



Université Internationale
de Casablanca
LAUREATE INTERNATIONAL UNIVERSITIES

Cours d'Environnement & Ecologie

Pollution de l'air

El Mansouri Bouabid

**Semestre d'Automne, Année
Universitaire 2018-2019**





Plan du cours

- **Quelques généralités sur la structure et la composition de l'atmosphère**
- **Polluant, Santé et Qualité de l'Air: identification et normes**
- **La pollution au Maroc le cas spécifique de Casablanca-Mohammedia**
- **Pollution de l'Air, pollution trans-frontière et Climat**
- **Vers une atmosphère « durable »**

I-

Quelques généralités sur la structure et la composition de l'atmosphère

Définition de polluant:

Le polluant a pour définition la plus souvent retenue [1] : un altéragène biologique, physique ou chimique, qui au delà d'un certain seuil, et parfois dans certaines conditions (potentialisation), développe des impacts négatifs sur tout ou partie d'un écosystème ou de l'Environnement en général.

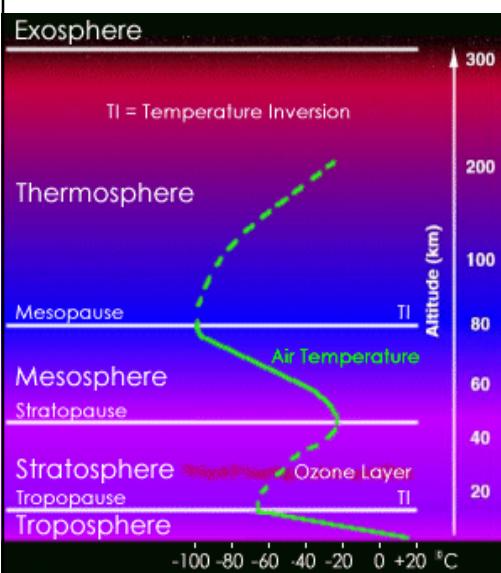
Ceci revient à définir, le polluant comme un contaminant d'un ou plusieurs compartiments des écosystèmes (air, eau, sol) et/ou d'un organisme (qui peut être l'Homme) ou ayant une incidence sur l'écosystème, au delà d'un seuil ou norme.

Source: Wikipidia

Structure Verticale de l'Atmosphère



Structure Verticale de l'Atmosphère

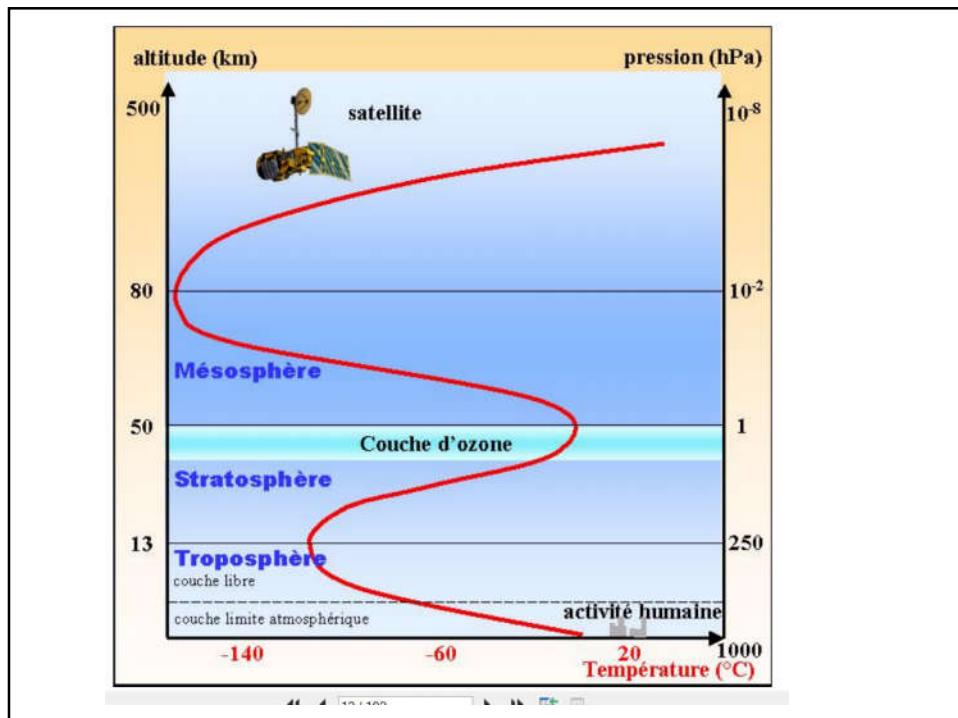


La pression atmosphérique correspond au poids exercé par une colonne d'air sur une surface donnée. Elle est mesurée en météorologie en hectopascal (hPa) sachant que $1 \text{ hPa} = 100 \text{ Pa} (100 \text{ Pascal})$.

$$\text{Pression Atmosphérique } P(z) = P(0) \cdot \exp(-kdz)$$

$$k = 1/8.5 \text{ km}^{-1}$$

La pression diminue d'un facteur 2.78 tous les 8.5 km

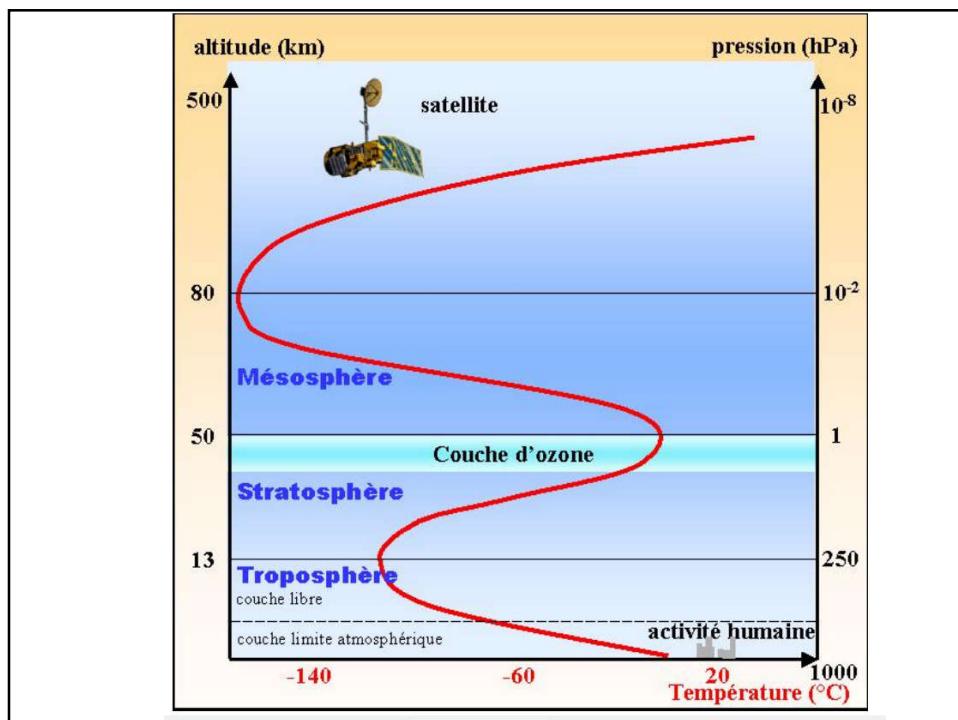


L'atmosphère terrestre

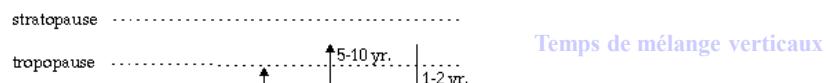
Il est composé de différentes couches superposées. Depuis le sol, on distingue notamment la troposphère, la stratosphère, la mésosphère, suivie de la thermosphère. On divise les basses couches atmosphériques (altitude inférieure à **10 km**) en deux parties distinctes:

- **la couche libre**, la partie supérieure de la troposphère. Le vent y est déterminé par de grands mouvements d'ensemble à l'échelle de la planète et est appelé vent géostrophique. Il résulte de l'équilibre entre les forces de gradient de pression et la force de Coriolis due à la rotation de la Terre ;

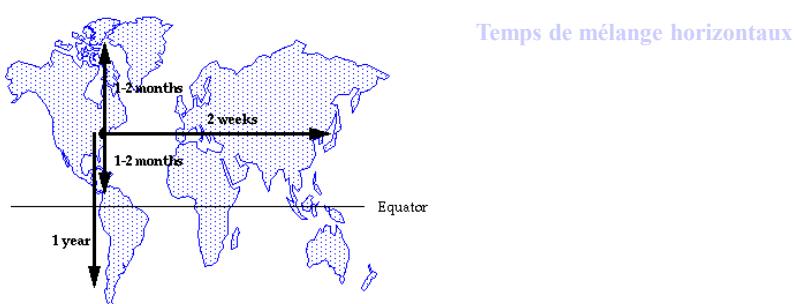
- **la Couche Limite Atmosphérique (CLA)**, la partie proche de la surface terrestre. Le sol y perturbe l'écoulement de l'air et donne naissance à une forte agitation appelée turbulence. La variation diurne du rayonnement solaire y est directement perceptible d'un point de vue thermique.



Temps de mélange caractéristiques dans l'atmosphère



Temps de mélange verticaux

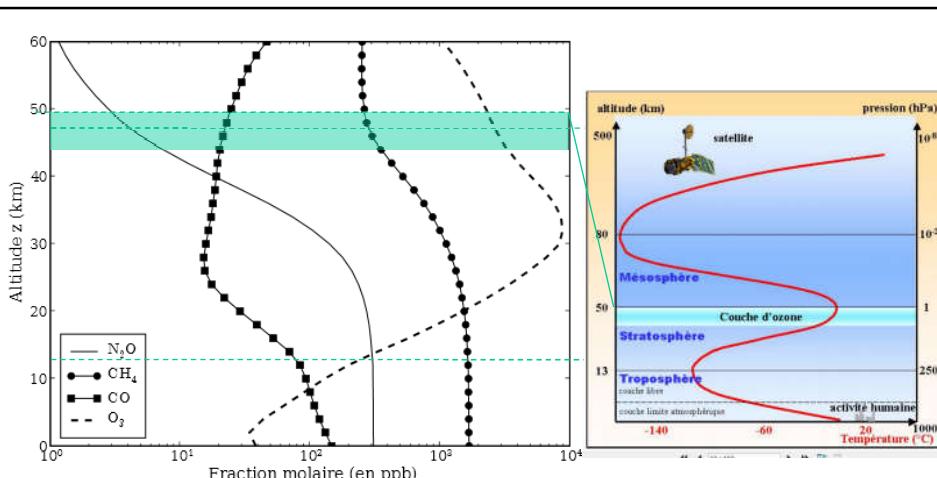


Temps de mélange horizontaux

Composition chimique de l'Atmosphère

Composition moyenne de l'Atmosphère (0 → 100 km env.)			
Gaz	ppmv*	ppmw*	masse (10 ²⁰ g)
• Azote	780,900	755,100	38.648
• Oxygène	209,500	231,500	11.841
• Argon	9,300	12,800	0.655
• Carbon dioxyde	300	460	0.0233
• Néon	18	12.5	0.000636
• Hélium	5.2	0.72	0.000037
• Méthane	1.5	0.94	0.000043
• Krypton	1.0	2.9	0.000146
• Oxide nitreux	0.5	0.8	0.000040
• Hydrogène	0.5	0.035	0.000002
• Ozone**	0.4	0.7	0.000035
• Xenon	0.08	0.36	0.000018
• Vapeur d'eau **			
• Etc ...			
• *ppm = parts per million. **Variable avec l'altitude.			

Gaz traces



Profil vertical de quelques espèces

Certains polluants relèvent-ils de la qualité de l'Air et d'autres du Climat

Développer svp

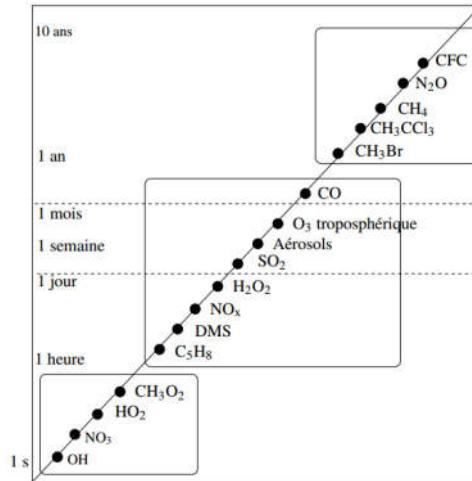


FIG.: Temps de résidence des principales espèces atmosphériques.

Différents Polluants mesurés pour l'Indice de Qualité de l'Air

- Pollution photochimique : O₃, NO_x, SO₂, CO,
- Polluants particulaires PM10,
- Métaux lourds,
- Polluants Organiques Persistants (POP),
- Benzène, Toluène, Xylène (BTX)

POP: Molécules complexes qui, contrairement aux autres polluants ne sont pas définies en fonction de leur nature chimique mais à partir de quatre propriétés qui sont :

- La toxicité (elles ont un ou plusieurs impacts prouvés sur la santé humaine),
- La persistance dans l'environnement (molécules résistantes aux dégradations biologiques naturelles),
- La bioaccumulation dans les tissus vivants et augmentation des concentrations le long de la chaîne alimentaire (bioamplification),
- Le transport longue distance.

II-

Pollution atmosphérique, Santé et Qualité de l'Air

Polluants	Origines	Pollutions générées	Effets sur la santé
Dioxyde de soufre (SO ₂)	<p>Il provient essentiellement de la combustion de combustibles fossiles contenant du soufre : fioul, charbon. Comme tenu du développement du nucléaire, de l'utilisation de combustibles moins chargés en soufre et des systèmes de dépollution des cheminées d'évacuation des fumées, des économies d'énergie, les concentrations ambiantes ont diminué de plus de 50 % depuis 15 ans.</p>	<p>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.</p>	<p>C'est un gaz irritant. Le mélange acido-particulaire peut, selon les concentrations des différents polluants, déclencher des effets bronchospastiques chez l'asthmatique, augmenter les symptômes respiratoires aigus chez l'adulte (toux, gêne respiratoire), altérer la fonction respiratoire chez l'enfant (baisse de la capacité respiratoire, excès de toux ou de crise d'asthme).</p>
Poussières ou particules en suspension (PS)	<p>Elles constituent un complexe de substances organiques ou minérales. Elles peuvent être d'origine naturelle (volcan) ou anthropique (combustion industrielle ou de chauffage, incinération, véhicules). On distingue les particules "fines" provenant des fumées des moteurs "diesel" ou de vapeurs industrielles reconduites et les "grosses" particules provenant des chaussées ou d'effluents industriels (combustion et procédés).</p>	<p>Les particules les plus fines peuvent transporter des composés toxiques dans les voies respiratoires inférieures (sulfates, métaux lourds, hydrocarbures,). Elles potentiellement ainsi les effets des polluants acides, dioxyde de soufre et acide sulfurique notamment.</p>	<p>Les plus grosses sont retenues par les voies aériennes supérieures. Les plus fines, à des concentrations relativement basses, peuvent, surtout chez l'enfant, irriter les voies respiratoires ou altérer la fonction respiratoire. Certaines particules ont des propriétés mutagènes et cancérogènes: c'est le cas de certains hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP). Des recherches sont actuellement développées pour évaluer l'impact des composés émis par les véhicules "diesel".</p>
Oxydes d'azote (NO _x)	<p>Ils proviennent surtout des véhicules (environ 75%) et des installations de combustion (centrales énergétiques, ...). Le monoxyde d'azote (NO) et le dioxyde d'azote (NO₂) font l'objet d'une surveillance attentive dans les centres urbains. Le pot catalytique permet une</p>	<p>Les NO_x interviennent dans le processus de formation d'ozone dans la basse atmosphère. Ils contribuent également au phénomène des pluies acides.</p>	<p>Le NO₂ pénètre dans les plus fines ramifications des voies respiratoires. Il peut, dès 200 µg/m³ (microgrammes par m³ d'air), entraîner une altération de la fonction respiratoire et une hyperréactivité bronchique chez l'asthmatique et chez les enfants, augmenter la sensibilité des bronches aux</p>

Polluants	Origines	Pollutions générées	Effets sur la santé
Composés Organiques Volatils (COV)	diminution des émissions de chaque véhicule. Néanmoins, les concentrations dans l'air ne diminuent guère compte tenu de l'âge et de l'augmentation forte du parc et du trafic automobiles.	Ils interviennent dans le processus de formation d'ozone dans la basse atmosphère.	infections microbiennes.
Monoxide de carbone (CO)	Ils sont multiples. Il s'agit d'hydrocarbures (émis par évaporation des bacs de stockage pétroliers, remplissage des réservoirs automobiles), de composés organiques (provenant des procédés industriels ou de la combustion incomplète des combustibles), de solvants (émis lors de l'application des peintures, des encres, le nettoyage des surfaces métalliques et des vêtements), de composés organiques émis par l'agriculture et par le milieu naturel.	Il contribue à la formation de l'ozone.	Les effets sont très divers selon les polluants: ils vont de la simple gêne olfactive à une irritation (aldehydes), à une diminution de la capacité respiratoire jusqu'à des risques d'effets mutagènes et cancérogènes (benzène).
Métaux lourds plomb (Pb), cadmium (Cd), vanadium (V)	Il provient de la combustion incomplète des combustibles et carburants. Des taux importants de CO peuvent être rencontrés quand le moteur tourne dans un espace clos (garage) ou quand il y a une concentration de véhicules qui roulent au ralenti dans des espaces couverts (tunnel, parking), ainsi qu'en cas de mauvais fonctionnement d'un appareil de chauffage.	Ces métaux ont la propriété de s'accumuler dans l'organisme, engendrant ainsi un risque de toxicité à long terme impliquant d'éventuelles propriétés cancérogènes. Le plomb est un toxique neurologique, rénal et du sang. Le cadmium a un effet sur l'appareil rénal, c'est aussi un irritant respiratoire. Le vanadium est essentiellement un toxique respiratoire qui peut conduire, selon les concentrations, à une simple irritation ou à des lésions pulmonaires plus graves.	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, des vaisseaux sanguins. A des taux importants, et à doses répétées, il peut être à l'origine d'intoxication chronique avec céphalées, vertiges, asthénie, vomissements. En cas d'exposition très élevée et prolongée, il peut être mortel ou laisser des séquelles neuropsychiques irréversibles.

Effets des polluants sur la Santé

- **le SO₂** se transforme en acide sulfurique, avec effet pulmonaire, notamment bronchique.
- **les particules fines** ; elles se fixent plus ou moins profondément sur l'appareil respiratoire interne. Leur toxicité est à long terme et dépend : de leur taille, de leur forme et de leur composition chimique. (hydrocarbures polycycliques absorbés, silice, métaux lourds toxiques, etc.). Les effets directs apparaissent essentiellement à long terme.
- **le polluant primaire NO** se fixe sur l'hémoglobine avec effet mutagène. Le NO₂ qui entraîne une baisse des fonctions respiratoires et de la résistance aux infections, il favorise la synthèse de l'immunoglobuline E, un marqueur de l'allergie.
- **l'ozone (O₃)** agit par irritation des muqueuses oculaires et pulmonaires et agrave les symptômes allergiques.
- **le CO** se fixe sur l'hémoglobine à la place de l'oxygène, entraînant syncope, asphyxie et même décès. Annuellement en France, 2 à 300 personnes décèdent d'intoxication massive à l'oxyde de carbone, le plus souvent à leur domicile.
- **les hydrocarbures et les composés organiques volatils (COV, précurseurs de l'ozone)**, ont une toxicité variable. Le benzène et le formaldéhyde (formol) sont des cancérogènes reconnus.

La Pollution de l'air: quelques faits

- On estime que la pollution de l'air tue entre **2,7 et 3,0 millions** d'êtres par an — soit environ 6 % de toutes les morts annuelles.
- Environ **9 morts sur 10 imputables à la pollution de l'air** ont lieu dans les pays en développement, où vit approximativement 80 % de la population mondiale
- Environ **2,5 milliards d'habitants vivent avec des niveaux élevés de pollution de l'air dans des espaces intérieur**. Cette pollution est due à la combustion de bois, de fientes animales, de résidus de récolte et de charbons pour la cuisson et le chauffage. La plupart des victimes de la pollution des espaces intérieurs sont des femmes et des filles, qui ont la charge principale de la cuisson et des soins ménagers.
- **La pollution de l'air des espaces extérieurs touche plus de 1,1 milliard d'habitants**, surtout dans les villes. L'Organisation mondiale de la Santé (OMS) estime qu'on pourrait empêcher environ 700.000 morts par an dans les pays en développement si on ramenait à des niveaux moins dangereux trois principaux polluants de l'atmosphère — CO, PM et Pb.
- On a estimé en 1995 à près de **100 milliards de dollars par an le coût direct de la pollution urbaine de l'air** dans les pays en développement. A elle seule, la bronchite chronique entraîne environ 40 milliards de dollars de dépenses.
- Dans les villes où il n'y a pas de mesures antipollution, **des millions de gens sont mis en danger par la pollution des espaces extérieurs**. Des villes à population dense et grandissante, comme Bangkok, Manille, Mexico et New Delhi, sont souvent ensevelies sous un voile de pollution provenant de camions, d'automobiles et d'émissions industrielles non réglementées.
- Non seulement la pollution de l'air constitue un danger pour la santé, **elle réduit aussi la production alimentaire** et les récoltes de bois, parce que des niveaux élevés de pollution empêchent la photosynthèse.

On ne peut pas mesurer en permanence les nombreux composés émis dans l'air. C'est pourquoi, quelques espèces chimiques, considérées comme les indicateurs de la pollution atmosphérique et ayant un impact sur la santé et sur l'environnement sont contrôlées :

Le dioxyde de soufre : provient essentiellement de la combustion des combustibles fossiles contenant du soufre (fuel et charbon). Il participe au phénomène des pluies acides, par sa transformation en acide sulfurique. Il est à l'origine d'affections respiratoires.

Les oxydes d'azote : résultent de la combinaison à haute température de l'azote présent dans l'air ou dans les combustibles et de l'oxygène. Ils interviennent dans la production de l'ozone troposphérique et contribuent aux pluies acides par transformation en acide nitrique. Le dioxyde d'azote peut entraîner une altération de la fonction respiratoire et une hyperactivité bronchique chez les sujets asthmatiques.

Les particules en suspension peuvent être d'origine naturelle (volcan) ou anthropique (combustion). Leurs effets sur la santé diffèrent avec leur taille, plus elles sont fines plus elles pénètrent profondément dans l'arbre pulmonaire. Les plus fines provoquent des irritations ou des altérations de la fonction respiratoire, certaines d'entre elles peuvent s'avérer cancérogènes selon les composés absorbés à leur surface.

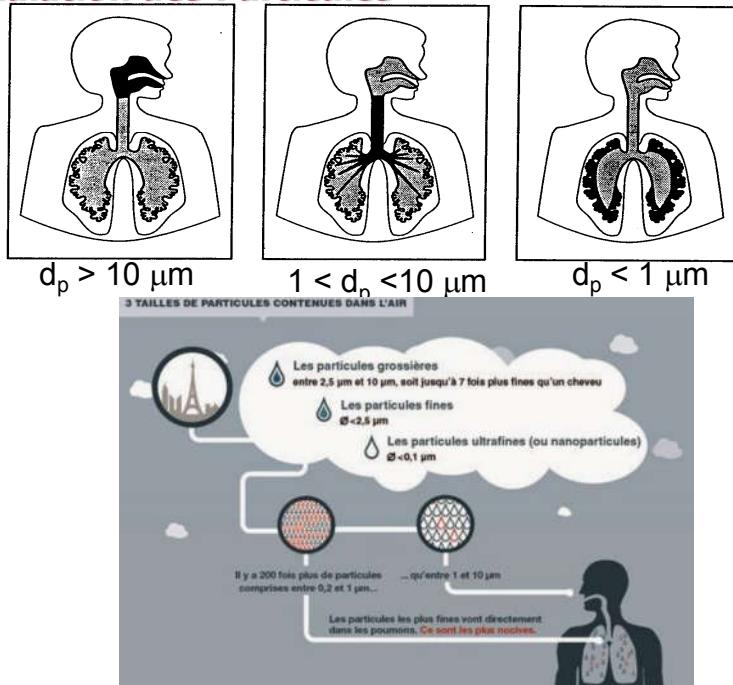
Les éléments polluants de l'atmosphère

Le monoxyde de carbone : résulte d'une combustion incomplète, il est essentiellement émis par les véhicules essence mais aussi par des installations de chauffage mal réglé. Il participe à la formation d'ozone. Le CO conduit à un manque d'oxygénation du système nerveux du cœur et des vaisseaux sanguins. A forte dose il peut être mortel.

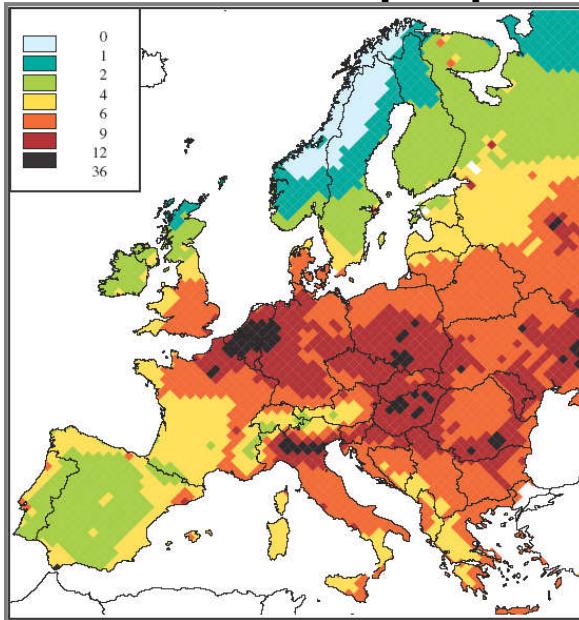
Les Hydrocarbures totaux : la mesure des hydrocarbures totaux donne une indication générale sur la présence de composés hydrocarbonés dans l'atmosphère, l'oxydation de ces composés aboutit directement ou indirectement à la production de l'ozone. Du fait de leur diversité leurs effets sur la santé sont variables.

L'ozone : n'a pas de source directe. Cette molécule résulte d'une série de réactions complexes entre les oxydes d'azote et les composés organiques volatils, initiée par le rayonnement solaire. L'ozone contribue à l'effet de serre et a un impact sur les végétaux. C'est un gaz irritant pour les muqueuses oculaires et qui peut provoquer des altérations pulmonaires.

Inhalation des Particules



La Pollution de l'air: quelques faits



Mois de vie perdus
par exposition aux
PM2.5 en Europe

Seoul, Korea, April 10, 2006



Hanyang Univ. IEIM

Dust in Seoul, Korea April 8, 2006

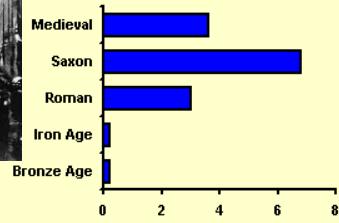
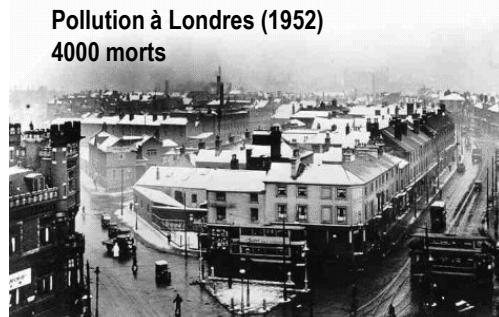


PM10 level reached 2,070 ug/m³.

Hanyang Univ. IEIM

La Pollution Particulaire

Pollution à Londres (1952)
4000 morts



Fréquence de sinusites à
travers les âges

Le Contrôle et la Mesure de la Pollution Atmosphérique

Normes d'émission



Normes de Qualité de l'air



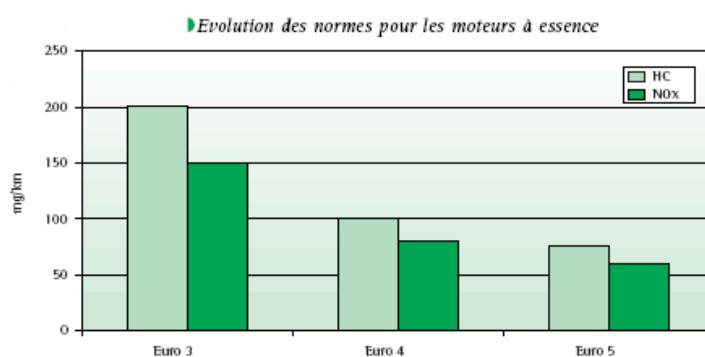
Normes de Toxicité

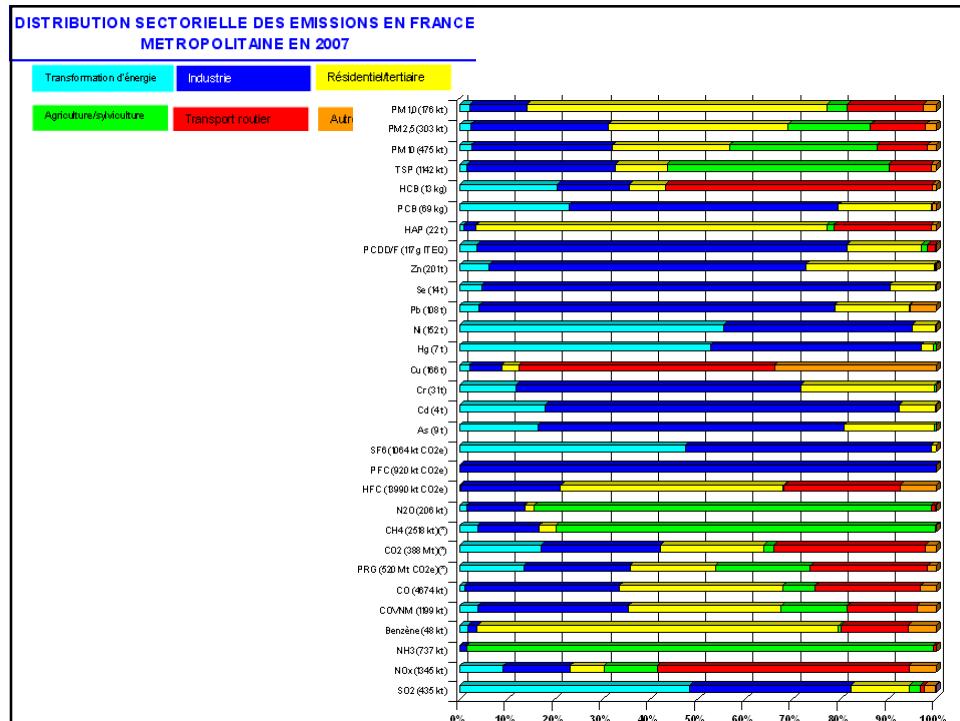


Loi sur l'air et l'utilisation rationnelle de l'énergie

Recommandations de l'OMS

Normes à l'Emission (Moteurs)





Méthodologie de Calcul des émissions dans l'Air

$$E_{s,a,t} = A_{a,t} \cdot F_{s,a}$$

E: émission relative à la substance « s » et à l'activité « a » pendant un temps « t »

A: quantité d'activité relative à l'activité « a » pendant le temps « t »

F: facteur d'émission relatif à la substance « s » et à l'activité « a »



Méthodologie de Calcul des émissions dans l'Air Exemple: le méthane émis par les ruminants

1-



$F = \text{quantité de CH}_4 \text{ émis par vache marron et par jour}$

2-



$Q = \text{quantité de CH}_4 \text{ émis par toutes les vaches marrons par jour}$

3-



$F = F'$ $F' = \text{quantité estimée de CH}_4 \text{ émis par vache noire et par jour}$

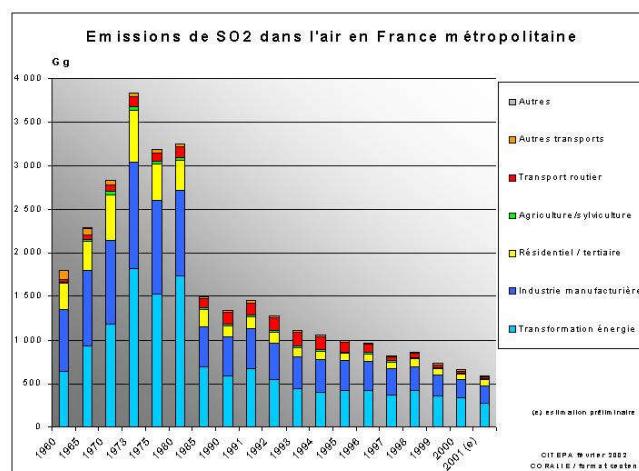
4-

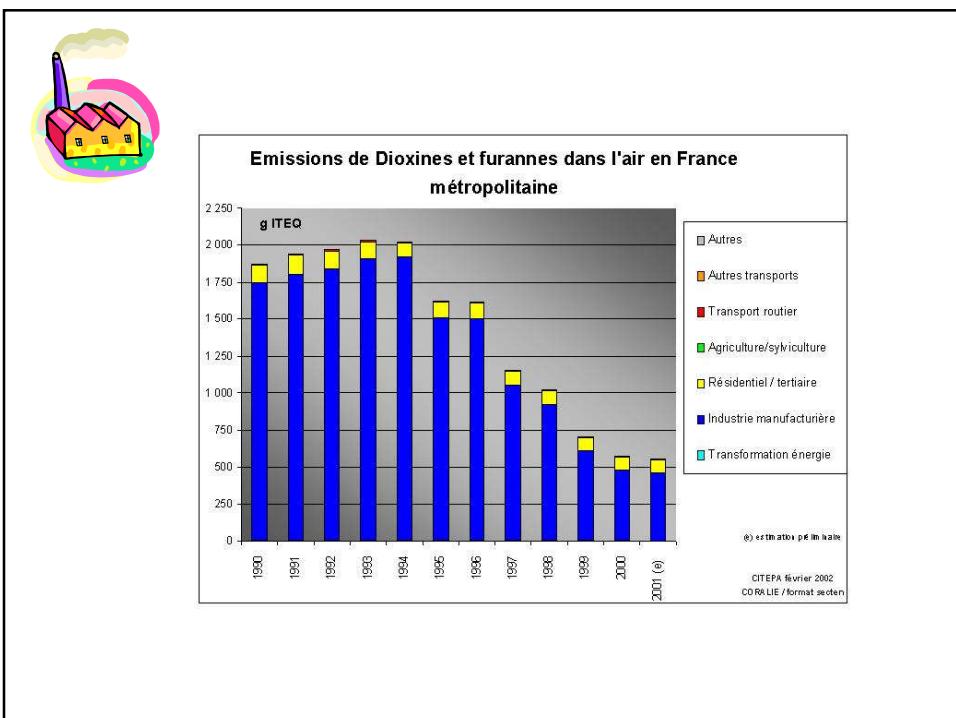


$Q = \text{quantité de CH}_4 \text{ émis par toutes les vaches par jour}$



www.citepa.org



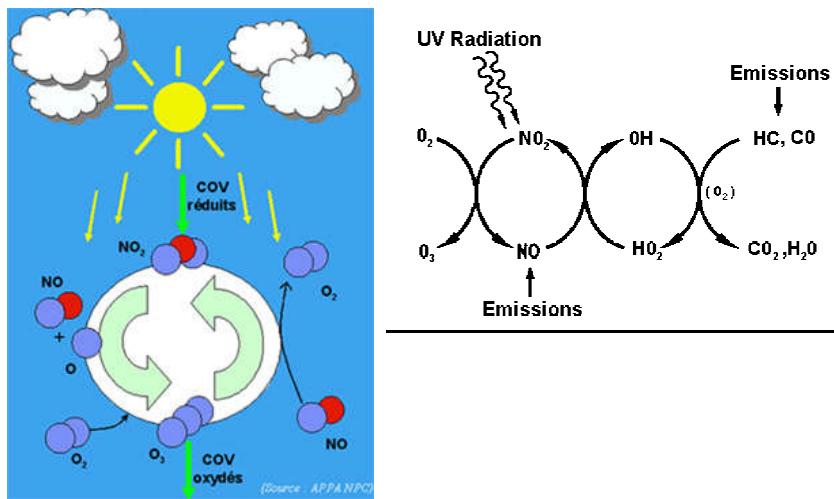


Trouve-t-on des estimations des émissions d'Ozone ?

Les sources d'émission peuvent être classées en 2 grandes catégories

Sources « primaires » Sources « secondaires »

Trouve-t-on des estimations des émissions d'Ozone ?



Pollution dans les atmosphères urbaines

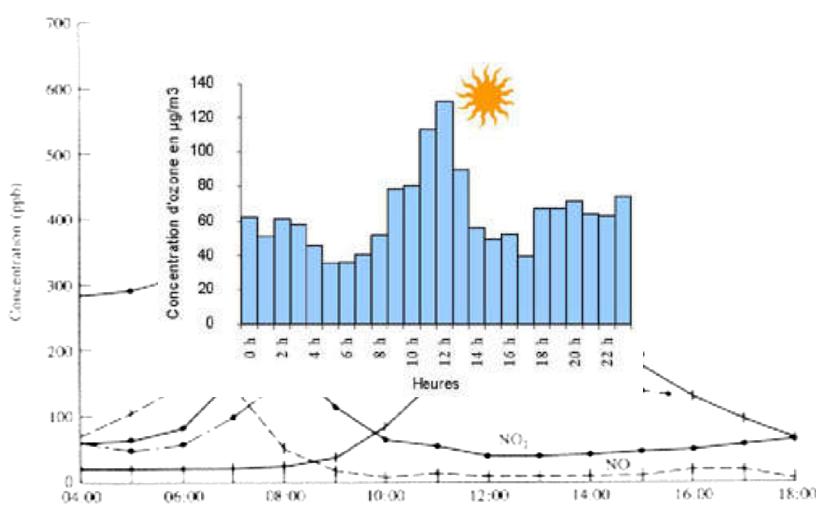
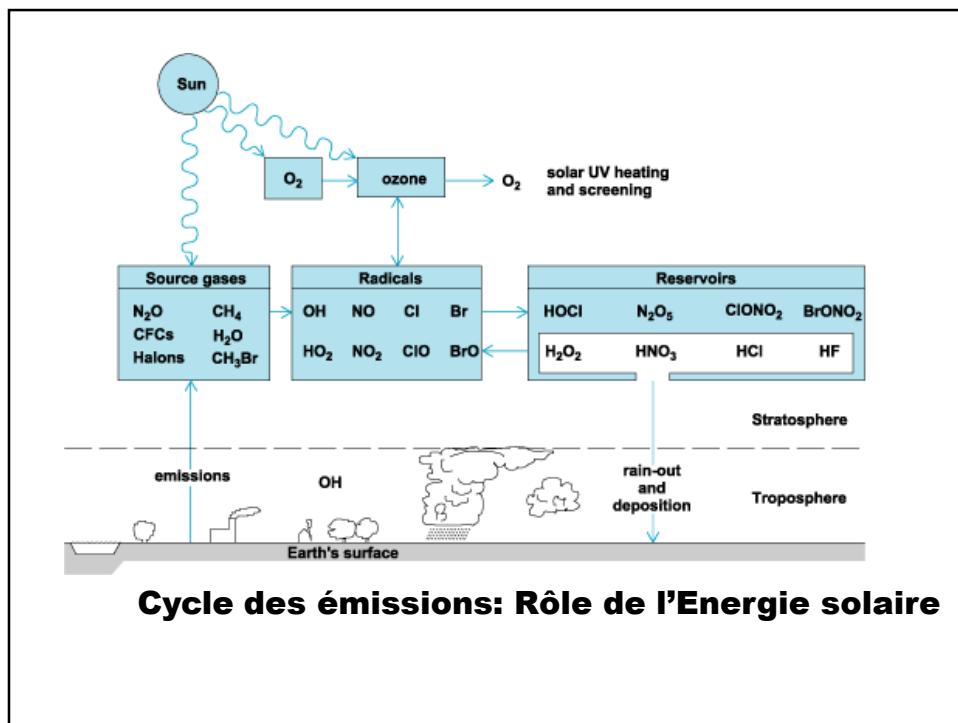
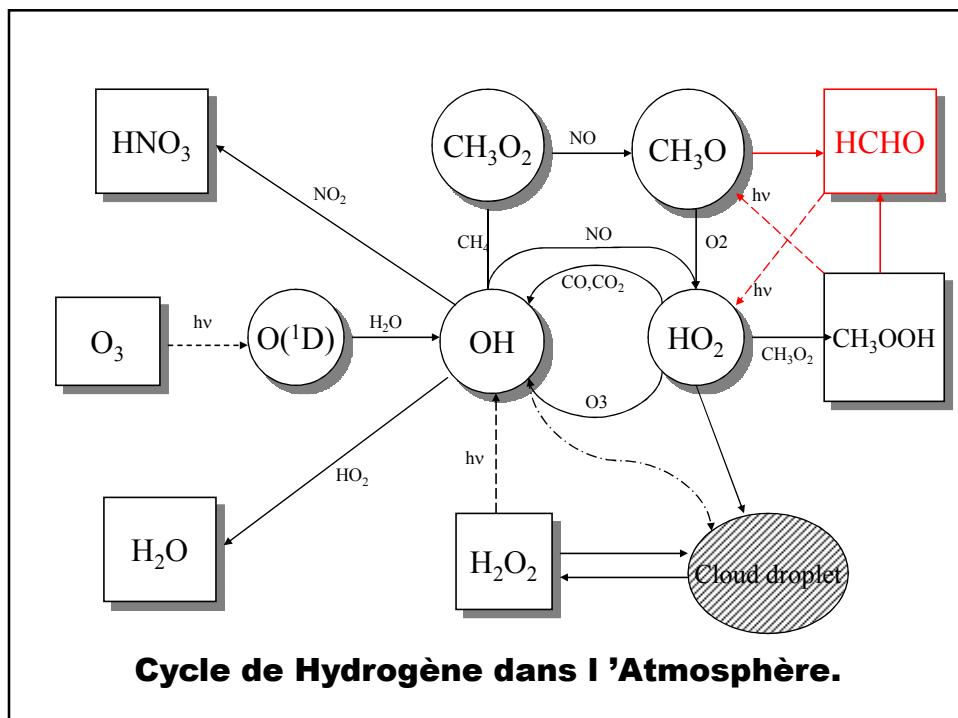


Fig. 2.2 The average concentration of various air pollutants in the atmosphere of Los Angeles during days of eye irritation. Modified from Haagen-Smit and Wayne (1976).



Particules primaires et Secondaires

En fonction de leur mécanisme de formation, on distingue les particules primaires ou secondaires.

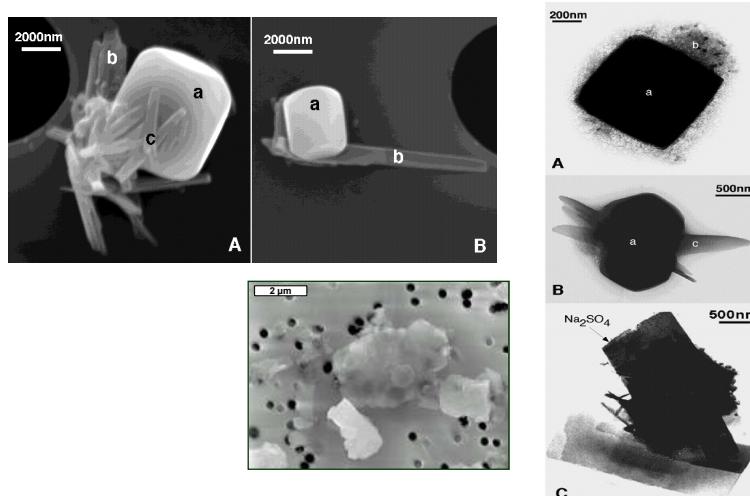
Les particules primaires:

Sont émises directement dans l'atmosphère sous forme solide ou liquide. Il s'agit par exemple des particules minérales résultant de l'érosion de sols, du sable d'origine désertique, des embruns marins, des cendres volcaniques, etc. En milieu urbain, on peut retrouver des suies provenant du chauffage domestique, des particules émises directement par la combustion des carburants automobiles ou résultant de l'usure des pneumatiques et des freins, ou encore des particules provenant de la remise en suspension des dépôts sur la chaussée par la circulation.

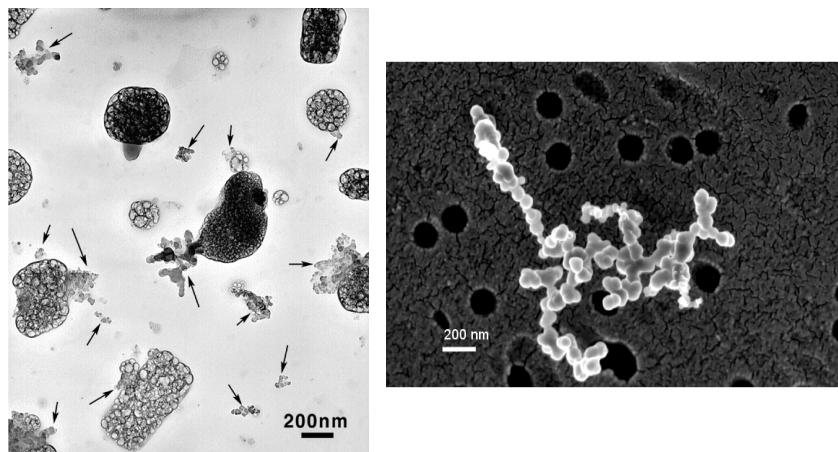
Les particules secondaires:

Résultent de la conversion en particules, des gaz présents dans l'atmosphère. Cette conversion, soit directement gaz-solide, soit par l'intermédiaire des gouttes d'eau, est appelée nucléation. La nucléation est le mécanisme de base de la formation des nouvelles particules dans l'atmosphère. Les principaux précurseurs impliqués dans la formation des particules secondaires sont le dioxyde de soufre (SO_2), les oxydes d'azote (NO_x et nitrates), les composés organiques volatils (COV) et l'ammoniac (NH_3). Les particules secondaires sont essentiellement des particules fines (<2.5 μm).

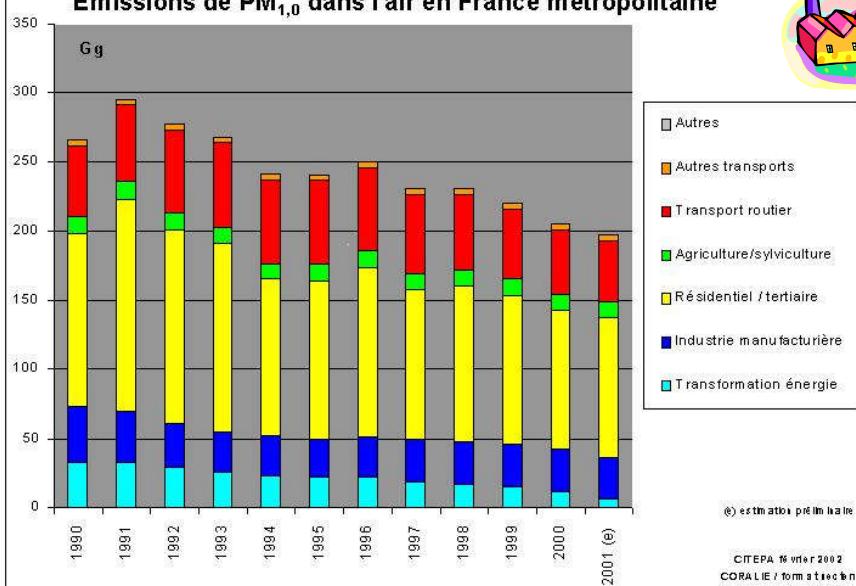
Particules Primaires



Particules Secondaires



Emissions de PM_{1,0} dans l'air en France métropolitaine



Valeurs guides

Les valeurs guides ou " normes " sont de trois types : les objectifs de qualité, les seuils d'alerte et les valeurs limites résultant de l'annexe I du décret 2002-213 du 15 février 2002 modifiant le décret 98-360 du 6 mai 1998

Au sens de la loi sur l'air et l'utilisation rationnelle de l'énergie, on entend par :

- **Objectifs de qualité**, un niveau de concentration de substances polluantes dans l'atmosphère, fixé sur la base de connaissances scientifiques, dans le but d'éviter, de prévenir ou de réduire les effets nocifs de ces substances pour la santé humaine ou pour l'environnement, à atteindre dans une période donnée ;
- **Seuils d'alerte**, un niveau de concentration de substances polluantes dans l'atmosphère au-delà duquel une exposition de courte durée présente un risque pour la santé humaine ou de dégradation de l'environnement à partir duquel des mesures d'urgence doivent être prises ;
- **Valeurs limites**, un niveau maximal de concentration de substances polluantes dans l'atmosphère, fixé sur la base des connaissances scientifiques, dans le but d'éviter, de prévenir ou de réduire les effets nocifs de ces substances pour la santé humaine ou pour l'environnement.

NO₂

En moyenne annuelle :

2001 : 58 µg/m³, décroissant linéairement au cours du temps.
2010 : 40 µg/m³.

En moyenne horaire :

2001 : 18 dépassements de 290 µg/m³ (décroissant linéairement au cours du temps) au maximum.
Jusqu'en 2010 : 200 µg/m³ à ne pas dépasser plus de 2 % du temps.
2010 : 18 dépassements de 200 µg/m³ au maximum.

SO₂

Année civile (1/1 au 31/12) :
En moyenne annuelle (pour les écosystèmes) :
20 µg/m³.



En moyenne journalière :
En moyenne journalière jusqu'en 2004 : 250 µg/m³ à ne pas dépasser plus de 2 % du temps.
80 µg/m³ à ne pas dépasser plus de 50 % du temps.
2000-2005 : 3 dépassements de 125 µg/m³ au maximum.

En moyenne horaire :
2001 : 24 dépassements de 470 µg/m³ (décroissant linéairement au cours du temps) au maximum.
2005 : 24 dépassements de 350 µg/m³ au maximum.

Hiver (1/10 au 31/3) :
En moyenne hivernale (pour les écosystèmes) :
20 µg/m³.

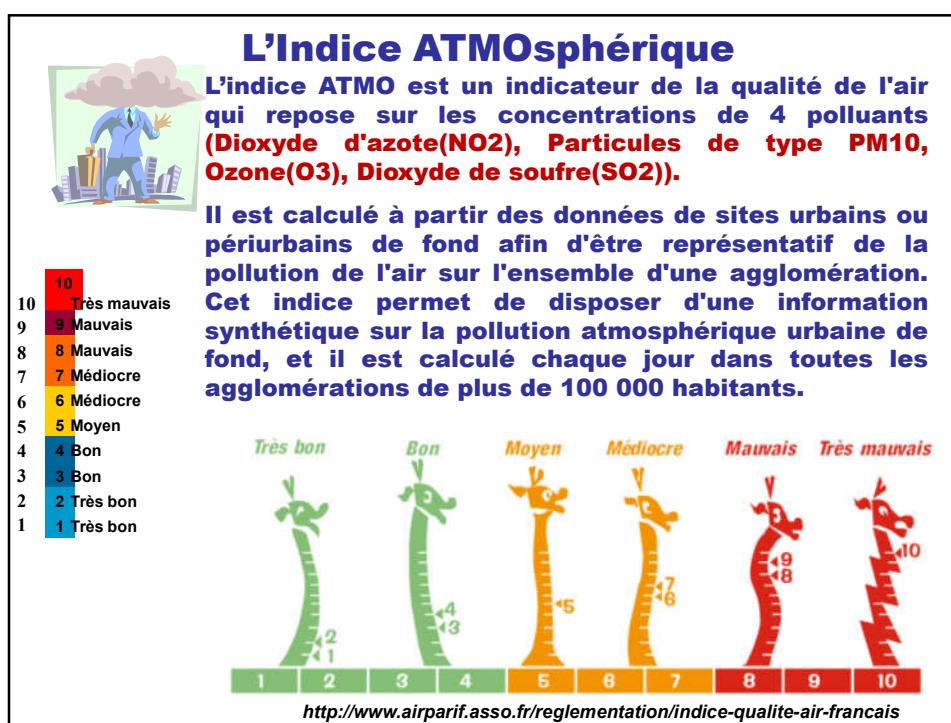
En moyenne journalière jusqu'en 2004 : 130 µg/m³ à ne pas dépasser plus de 50 % du temps.



PM10
(Particules fines de diamètre inférieur ou égal à 10 micromètres)

En moyenne annuelle :
2001 : 46 µg/m³, décroissant linéairement au cours du temps.
2005 : 40 µg/m³.
2010 : 20 µg/m³.

En moyenne journalière :
2001 : 35 dépassements de 70 µg/m³ au maximum.
2005 : 35 dépassements de 50 µg/m³ au maximum.
2010 : 7 dépassements de 50 µg/m³ au maximum.



Moyens de Mesure

La surveillance de la qualité de l'air consiste en un suivi spatial-temporel de paramètres indicateurs de la pollution afin de situer le niveau de la qualité de l'air par rapport à des normes fixées par la réglementation. Au niveau du réseau de la qualité de l'air, le suivi est assuré par la technique dite active et qui consiste à équiper chaque site de mesure d'un ou de plusieurs analyseurs mesurant, en continu et de manière automatique, un ou plusieurs polluant(s) spécifique(s). Ces analyseurs sont placés soit dans :

- Stations fixes
- Stations mobiles

Méthodes de mesure	
Polluant	Méthode de mesure
Dioxyde de Soufre (SO ₂)	Fluorescence Ultra Violet
Oxydes d'Azote (NO _x)	Chimiluminescence
Ozone (O ₃)	Absorption UV
Monooxyde de Carbone (CO)	Absorption IR
Hydrocarbures Totaux (HCT)	Ionisation de la flamme
matières particulières en suspension (PM10)	Atténuation du rayonnement Bêta

press x to close

Principe de fonctionnement :

Chaque analyseur détermine la concentration en polluant contenue dans l'échantillon d'air.

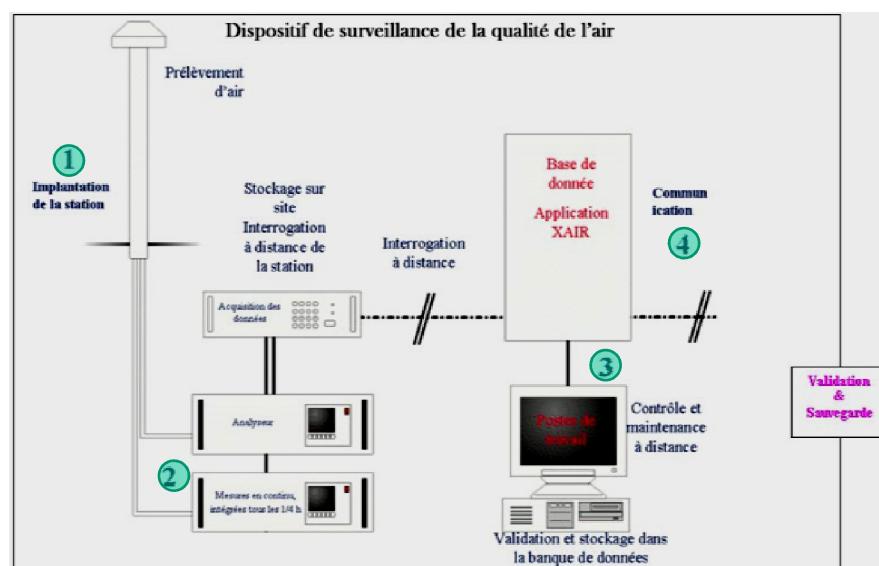
Cet air est prélevé à l'extérieur par aspiration grâce à une pompe, au niveau d'une tête de prélèvement externe à la station de mesure.

L'air est ensuite acheminé à l'intérieur des analyseurs par des lignes de prélèvement en teflon.

Les analyseurs détectent la concentration des polluants présents dans l'air prélevé grâce à des méthodes basées sur les caractéristiques optiques ou physiques des polluants (chimiluminescence, fluorescence UV...).

Ces informations sont transmises au poste Central, où elles sont analysées et validées et sauvegardées sur la base de données de la qualité de l'air à l'aide du logiciel Xair.

Dispositif de surveillance de la qualité de l'air





Indice Atmo-Maroc

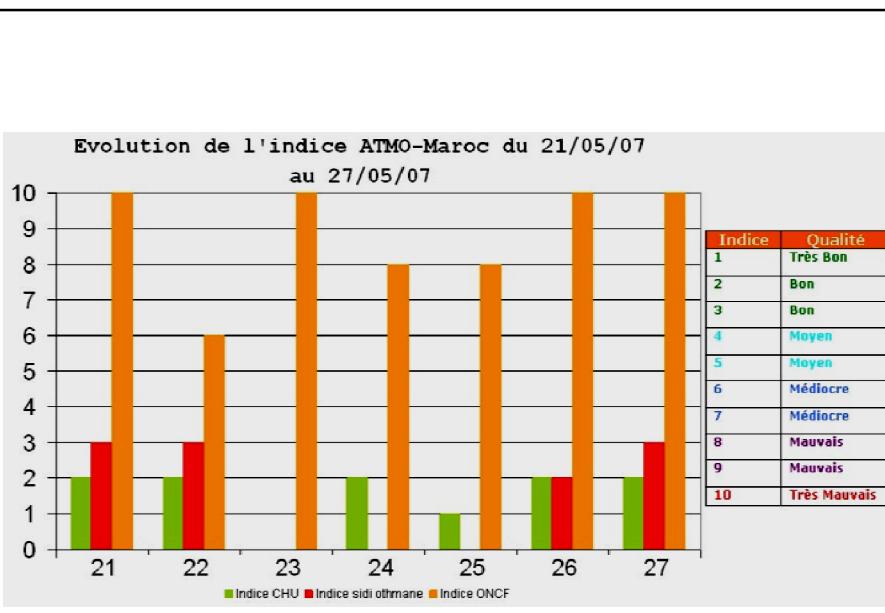
L'indice Atmo-Maroc est calculé à partir de la concentration dans l'air ambiant de quatre polluants mesurés en continu par des appareils automatiques:

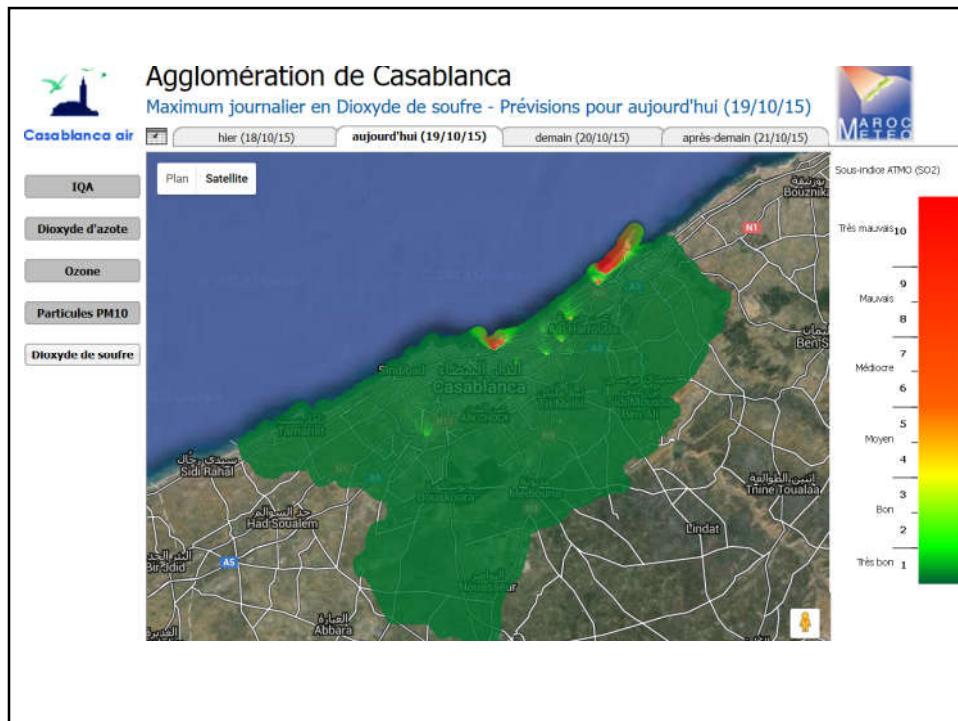
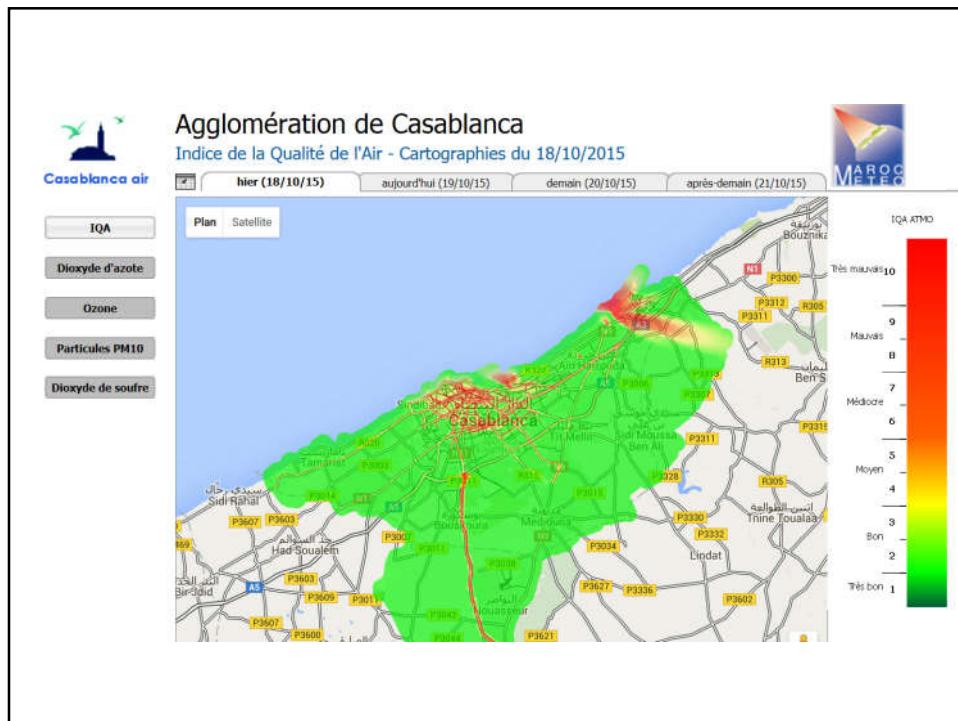
- Le dioxyde d'azote (NO₂) dégagé essentiellement par la circulation automobile
- Le dioxyde de soufre (SO₂), dégagé principalement par les industries.
- Les poussières (PS), d'origine industrielle, automobile, anthropique
- L'ozone (O₃), d'origine photochimique

Une valeur de 1 à 10 est associée à un qualificatif qui exprime la qualité de l'air. Un indice 1 correspond à une qualité de l'air excellente, un indice 10 à une qualité d'air très mauvaise. L'indice est calculé une fois par jour.

Réseau de mesure de la qualité de l'air au Maroc

Réseau de mesure de la qualité de l'air sur les villes de Casablanca, Safi, El Jadida et Kenitra





Modélisation et Prévision

Il s'agit de prévoir l'évolution des concentrations des polluants atmosphériques (dioxyde de soufre, dioxyde d'azote, monoxyde de carbone, les poussières et l'ozone) à l'aide de différents types de modèles.

La modélisation peut être de type :

Statistique : cherchant une corrélation entre le polluant à prévoir et les paramètres environnementaux, (ci-dessous l'étude de prévisibilité de l'ozone) ou

Numérique : à ce stade la modélisation fournit un cadre unique assurant la synthèse de l'ensemble des processus dynamiques, physiques et chimiques couplés dans la stratosphère et la troposphère.

Laboratoire de Mécanique des Fluides et d'Acoustique
UMR-CNRS 5509 / Ecole Centrale de Lyon / UCB Lyon I / INSA

SIRANE
Urban Air Quality Model

software developed by **AIR** Atmosphere Impact & Risk

Accueil

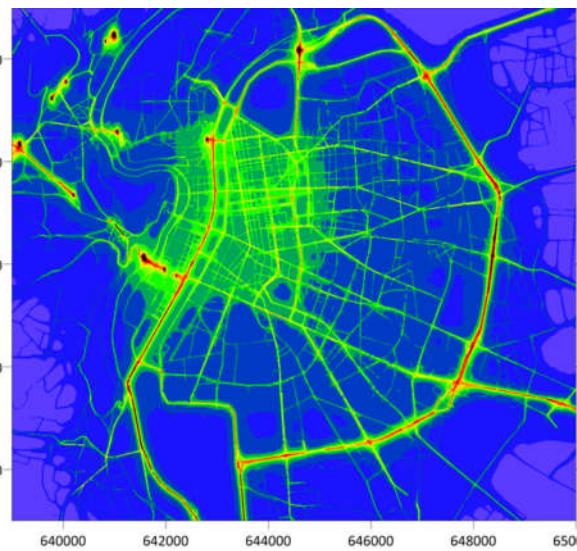
SIRANE est un logiciel de modélisation de la pollution atmosphérique en milieu urbain.

SIRANE est développé depuis 15 ans par l'équipe AIR - Atmosphere, Impact & Risk du Laboratoire de Mécanique des Fluides et d'Acoustique de l'Ecole Centrale de Lyon.

SIRANE est aujourd'hui utilisé dans plus de 10 villes en France et en Europe : Paris, Lyon, Grenoble, St-Etienne, Valence, Chambéry, Annecy, Rouen, Le Havre, Milan, Turin.

Logiciel SIRANE : Concentration en NO_2 sur l'agglomération de Lyon

SIRANE est un logiciel de modélisation de la pollution atmosphérique en milieu urbain.

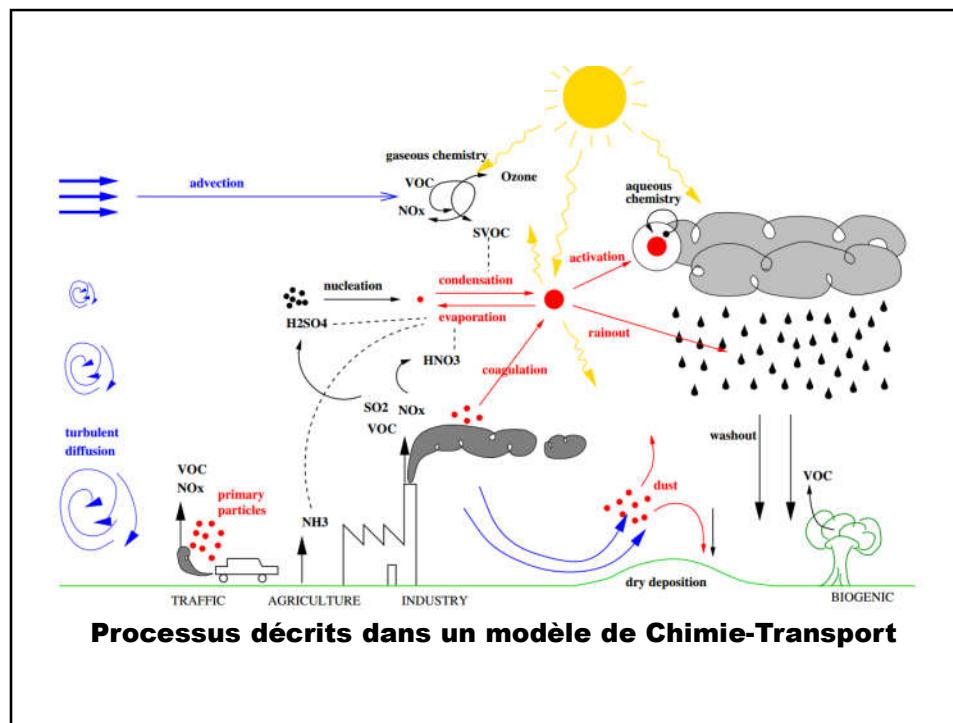
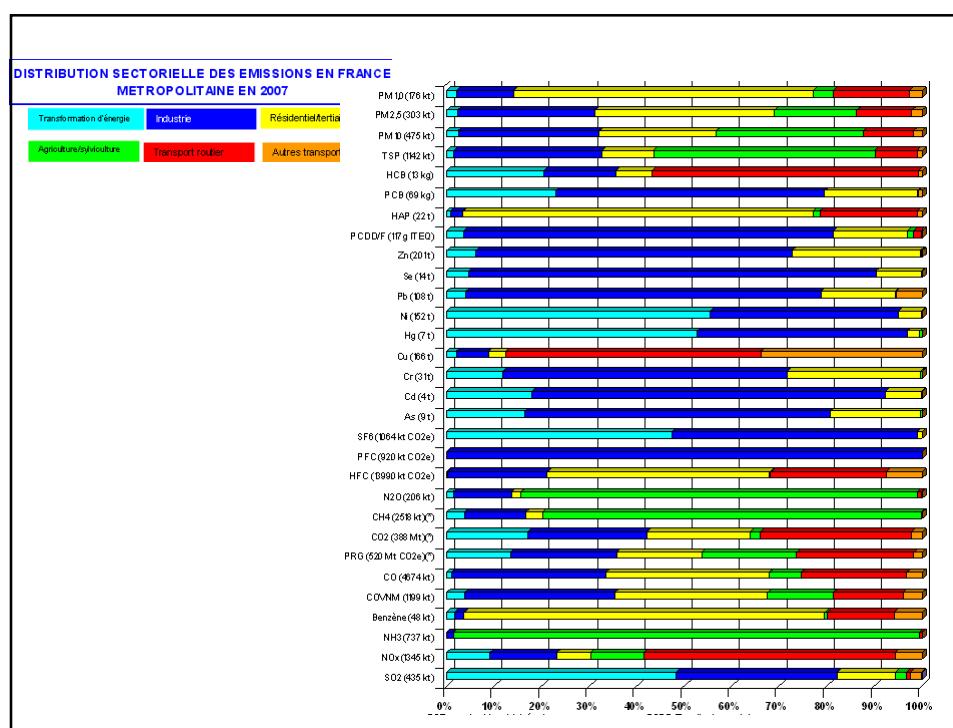


Description

Le logiciel **SIRANE** est un logiciel de dispersion des polluants en milieu urbain, adapté à l'échelle d'un quartier voire d'une agglomération. Compte tenu des phénomènes physiques pris en compte, le domaine d'étude qu'il est capable de traiter peut mesurer de quelques centaines de mètres à une dizaine de kilomètres. Le logiciel est capable de prédire la concentration des polluants sur une zone urbaine.

SIRANE permet de prendre en compte les principaux effets qui agissent sur la dispersion des polluants à l'échelle d'un quartier :

- Phénomènes de confinement des polluants entre les bâtiments (rue-canyon)
- Echanges des polluants au niveau des carrefours ,
- Transport des polluants au-dessus du niveau des toits ,
- Prise en compte des caractéristiques du vent extérieur (vitesse, direction, turbulence, stabilité thermique) ,
- Transformations chimiques du cycle de Chapman,
- Transport et dépôts de particules ,
- Lessivage par la pluie (dépôt humide) ,



Modèle mathématique de transport de la pollution de l'air

la concentration de l'espèce chimique i dans la phase gazeuse (en mol l^{-1} , ppb, $\mu\text{g m}^{-3}$...), son évolution est alors régie par l'équation d'advection-diffusion-réaction suivante (équation de dispersion réactive) :

$$\frac{\partial c_i}{\partial t} + \underbrace{\operatorname{div}(Vc_i)}_{\text{advection}} = \underbrace{\operatorname{div}\left(\rho K \nabla \frac{c_i}{\rho}\right)}_{\text{diffusion turbulente}} + \underbrace{\chi_i(c, T, I)}_{\text{chimie en phase gazeuse}} - \underbrace{\Lambda_i(x, t)c_i}_{\text{lessivage}} + \underbrace{S_i(x, t)}_{\text{émission volumique}} \quad (1.1)$$

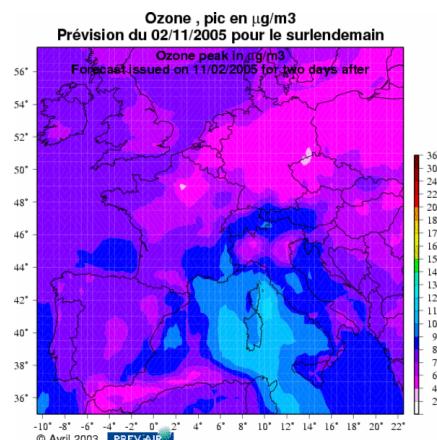
\vec{V} (la vitesse du vent), K (la matrice de diffusion turbulente), T (la température), I (le flux actinique qui décrit le rayonnement solaire disponible) et ρ (la densité de l'air) sont supposés connus. Le terme χ_i représente l'ensemble des transformations physico-chimiques et dépend à la fois du rayonnement solaire (réactions photolytiques) et de la température (réactions thermiques). A paramétrise les processus de lessivage (par la pluie par exemple), non résolus au niveau de la maille de calcul. Enfin, S_i décrit les émissions volumiques (ponctuelles).

Des conditions aux limites doivent bien entendu être précisées, donnant par exemple au sol la contribution des dépôts et des émissions :

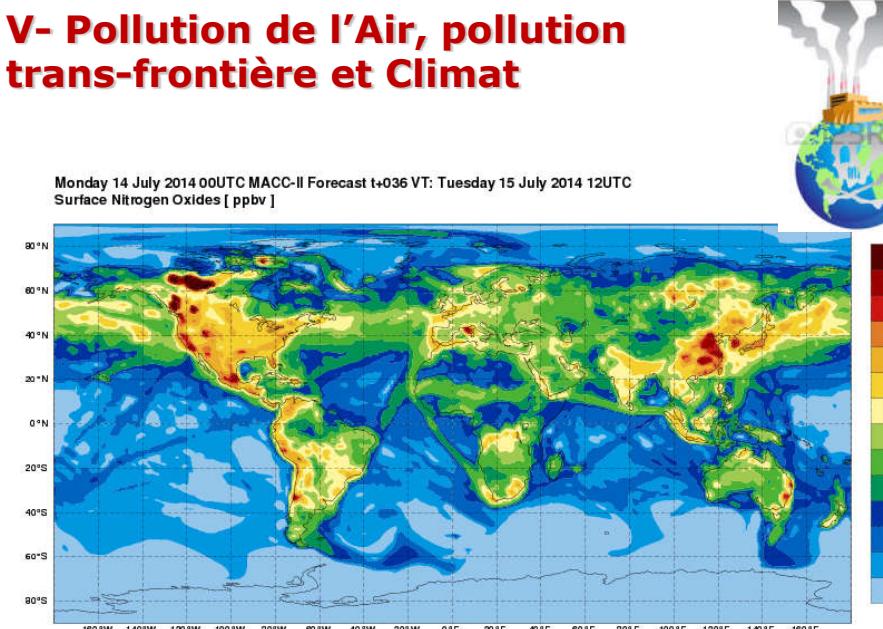
$$-K_z \frac{\partial c_i}{\partial z} = \underbrace{E_i(\vec{x}, t)}_{\text{émission surfacique}} - \underbrace{v_i^{dep}(\vec{x}, t)c_i}_{\text{dépôt sec}} \quad (1.2)$$

avec K_z le coefficient paramétrisé de diffusion verticale, E_i le flux d'émission surfacique et v_i^{dep} la vitesse de dépôt sec.

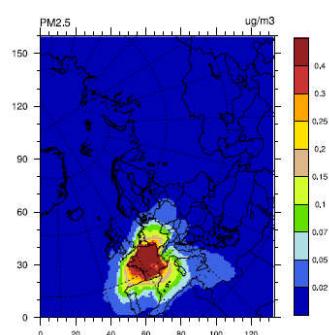
La Pollution Trans-frontières



V- Pollution de l'Air, pollution trans-frontière et Climat



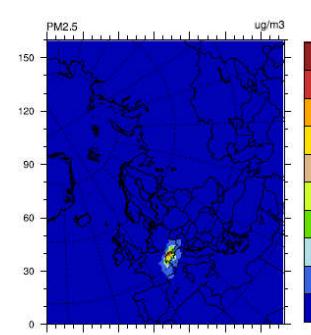
La Pollution Trans-frontière



Impact des réductions d'émissions de PM2,5

EN France

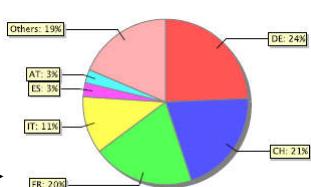
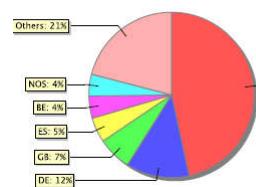
EN Switzerland



Contributeurs des PM10

En France

en Suisse



Particules Atmosphériques



Les engagements Internationaux: le protocole de Genève

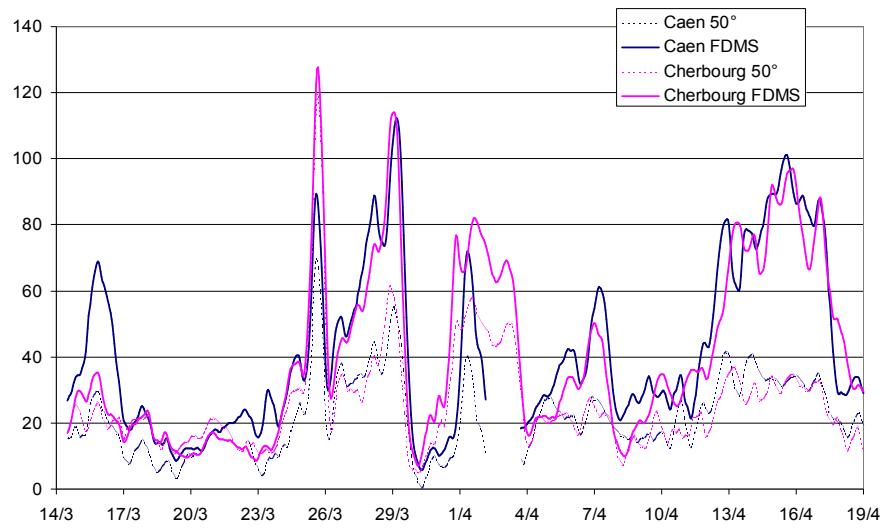
Protocole CEE/ONU	Engagements pris par la France
Premier protocole soufre (Helsinki, 1985)	Réduction minimale des rejets de 30 % de 1980 à 1993. La France s'est engagée à réduire ses rejets de 60 %.
Protocole NOx (Sofia 1988)	Gel des rejets en 1994 au niveau des émissions 1987. La France s'est engagée à une baisse de 30 % des rejets entre 1980 et 1998.
COV (Genève 1991)	Réduction des émissions de 30 % entre 1988 et 1999.
Second protocole soufre (Oslo 1994)	Réduction supplémentaire des émissions (868 kt en 2000, 770 kt en 2005 et 737 kt en 2010).
Protocole Polluants Organiques Persistants et Métaux lourds (Aarhus 1998)	Limitation des émissions de Pb, Cd, Hg à un niveau inférieur à 1990. Réduction ou suppression des rejets de 16 substances organiques (dont les dioxines/furanes et 11 pesticides).
Protocole sur les différents effets de la pollution : eutrophisation, acidification, ozone troposphérique (Göteborg 1999)	Réduction des rejets d'ici 2010 (par référence à 1990) de 68 % pour le SO ₂ , 54 % pour les NOx, 63 % pour les COV, 3 % pour le NH ₃ .

Mesure réglementaire des PM

Tappered Element
Oscillator
Microbalance (TEOM)

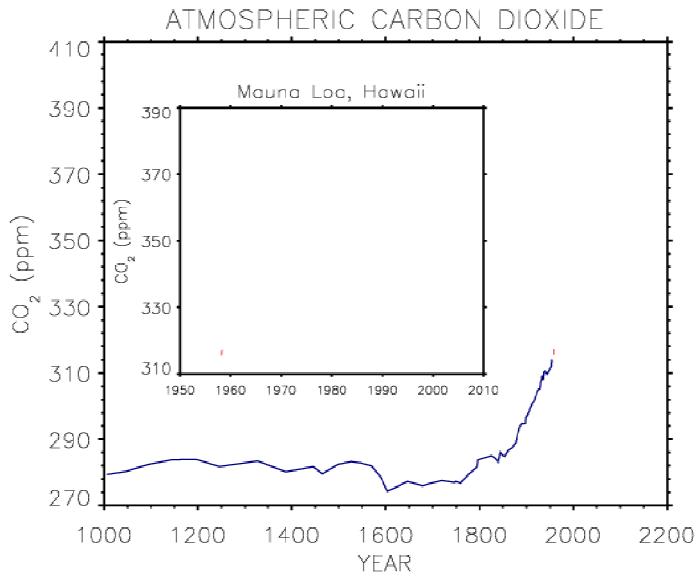


Exemple de données : Caen et Cherbourg



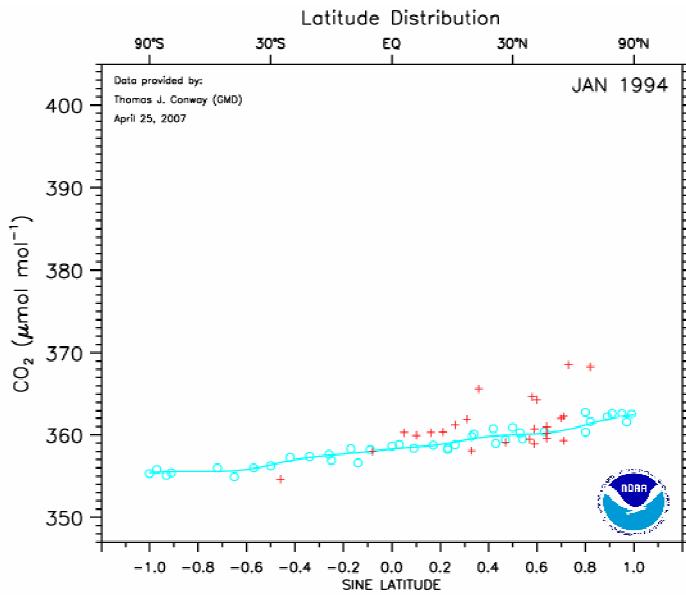
Gilles Aymoz – CS Particules du 11 mai 2007

Ice Core and Modern CO₂ Record

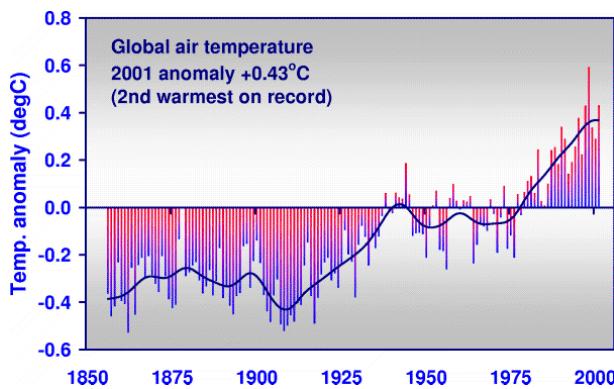


Ice core record: Etheridge et al., 1996, JGR

CO₂ Latitude Gradient



Conséquence : augmentation de la température de la Terre.



La température moyenne de la Terre a augmenté de 1 °C au cours des 100 dernières années

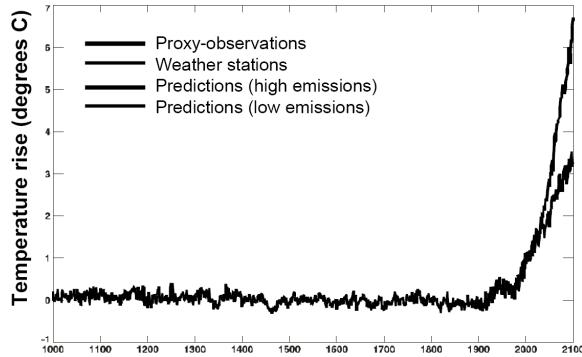
Températures moyennes à Grenoble et Alger: 4 °C en plus

Month	Mean Temperature °C		Mean Temperature °C	
	Daily Minimum	Daily Maximum	Daily Minimum	Daily Maximum
	Mean Temperature °C	Mean Temperature °C	Mean Temperature °C	Mean Temperature °C
Jan			5.5	16.7
Feb	-0.3	7.3	5.9	17.4
Mar	0.5	9.3	7.1	19.2
Apr	2.2	12.5	8.8	20.9
May	4.1	14.8	12.3	23.9
Jun	8.2	19.2	16.1	28.2
Jul	11.2	22.5	18.9	31.2
Aug	13.4	25.9	19.8	32.2
Sep	13.2	25.8	17.6	29.6
Oct	10.3	22.2	14.2	25.9
Nov	7.1	16.9	9.8	20.8
Dec	2.6	11.0	7.2	17.9
	0.7	8.2		

4 °C en plus:

- Quelle végétation ?
- Quelle agriculture
- Quel régime de précipitation ?

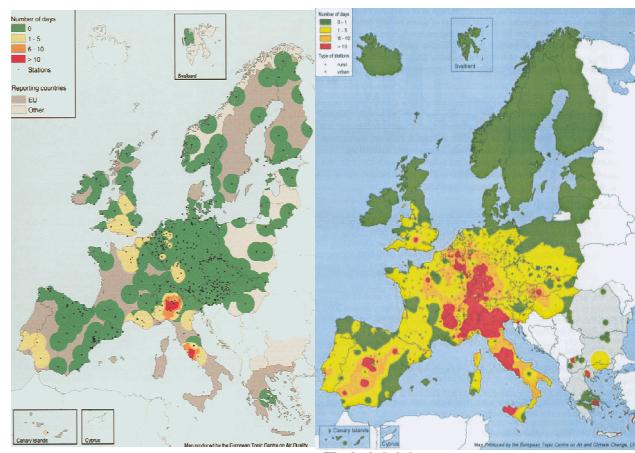
Les prévisions des modèles de simulation du climat



Prévisions: un réchauffement de 3 à 9 °C de la température moyenne (intervalle le plus probable 4-5 °C)

Le réchauffement global entraîne une augmentation de la pollution de l'air

Nombre de jours de dépassement des limites de concentration d'ozone



Eté 2002

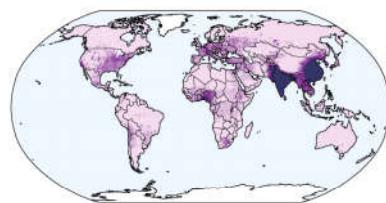
Eté 2003

35 000 morts en Europe

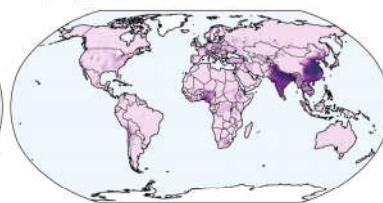
Protocoles Pollution de l'Air et Climat

Health impact of global climate and air quality policies for 2050

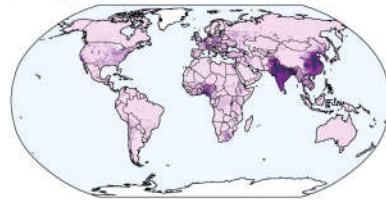
Business as Usual



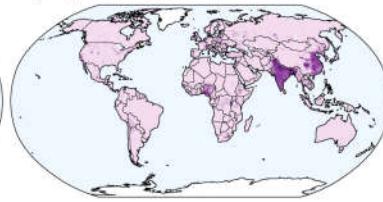
Air Quality policies



Climate policies



Air Quality and Climate policies combined



Decrease in statistical life expectancy after 30 years due to exposure to PM_{2.5} (months)



No data

Source:JRC-IES

VI- Vers une atmosphère « durable »

Conséquences du Réchauffement global (rapport Stern)

Table 3.1 Highlights of possible climate impacts discussed in this chapter

Temp rise (°C)	Water	Food	Health	Land	Environment	Abrupt and Large-Scale Impacts
1°C	Small glaciers in the Andes disappear completely, threatening water supplies for 50 million people	Modest increases in cereal yields in temperate regions	At least 300,000 people each year die from climate-related diseases (predominantly diarrhoea, malaria, and malnutrition) Reduction in winter mortality in higher latitudes (Northern Europe, USA)	Permafrost thawing damages buildings and roads in parts of Canada and Russia	At least 10% of land species facing extinction (according to one estimate) 80% bleaching of coral reefs, including Great Barrier Reef	Atlantic Thermohaline Circulation starts to weaken

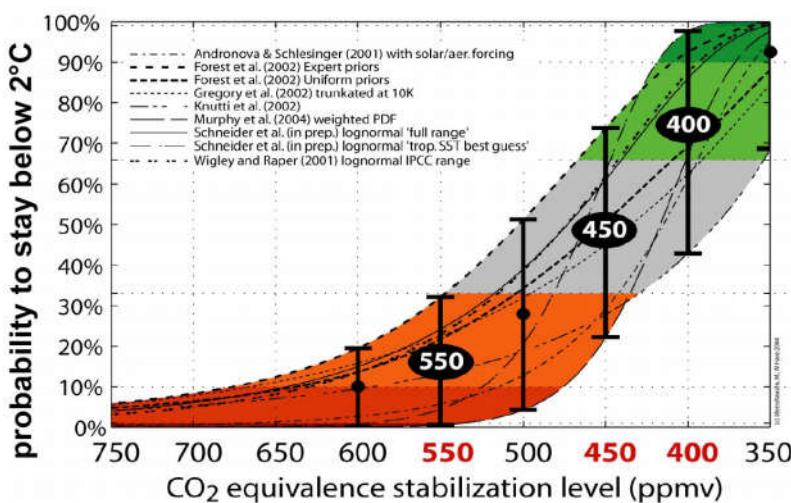
Conséquences du Réchauffement global (rapport Stern)

2°C	Potentially 20 - 30% decrease in water availability in some vulnerable regions, e.g. Southern Africa and Mediterranean	Sharp declines in crop yield in tropical regions (5 - 10% in Africa)	40 – 60 million more people exposed to malaria in Africa	Up to 10 million more people affected by coastal flooding each year	15 – 40% of species facing extinction (according to one estimate) High risk of extinction of Arctic species, including polar bear and caribou	Potential for Greenland ice sheet to begin melting irreversibly, accelerating sea level rise and committing world to an eventual 7 m sea level rise
3°C	In Southern Europe, serious droughts occur once every 10 years 1 - 4 billion more people suffer water shortages, while 1 – 5 billion gain water, which may increase flood risk	150 – 550 additional millions at risk of hunger (if carbon fertilisation weak) Agricultural yields in higher latitudes likely to peak	1 – 3 million more people die from malnutrition (if carbon fertilisation weak)	1 – 170 million more people affected by coastal flooding each year	20 – 50% of species facing extinction (according to one estimate), including 25 – 60% mammals, 30 – 40% birds and 15 – 70% butterflies in South Africa Collapse of Amazon rainforest (according to some models)	Rising risk of abrupt changes to atmospheric circulations, e.g. the monsoon Rising risk of collapse of West Antarctic Ice Sheet Rising risk of collapse of Atlantic Thermohaline Circulation
4°C	Potentially 30 – 50% decrease in water availability in Southern Africa and Mediterranean	Agricultural yields decline by 15 – 35% in Africa, and entire regions out of production (e.g. parts of Australia)	Up to 80 million more people exposed to malaria in Africa	7 – 300 million more people affected by coastal flooding each year	Loss of around half Arctic tundra Around half of all the world's nature reserves cannot fulfill objectives	

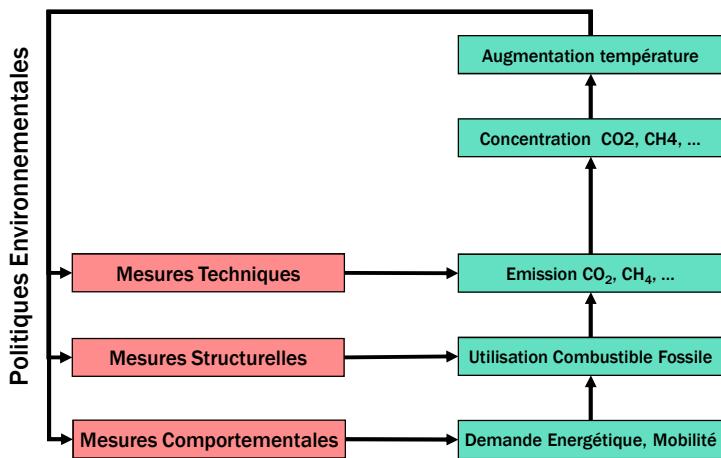
Conséquences du Réchauffement global (rapport Stern)

5°C	Possible disappearance of large glaciers in Himalayas, affecting one-quarter of China's population and hundreds of millions in India	Continued increase in ocean acidity seriously disrupting marine ecosystems and possibly fish stocks		Sea level rise threatens small islands, low-lying coastal areas (Florida) and major world cities such as New York, London, and Tokyo		
More than 5°C	The latest science suggests that the Earth's average temperature will rise by even more than 5 or 6°C if emissions continue to grow and positive feedbacks amplify the warming effect of greenhouse gases (e.g. release of carbon dioxide from soils or methane from permafrost). This level of global temperature rise would be equivalent to the amount of warming that occurred between the last ice age and today – and is likely to lead to major disruption and large-scale movement of population. Such "socially contingent" effects could be catastrophic, but are currently very hard to capture with current models as temperatures would be so far outside human experience.					

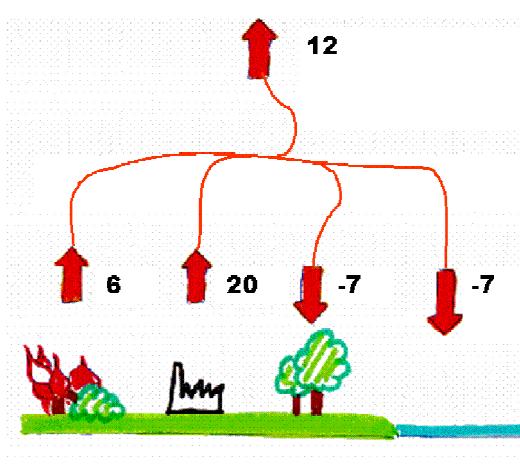
Un objectif à atteindre : limiter le réchauffement global à 2 °C



Une nécessité: réduire les émissions



Mais combien doit-on émettre dans un monde équitable ?

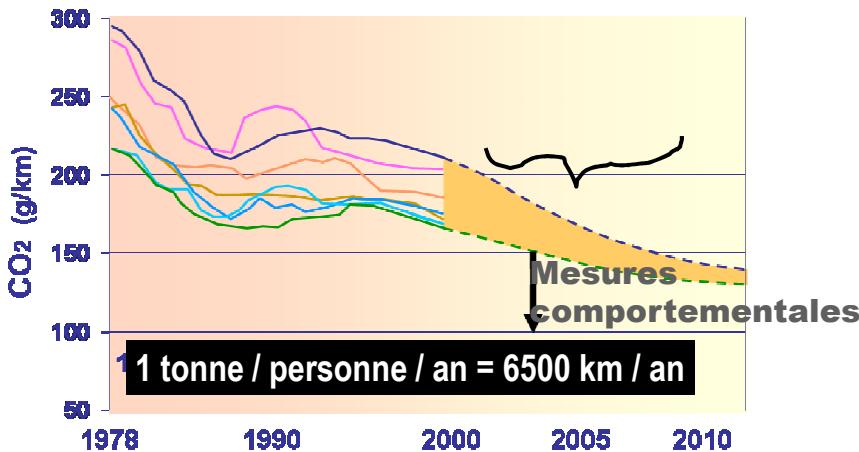


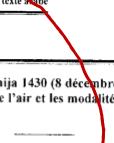
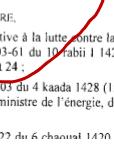
Stabilisation :
réduction de 60%:
 $20 \rightarrow 8$ Mtons/an

Nous sommes
environ 8 miliards

Il faut émettre:
1 tonne CO₂
/personne/an

Utilisons notre tonne pour conduire



Quatre-vingt-dix-neuvième année - N° 5806	5 safar 1431 (21 janvier 2010)																																	
	ISSN 0851 - 1217																																	
ROYAUME DU MAROC																																		
BULLETIN OFFICIEL																																		
EDITION DE TRADUCTION OFFICIELLE																																		
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th rowspan="2" style="text-align: center; padding: 5px;">EDITIONS</th> <th colspan="2" style="text-align: center; padding: 5px;">TARIFS D'ABONNEMENT</th> <th rowspan="2" style="text-align: center; padding: 5px;">ABONNEMENT IMPRIMERIE OFFICIELLE RABAT - CIELAH Tél. : 0537.76.50.24 - 0537.76.50.25 0537.76.54.13 Compte n° : 310 810 101 402900442310 33 ouvert à la Trésorerie Préfectorale de Rabat au nom du régisseur des recettes de l'imprimerie officielle</th> </tr> <tr> <th style="text-align: center; padding: 5px;">AU MAROC</th> <th style="text-align: center; padding: 5px;">A L'ETRANGER</th> </tr> <tr> <th style="text-align: center; padding: 5px;">6 mois</th> <th style="text-align: center; padding: 5px;">1 an</th> <th></th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td style="padding: 5px;">Edition générale.....</td><td style="text-align: center; padding: 5px;">250 DH —</td><td style="text-align: center; padding: 5px;">400 DH 200 DH</td><td style="padding: 5px;">A destination de l'étranger, par voies ordinaires, aériennes ou de la poste rapide interna- tionale, les tarifs prévus ci- dessous sont majorés des frais d'envoi, tel qu'ils sont fixés par la réglementation postale en vigueur.</td></tr> <tr> <td style="padding: 5px;">Edition des débats de la Chambre des Représentants.....</td><td style="text-align: center; padding: 5px;">—</td><td style="text-align: center; padding: 5px;">200 DH</td><td></td></tr> <tr> <td style="padding: 5px;">Edition des débats de la Chambre des Conseillers.....</td><td style="text-align: center; padding: 5px;">200 DH</td><td style="text-align: center; padding: 5px;">300 DH</td><td></td></tr> <tr> <td style="padding: 5px;">Edition des annonces légales, judiciaires et administratives.....</td><td style="text-align: center; padding: 5px;">250 DH 300 DH</td><td style="text-align: center; padding: 5px;">300 DH 400 DH</td><td></td></tr> <tr> <td style="padding: 5px;">Edition des annonces relatives à l'immatrication forcée.....</td><td style="text-align: center; padding: 5px;">150 DH</td><td style="text-align: center; padding: 5px;">200 DH</td><td></td></tr> <tr> <td style="padding: 5px;">Edition de traduction officielle.....</td><td style="text-align: center; padding: 5px;">—</td><td style="text-align: center; padding: 5px;">—</td><td></td></tr> </tbody> </table>	EDITIONS	TARIFS D'ABONNEMENT		ABONNEMENT IMPRIMERIE OFFICIELLE RABAT - CIELAH Tél. : 0537.76.50.24 - 0537.76.50.25 0537.76.54.13 Compte n° : 310 810 101 402900442310 33 ouvert à la Trésorerie Préfectorale de Rabat au nom du régisseur des recettes de l'imprimerie officielle	AU MAROC	A L'ETRANGER	6 mois	1 an		Edition générale.....	250 DH —	400 DH 200 DH	A destination de l'étranger, par voies ordinaires, aériennes ou de la poste rapide interna- tionale, les tarifs prévus ci- dessous sont majorés des frais d'envoi, tel qu'ils sont fixés par la réglementation postale en vigueur.	Edition des débats de la Chambre des Représentants.....	—	200 DH		Edition des débats de la Chambre des Conseillers.....	200 DH	300 DH		Edition des annonces légales, judiciaires et administratives.....	250 DH 300 DH	300 DH 400 DH		Edition des annonces relatives à l'immatrication forcée.....	150 DH	200 DH		Edition de traduction officielle.....	—	—		<p>L'édition de traduction officielle contient la traduction officielle des lois et règlements ainsi que le texte en langue étrangère des accords internationaux lorsqu'aux termes de ces accords, ledit texte fait foi, soit seul, soit conjointement avec le texte arabe</p>
EDITIONS		TARIFS D'ABONNEMENT			ABONNEMENT IMPRIMERIE OFFICIELLE RABAT - CIELAH Tél. : 0537.76.50.24 - 0537.76.50.25 0537.76.54.13 Compte n° : 310 810 101 402900442310 33 ouvert à la Trésorerie Préfectorale de Rabat au nom du régisseur des recettes de l'imprimerie officielle																													
	AU MAROC	A L'ETRANGER																																
6 mois	1 an																																	
Edition générale.....	250 DH —	400 DH 200 DH	A destination de l'étranger, par voies ordinaires, aériennes ou de la poste rapide interna- tionale, les tarifs prévus ci- dessous sont majorés des frais d'envoi, tel qu'ils sont fixés par la réglementation postale en vigueur.																															
Edition des débats de la Chambre des Représentants.....	—	200 DH																																
Edition des débats de la Chambre des Conseillers.....	200 DH	300 DH																																
Edition des annonces légales, judiciaires et administratives.....	250 DH 300 DH	300 DH 400 DH																																
Edition des annonces relatives à l'immatrication forcée.....	150 DH	200 DH																																
Edition de traduction officielle.....	—	—																																
N° 5806 — 5 safar 1431 (21-1-2010)	BULLETIN OFFICIEL	35																																
Décret n° 2-10-7 du 21 moharrém 1431 (7 janvier 2010) portant délégation de pouvoirs au ministre délégué auprès du Premier ministre, chargé de la modernisation des secteurs publics.	Décret n° 2-09-286 du 20 hija 1430 (8 décembre 2009) fixant les normes de qualité de l'air et les modalités de surveillance de l'air.																																	
LE PREMIER MINISTRE, Vu la Constitution, notamment son article 64 ; Vu le décret n° 1-07-194 du 6 ramadan 1428 (19 septembre 2007) nommant M. Abbas El Fassi, Premier ministre,	LE PREMIER MINISTRE, Vu la loi n° 13-03 relative à la lutte contre la pollution de l'air promulguée par décret n° 1-03-61 du 10 rabbi 1424 (12 mai 2003), notamment ses articles 3, 4 et 24 ;																																	
Vu le décret n° 2-07-1303 du 4 kaâda 1428 (15 novembre 2007) relatif aux attributions de la ministre de l'énergie, des mines, de l'eau et de l'environnement ;	Vu le décret n° 2-00-022 du 6 châbaï 1420 (12 janvier 2009)																																	

Maroc: Réglementation des éléments polluants de l'atmosphère

Polluants	Nature du seuil	Valeurs limites
Dioxyde de soufre (SO₂) µg/m³	Valeur limite pour la protection de la santé	125 centile 99,2 des moyennes journalières.
	Valeur limite pour la protection des écosystèmes	20 moyenne annuelle.
Dioxyde d'azote (NO₂) µg/m³	Valeurs limites pour la protection de la santé	200 centile 98 des moyennes horaires 50 moyenne annuelle
	Valeur limite pour la protection de la végétation	30 moyenne annuelle.
Monoxide carbone (CO) mg/m³	Valeur limite pour la protection de la santé	10 le maximum journalier de la moyenne glissante sur 8 h.
Matières en Suspension µg/m³	Valeurs limites pour la protection de la santé	50 centile 90,4 des moyennes journalière ; MP10.
Plomb (Pb) µg/m³	Valeur limite pour la protection de la santé	1 moyenne annuelle.
Cadmium (Cd) ng/m³	Valeur limite pour la protection de la santé	5 moyenne annuelle.
Ozone (O₃) µg/m³	Valeur limite pour la protection de la santé	110 moyenne sur une plage de 8h
	Valeur limite pour la protection de la végétation	65 moyenne journalière ne devant pas être dépassée plus de 3 jours consécutifs)
Benzène (C₆H₆) µg/m³	Valeur limite pour la protection de la santé	10 moyenne annuelle

- SO₂ ou dioxyde de soufre (valeur limite pour la protection de la santé humaine : centile 99,7 des moyennes horaires de l'année civile : 350 µg/m³ ; centile 99,2 des moyennes journalières de l'année civile : 125 µg/m³ ; valeur limite pour la protection des écosystèmes : 20 µg en moyenne annuelle et 20 µg/m³ en moyenne sur l'hiver). Le SO₂ est très irritant et toxique, il provient principalement des combustions fossiles ;
- PS₁₀ (valeur limite pour la protection de la santé : centile 90,4 : 50 µg/m³ des moyennes journalières de l'année civile ; moyenne annuelle : 40 µg/m³). Ce sont surtout les particules en suspension dont le diamètre est inférieur à 10 microns qui sont importantes (elles peuvent pénétrer profondément dans les voies respiratoires chargées de composés toxiques) ;
- NO₂ ou dioxyde d'azote (valeur limite pour la protection de la santé humaine : centile 98 des moyennes horaires de l'année civile : 240 µg/m³, en 2006 ; moyenne annuelle : 48 µg/m³, en 2006 ; valeur limite pour la protection de la végétation (en zone éloignée d'habitation, d'industrie ou d'autoroute : 30 µg/m³ en NO_x, avec NO_x = NO + NO₂, ces deux polluants étant exprimés en NO₂). Il provient également des combustions fossiles et altère les fonctions respiratoires) ;
- O₃ ou ozone (valeur limite pour la protection de la santé humaine : maximum journalier de la moyenne glissante sur 8 heures : 120 µg/m³ ; valeur limite pour la protection de la végétation (AOT 40), calculée à partir de valeurs moyennes horaires mesurées de mai à juillet : 18 000 µg/m³·h (moyenne calculée sur 5 ans). L'ozone se forme, sous l'action de la lumière, à partir du SO₂ et du NO₂ et provoque les mêmes effets) ;
- CO ou monoxyde de carbone (valeur limite pour la protection de la santé humaine : 10 mg/m³ pour le maximum journalier de la moyenne sur 8 heures) ;
- benzène (valeur limite pour la protection de la santé humaine : 9 µg/m³ en 2006) ;
- métaux lourds : cadmium (Cd), nickel (Ni), arsenic (As), plomb (Pb), mercure (Hg) ;

Unités

- Microgramme par m³ ($\mu\text{g.m}^{-3}$) : Unité peu utilisée pour les gaz
 - 1 ppmv = $40.9 \times M_{\text{gaz}} \mu\text{g/m}^3$ (1 Atm, 25°C)
 - 1 ppbv = $0.0409 \times M_{\text{gaz}} \mu\text{g/m}^3$
 - 1 pptv = $(4.09 \cdot 10^{-5}) \times M_{\text{gaz}} \mu\text{g/m}^3$
- Plus courante pour la matière particulaire

Exercice 1.1 (Masse molaire de l'air)

Combien vaut la masse molaire de l'air sec ?

Données : $M_{\text{N}_2} = 28 \text{ g mol}^{-1}$, $M_{\text{O}_2} = 32 \text{ g mol}^{-1}$ et $M_{\text{Ar}} = 40 \text{ g mol}^{-1}$.

Réponse :

On note M_{X_i} la masse molaire de l'espèce X_i . Avec $M_{\text{air}} = \sum_i C_{X_i} M_{X_i}$, en ne gardant que les trois premiers composés, on obtient $M_{\text{air}} \simeq 28.9 \text{ g mol}^{-1}$.