pathologies préexistantes.

Une grande partie de cette pollution vient des transports. Les émissions des moteurs diesels sont particulièrement riches en particules de petites tailles. De plus, certaines particules en suspension contiennent des hydrocarbures aromatiques polycycliques (*HAP*) aux propriétés mutagènes et cancérogènes.

❖ **Effet sur l'environnement**

Les particules en suspension sont à l'origine de salissure sur les bâtiments.

D'autre part, elles ont une influence sur la formation des nuages, des brouillards et des précipitations.

Elles tendent à réduire la visibilité.

Chez les végétaux, elles peuvent provoquer une réduction de la croissance et des nécroses.

## **5.5 Le dioxyde de soufre**

Le dioxyde de soufre ( $SO_2$ ) est un gaz sans couleur et ininflammable avec une odeur pénétrante qui irrite les yeux et les voies respiratoires. Il réagit sur la surface d'une

---



variété de particules en suspension solides, il est soluble dans l'eau et peut être oxydé dans les gouttelettes d'eau portées par le vent.

Les sources les plus communes de dioxyde de soufre incluent la combustion des combustibles fossiles, la fonte, la fabrication d'acide sulfurique, la conversion de la pulpe de bois en papier, l'incinération des ordures et la production du soufre élémentaire. Le charbon brûlant est la plus grande source synthétique de dioxyde de soufre représentant environ 50% des émissions globales annuelles, avec la brûlure de pétrole représentant 25-30% en plus. Les volcans sont la source naturelle la plus commune de dioxyde de soufre.

❖ **Emetteurs**

- Les industries.
- Les chauffages collectifs et individuels.
- Les transports (*dans une moindre mesure*).

❖ **Effet sur la santé**

Gaz irritant pouvant entraîner des crises chez les asthmatiques, augmenter les symptômes respiratoires aigus chez l'adulte et l'enfant : gêne respiratoire, accès de toux ou crises d'asthme.

❖ **Effet sur l'environnement**

En présence d'humidité, il forme de l'acide sulfurique qui contribue au phénomène des pluies acides et à la dégradation de la pierre et des matériaux de certaines constructions.

La formation des dépôts acides (*pluies acides*) peut avoir des effets néfastes sur la végétation et changer les caractéristiques des sols. Lorsque ces sols sont déjà très pauvres, ils entraînent des pertes importantes de cations aggravant ainsi les difficultés d'alimentation en magnésium et en calcium des végétaux.

Des particules charbonneuses ou alumine-silicatées ayant absorbé du  $SO_2$  peuvent se déposer sur les pierres. L'acide sulfurique formé en présence d'eau réagit avec le calcium contenu dans les particules et donne naissance à des cristaux de gypse qui par leur action mécanique et chimique participent la dégradation des monuments.

## 5.6 Le plomb

Il est principalement émis par le trafic automobile, d'où l'interdiction de l'essence plombée dans certains pays. Autres sources de plomb ; la fabrication de batteries électriques, la fabrication de certains verres (*cristal*), ... etc.

### ❖ Effet sur la santé

Le plomb est à l'origine de perturbations neurologiques, hématologiques et rénales. Le saturnisme est une pathologie ancienne dont les symptômes sont bien corrélés au taux de plomb dans le sang. Les taux mesurés dans une population urbaine sont inférieurs à *200 ug/l* chez l'homme, *150 ug/l* chez la femme. Chez l'enfant, à partir de *100 ug/l*, et peut-être en dessous, une altération du développement intellectuel est à craindre (*mesurable par le Quotient Intellectuel*). Elle est démontrée au-delà de *250 ug/l*.

## 5.7 Autres polluants

### 5.7.1 (CH<sub>4</sub>) Méthane

Il participe directement au phénomène d'accroissement de l'effet de serre. Les principales sources émettrices sont : l'exploitation des mines de charbon, les décharges d'ordures ménagères, l'élevage, la distribution du gaz ... etc.

### 5.7.2 (N<sub>2</sub>O) Protoxyde d'azote

Il participe au phénomène de l'accroissement de l'effet de serre avec le *CO<sub>2</sub>*, le *CH<sub>4</sub>*, ... etc. Le *N<sub>2</sub>O* est émis lors de la combustion des combustibles fossiles, par quelques procédés industriels, par les véhicules automobiles et par les sols (*surtout ceux cultivés avec des engrais azotés*). Les océans et les sols naturels contribuent aussi aux émissions.

### 5.7.3 (CFC) Chlorofluorocarbures

Ils sont totalement artificiels (*à l'exception du chlorure de méthyle d'origine marine*). Les émissions de CFC provenaient de l'utilisation de ces produits dans les biens de consommation courante (*aérosols propulseurs, mousses, extincteurs, réfrigérants, etc.*). A la suite d'accords internationaux, la production de ces substances, qui participent à diminution de la couche d'ozone, est désormais très fortement réduite voire interdite pour la plupart.

#### **5.7.4 (HFC) Hydrofluorocarbures**

Synthétisés exclusivement par voie chimique, ces composés sont aujourd'hui utilisés comme agent de propulsion des aérosols, comme fluides réfrigérants, solvants, agents d'expansion des mousses, etc.

#### **5.7.5 (PFC) Per fluorocarbures**

Synthétisés exclusivement par voie chimique, les *PFC* sont largement utilisés lors des étapes de production des semi-conducteurs.

#### **5.7.6 (SF<sub>6</sub>) Hexafluorure de soufre**

Synthétisés exclusivement par voie chimique le *SF<sub>6</sub>* est utilisé dans un grand nombre d'applications techniques. Le *SF<sub>6</sub>* participe à l'effet de serre.

#### **5.7.7 (HF) Acide fluorhydrique**

Le fluor est surtout émis au cours de la première fusion de l'aluminium. Du fait que le fluor est présent dans de nombreux minéraux, les utilisateurs de ces minéraux sont donc des émetteurs potentiels. Les plus connus sont les briqueteries, les fabriques de fibre de verre, d'émaux, les aciéries, la sidérurgie, etc. qui épurent généralement leurs gaz avant rejet à l'atmosphère.

#### **5.7.8 (H<sub>2</sub>S) Hydrogène sulfure**

Très connu pour son odeur et pour sa toxicité très supérieure à *SO<sub>2</sub>*, (*le seuil de perception olfactive de H<sub>2</sub>S est de 0,1 ppm*), le *H<sub>2</sub>S* est surtout produit par les usines de production de pâte à papier et par les unités des raffineries de pétrole.

#### **5.7.9 Métaux lourds**

Il existe différentes sources de métaux lourds qui contaminent l'atmosphère :

- **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.

- **Le cadmium (Cd)**

Pour sa part est émis par la production de zinc et l'incinération de déchets essentiellement.

- **Le chrome (Cr)**

Provient essentiellement de la production de verre, de ciment, de la métallurgie des ferreux et des fonderies.

- **Le cuivre (Cu)**

Provient majoritairement de l'usure des caténaires induites par le trafic ferroviaire. Le traitement des déchets et la combustion constituent à des degrés divers les principales sources émettrices de cuivre.

- **Le mercure (Hg)**

Est émis en quantité faible, mais toujours trop importante, par la combustion du charbon, du pétrole, la production de chlore, mais aussi par l'incinération de déchets ménagers, hospitaliers et industriels.

- **Le nickel (Ni)**

Est émis essentiellement par la combustion du fuel lourd qui contient de traces de ce métal.

- **Le Sélénium (Se)**

Provient essentiellement de la production de verre. L'utilisation du fuel lourd contribue également aux émissions du fait des traces de ce métal qu'il contient.

- **Le Zinc (Zn)**

Provient de la combustion du charbon et du fuel lourd mais aussi de certains procédés industriels appartenant à la métallurgie des ferreux et non ferreux ainsi qu'à l'incinération des déchets.

## 6 Les différents modes de transfert de la chaleur

Il est habituel, dans l'étude de transfert thermique de distinguer trois grandes parties se rattachant chacune à un mode de transfert de la chaleur particulier : conduction , rayonnement et convection, chacun de ces modes étant lui-même lié à un processus physique bien déterminé. En effet, comme l'énergie thermique d'un milieu matériel correspond à l'énergie cinétique de ses constituants fondamentaux ayant une certaine liberté de mouvement (*molécules, atomes, électrons libres,...*), ceux-ci pourront échanger

tout ou partie de leur énergie thermique, c'est -à-dire gagné ou perdre de l'énergie cinétique :

Soit par interaction directe avec les particules voisines choc des molécules par exemple, ce qui correspond à la conduction.

Soit par absorption ou émission des radiations électromagnétiques, ce qui correspond au rayonnement.

Enfin dans le cas d'un gaz ou d'un liquide, on considère également, mais cette fois à l'échelle macroscopique, comme un mode de transfert de chaleur appelé convection, les échanges résultant du mélange des diverse parties d'un fluide à des températures différentes.

## 6.1 La conduction

La conduction est un transfert de chaleur qui se produit à l'échelle des atomes ou des molécules. C'est un transfert par contact direct entre les molécules, dès qu'il existe un gradient de température.

La conduction thermique correspond à l'échauffement ou la propagation de la chaleur dans un corps, sans déplacement de matière. Elle est causée par oscillations des molécules, proportionnellement aux différences de température et au coefficient caractérisant la conductivité du corps. La quantité de chaleur ou le flux  $Q$  traversant le corps, se déplace du point le plus chaud au point le plus froid.

Dans le cas de la conduction dans un barreau (*Figure I.1*), le flux de chaleur  $Q$  entre deux sections de surface  $S$  et de longueur  $L$  est donné par la loi de *Fourier* :

$$Q = k \frac{S}{L} (T_1 - T_2) \quad (\text{I. 1})$$

Avec  $T_1 > T_2$  et :

$Q$  : le flux de chaleur dissipé à travers la surface  $S$ . ( $W$  ou  $J.s^{-1}$ ).

$K$  : Coefficient de conductivité thermique exprimée en  $J. (s.m.K)^{-1}$ .

$S$  : Surface de la section traversée ( $m^2$ ).

Le flux thermique  $dQ$  traversant une surface élémentaire  $ds$  est appelé densité de flux de chaleur  $q$  :

$$\frac{dQ}{ds} = q \quad \text{ou} \quad dQ = \bar{q} \cdot \vec{n} \cdot ds \quad (\text{I. 2})$$

$\vec{n}$  Vecteur normal à la surface élémentaire  $ds$ .

Cette densité de flux obéit à la loi de *Fourier* :

$$\mathbf{q} = -\mathbf{K} \cdot \text{grad} T$$

Avec  $\mathbf{K}$  : conductivité thermique du matériau exprimé en  $W. (m. ^\circ C)^{-1}$ .

## 6.2 Le rayonnement

Que ce soit de façon spontanée ou au cours d'interaction mutuelles, les atomes, molécules et électrons libres des corps peuvent perdre une partie de leur énergie cinétique par émission d'un rayonnement électromagnétique. Réciproquement, lorsqu'un tel rayonnement est reçu à la surface d'un corps, une partie est absorbée par le corps et se retrouve dans l'énergie cinétique de ses composants, c'est-à-dire sous forme de chaleur.

Le rayonnement est la seule transmission d'énergie sans aucun support matériel.

Tous les corps matériels émettent un rayonnement de nature électromagnétique.

Dans le cas des transferts thermiques, le rayonnement consiste à un échange de chaleur entre deux parois séparées par un milieu transparent. Pour deux plans parallèles, ce flux peut se mettre sous la forme :

$$Q = \varepsilon_{12} \sigma_s S (T_1^4 - T_2^4) \quad (\text{I. 3})$$

Avec  $\varepsilon_{12}$  l'émissivité équivalente de l'ensemble *paroi-1* et *paroi-2*, et  $\sigma_s$  la constante de *Stefan*.

## 6.3 La convection

La convection est un mode de transfert de chaleur qui est le mécanisme le plus important de transfert d'énergie entre une surface solide et un fluide. La caractéristique essentielle du transfert de chaleur par convection est le transport de l'énergie par mouvement moléculaire, ce que l'on appelle par "*diffusion* " ; et par mouvement macroscopique du fluide, ce que l'on appelle par "*advection* ".

La puissance thermique transmise entre la surface de la paroi et le fluide s'écrit de la façon suivante :

$$Q = hS(T_p - T_\infty) \quad (\text{I. 4})$$

Lorsqu'un solide est en contact physique avec un fluide, de températures différentes, le transfert de chaleur du corps le plus chaud au corps le plus froid s'effectue par convection.

Celle-ci est présentée par exemple entre un composant et son environnement, l'air ambiant se déplaçant par rapport à la surface du composant. La convection ne se réalise pas dans le vide. Ce phénomène s'explique de la façon suivante : Le fluide est en contact avec un solide de température différente. Les parties du fluide en contact avec le corps solide s'échauffent par conductibilité (*dans la région de l'interface*). Les variations de densité qui en résultent provoquent des courants au sein du fluide, animés de mouvements circulaires. Ces courants transportent la chaleur dans tout le fluide et ne s'arrêtent que lorsque tout le fluide est à la même température que le solide.

L'importance des courants de convection dépend de la forme géométrique des solides en contact avec le fluide. Il existe trois types de convections, la première est la convection libre ou naturelle, tandis que la seconde est la convection forcée. Cette dernière intervient si le mouvement du flux est produit volontairement et extérieurement (*dans le cas de ventilation, par exemple*), la troisième est la convection mixte si les deux précédentes existent simultanément, sans que l'une soit négligeable par rapport à l'autre.

### **6.3.1 Convection naturelle (*libre*)**

La convection naturelle est un phénomène de la mécanique des fluides, qui se produit lorsqu'un gradient induit un mouvement dans le fluide. Le gradient peut être de différente nature, telle la température ou la concentration d'un soluté.

La masse volumique est en générale fonction de la température et un gradient de température implique une différence de masse volumique au sein du fluide. Cette différence de masse volumique implique une différence de la Poussée d'Archimède et donc crée un mouvement. De tels déplacements s'appellent des mouvements de convection. Ils sont à l'origine de certains phénomènes océanographiques (*courants marins*), météorologiques (*orages*), géologiques (*remontées de magma*) par exemple. La convection thermique n'est pas le seul moyen de créer des mouvements verticaux dans des fluides. Ceux-ci vont se stratifier selon leur densité, à température uniforme, par l'effet de la gravité. Cette convection gravitationnelle se déroule comme la convection thermique avec les zones du fluide plus dense descendant et les parties moins denses poussées vers le haut

### 6.3.1.1 Démarrage de la convection

Le transfert thermique dans une couche de fluide horizontale s'effectue par la conduction thermique et le mouvement du fluide. Quand on commence à imposer un gradient thermique entre les surfaces de la couche, un gradient de la masse volumique s'installe. Expérimentalement, on observe qu'au bout d'un certain temps, le fluide se met en mouvement spontanément : c'est le démarrage de la convection. Celui-ci est contrôlé par un nombre sans dimension appelé nombre de *Rayleigh* :

$$Ra = \frac{\text{poussée d'Archimède}}{\text{dissipation}} = \frac{\rho \cdot g \cdot \beta \cdot \Delta T \cdot L^3}{\alpha \cdot \mu} \quad (\text{I. 5})$$

Avec :

$\rho$  la masse volumique.

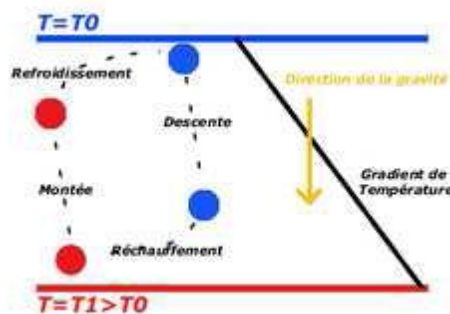
$g$  la force de gravité.

$\beta$  le coefficient d'expansion thermique.

$\Delta T$  la différence de température entre le haut et le bas de la couche.

$\alpha$  la diffusivité thermique et  $\mu$  la viscosité dynamique caractéristique (*à noter : ces valeurs peuvent être variables dans le fluide et il est important de vérifier que l'on utilise bien des grandeurs caractéristiques*).

### 6.3.1.2 La convection de Rayleigh-Bénard



**Figure I.1** : Description du cycle convectif naturel



### 6.3.2 La convection forcée

La convection forcée est provoquée par une circulation artificielle (*pompe, turbine*) d'un fluide. Le transfert est plus rapide que dans le cas de convection naturelle.

Voici quelques exemples de convection forcée dans des appareillages : chauffage central avec accélérateur, chauffages électriques avec soufflerie, chauffe-eau solaire et four à convection de cuisinière. Le corps humain a son propre système de convection forcée, la circulation sanguine.

Dans un environnement à microgravité comme dans l'espace, la convection naturelle n'est pas possible puisque la poussée d'Archimède s'exerce par la différence de force gravitationnelle sur des volumes de densités différentes. Ainsi la circulation de la chaleur doit être forcée dans une capsule spatiale. Une flamme aurait également de la difficulté à exister car les gaz de combustion resteraient près de la flamme, la coupant de l'apport d'oxygène. Il faut pour l'entretenir une circulation forcée pour éloigner ces gaz et amener l'oxygène.

### 6.3.3 La convection mixte

Il existe une cause externe au mouvement du fluide mais insuffisante pour que la poussée d'Archimède puisse être négligée (*frontière entre la convection libre et la convection forcée*).

C'est le cas des transferts de chaleur dans un habitacle d'automobile : l'air est soufflé dans l'habitacle par un ventilateur, mais la poussée d'Archimède n'est pas négligeable, surtout lorsqu'on se place loin des entrées d'air.

## 7 Les type d'écoulement

Compte tenu du lien entre le transfert de masse et le transfert de chaleur, il est nécessaire de prendre en compte le régime d'écoulement. Considérons à titre d'exemple l'écoulement d'un fluide dans une conduite.

### 7.1 Régime laminaire

Un écoulement est dit laminaire lorsqu'il est régulier (*qu'il ne présente pas trop de variations spatiales ou temporelles*), bien souvent stationnaire. Il s'agit en fait d'une solution stable des équations de *Navier-Stokes*, au sens où si on modifie l'écoulement, il retourne vers la solution laminaire.

La viscosité stabilise et régularise les écoulements de façon générale. Un fluide (*Les fluides sont des milieux parfaitement déformables. On regroupe sous cette appellation les gaz qui sont l'exemple des fluides compressibles, et les liquides, qui sont des fluides peu compressibles. Dans certaines conditions...*) présentant une viscosité importante s'écoulera de façon laminaire. Un écoulement est caractérisé par son nombre de Reynolds (*Le nombre de Reynolds ( $Re$ ) est un nombre sans dimension utilisé en mécanique des fluides. Il a été mis en évidence en 1883 par Osborne Reynolds. Il caractérise un...*), qui permet de se faire une idée de sa stabilité : quand ce nombre (*Un nombre est un concept caractérisant une unité, une collection d'unités ou une fraction d'unité*) est petit, l'écoulement est laminaire, quand il est grand, l'écoulement est en général instable et turbulent.

- ❖ Régime Laminaire :  **$Re < 2000$**
- ❖ Régime Transitoire :  **$Re = 2000$**
- ❖ Régime Turbulent :  **$Re > 2000$**

## 7.2 Régime turbulent

Une fois que le régime laminaire devient instable (*régime transitoire*) les particules liquides ne suivent plus des lignes droites et parallèles, les tourbillons commencent à se former d'une manière aléatoire en taille et en direction ; c'est la naissance de la turbulence, des fluctuations de vitesse  $u'$  apparaissent autour de la vitesse moyenne  $\bar{u}$ . En prenant en considération un seul tourbillon.