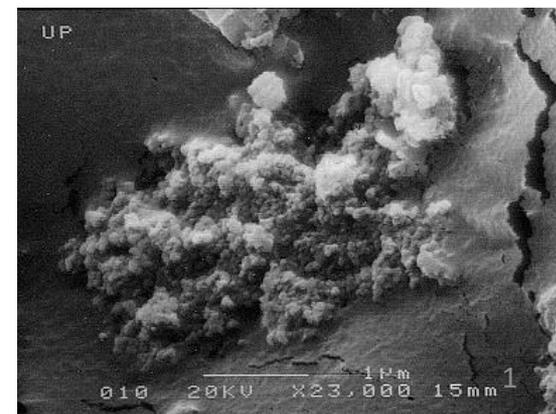
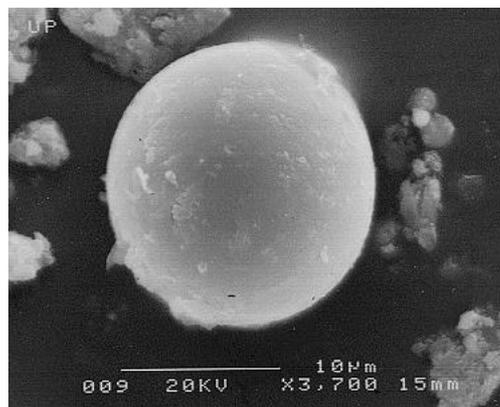
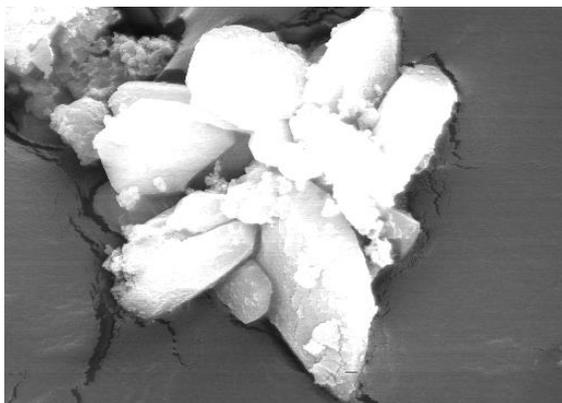




UE Aérosols : Physique et Chimie

- ❑ Introduction, 1h30 (Karine Desboeufs: Prof UPC, LISA, desboeufs@lisa.ipsl.fr)
- ❑ Chimie des aérosols, 13h30 (Karine Desboeufs)
- ❑ Physique des aérosols, 15h (Evelyne Géhin: Prof. UPEC, CERTES)

Cours d'intro et chimie dispo sur <http://www.lisa.upec.fr/~desboeufs/>



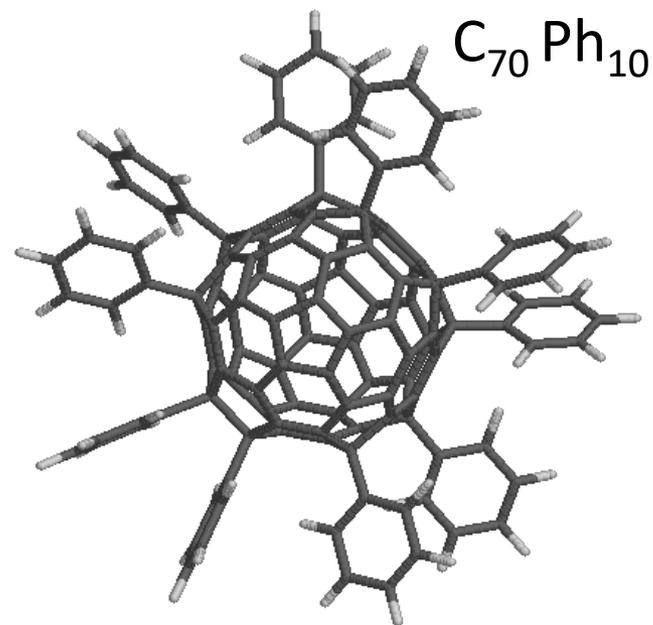
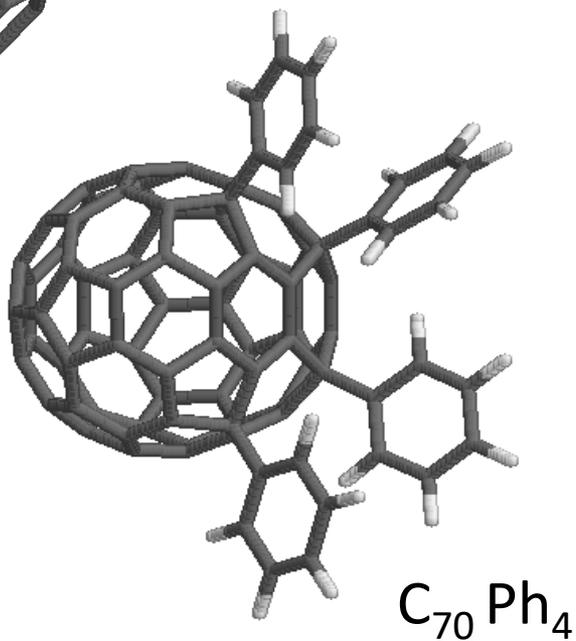
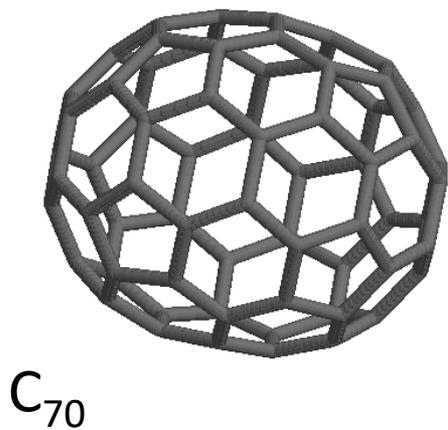
Aérosols: Définitions

Un aérosol est....

- ...une particule solide et/ou liquide en suspension dans un gaz, dont la vitesse de chute (*sédimentation*) est négligeable
 - Donc au moins un système **biphasique**
 - Couramment, le terme « aérosol » est assimilé à la **fraction particulaire** de l'atmosphère:
 - souvent on « oublie » la phase gazeuse entourant qui est pourtant en interaction permanente avec les particules (l'aérosol est un système très dynamique)
 - Schmauß, 1920 au sujet des nuages: "Rien n'empêche la poussière [le contexte parle toujours de l'eau] d'être appelée une solution colloïdale d'eau [gouttelettes] dans l'air. Puisque les solutions de colloïdes dans l'eau sont appelées hydrosols, la poussière devrait être appelée un **aérosol**". Il est intéressant de noter, qu'à cette époque l'aérosol et les nuages étaient considérés comme une entité, l'aérosol atmosphérique.

Définitions: particules?

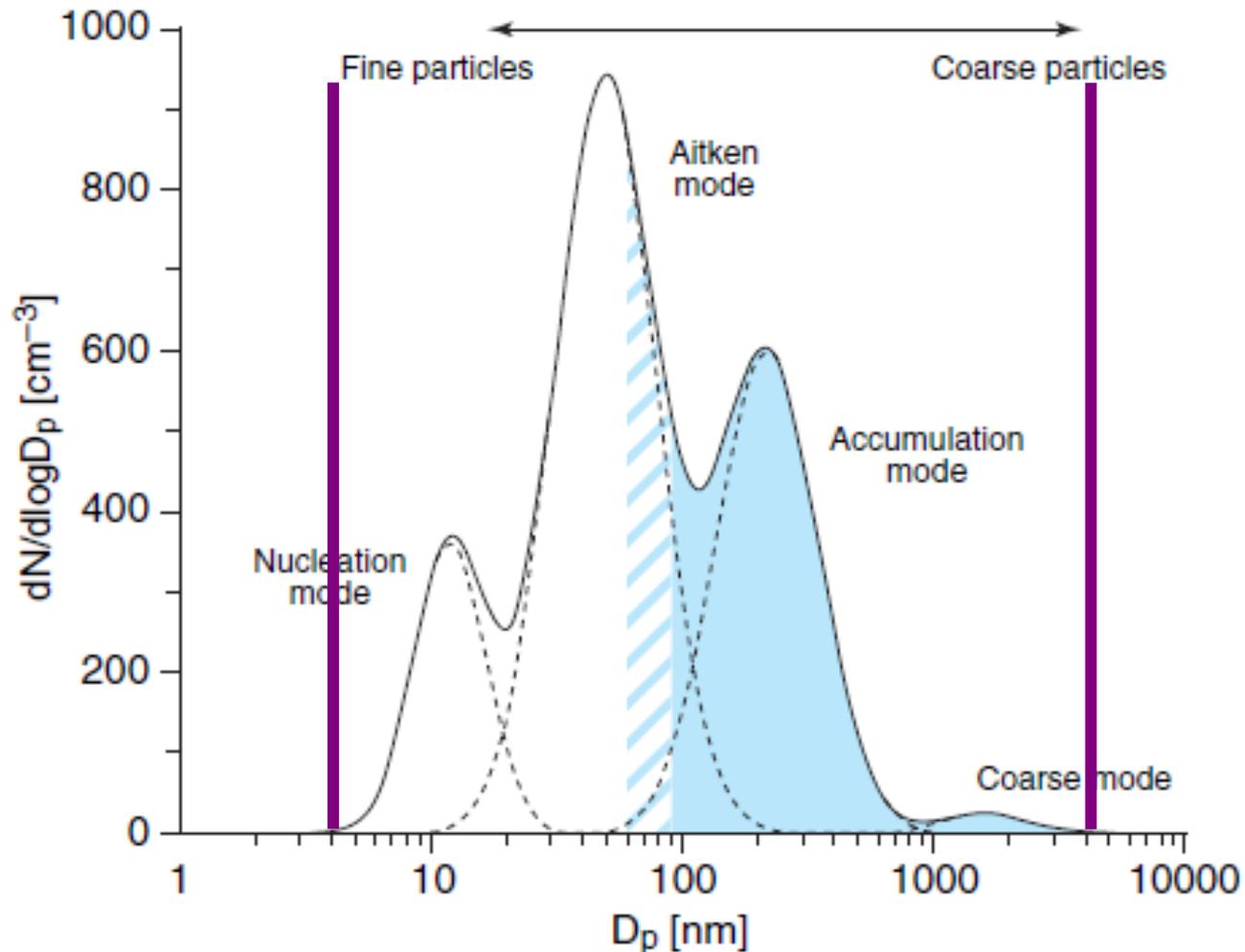
Les fullerènes : Un aérosol ?



1 cycle benzénique ~ 0.5 nm (ou 5 Å)

Aérosols: Définitions

Particules en suspension dans l'atmosphère



Le **spectre granulométrique** s'étend sur 4 ordres de grandeur (3nm à ~30μm)

Aérosols: Classification

On va distinguer les différents types d'aérosols atmosphériques en fonction de :

- Leur source
- Leur taille/forme
- Leur processus de formation
- Leur composition chimique

Différents types d'aérosols: sources

Différenciation des sources en deux types:

- Sources **Anthropiques** liées aux activités humaines
- Sources **Naturelles**



Aérosols industriels



Feux de forêt

Aérosols de
combustion
automobile



Aérosols biogéniques



Poussières désertiques



Sels de mer

Différents types d'aérosols: sources

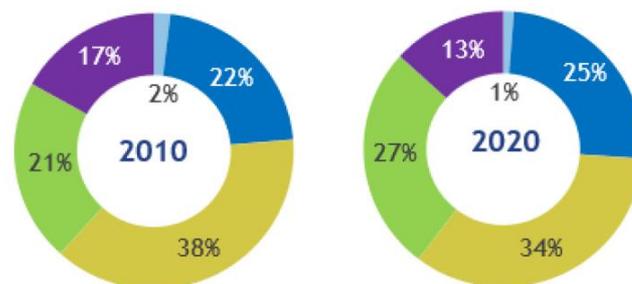
Différenciation des sources en deux types:

- Sources Anthropiques liées aux activités humaines
- Sources Naturelles

Emission	Amount, Tg/yr [10^6 tons/yr]	
	Range	Best Estimate
Natural sources	2200 - 24000	3100
Anthropogenic sources	320 - 640	460

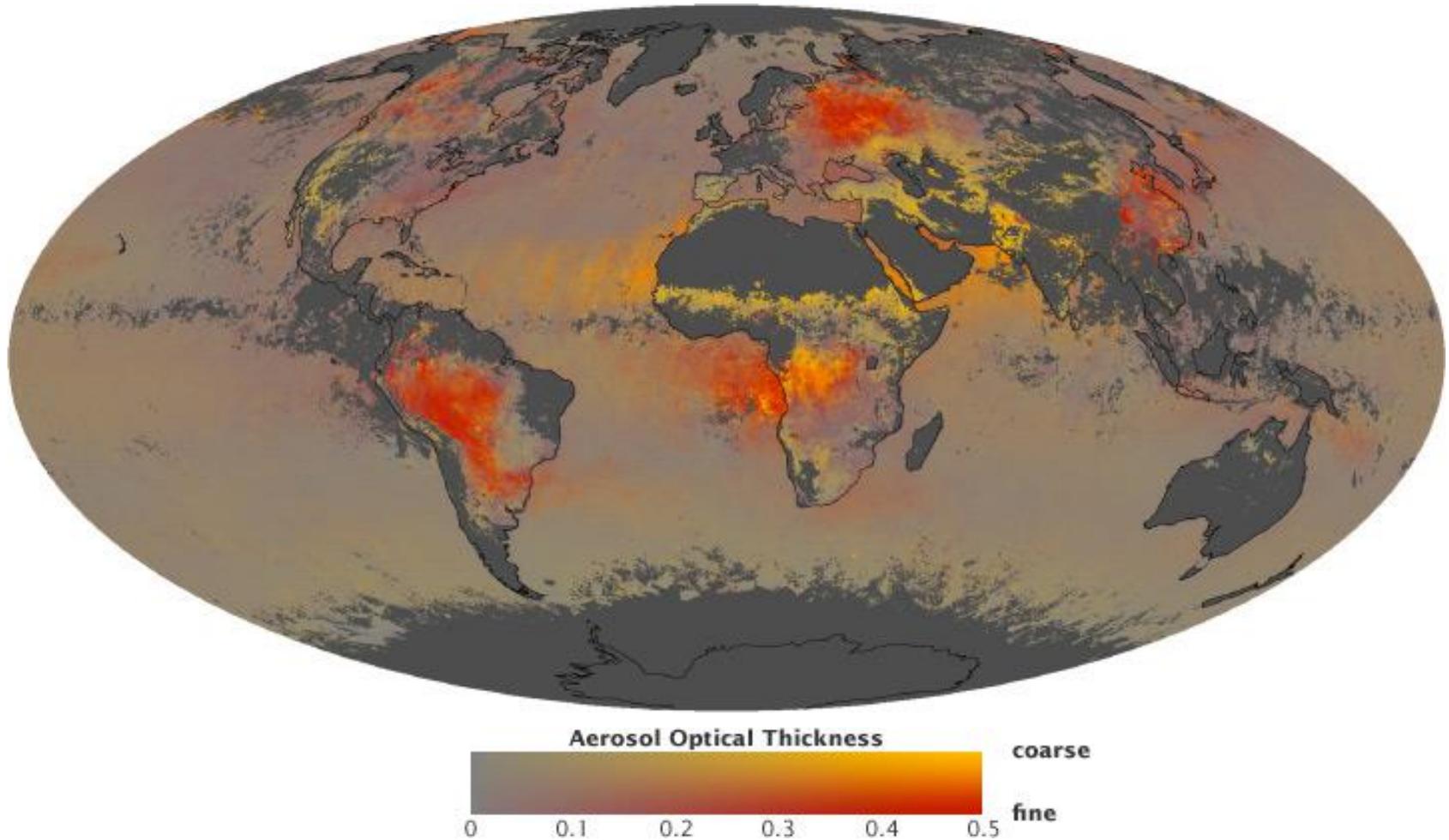
(Reference: W.C. Hinds, Aerosol Technology, 2nd Edition, Wiley Interscience)

Répartition des émissions anthropiques de PM10 par secteur d'activité en France:



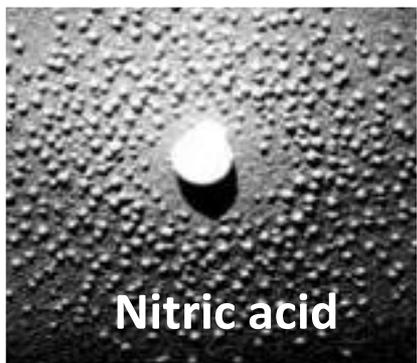
Source: CITEPA

Différents types d'aérosols: sources



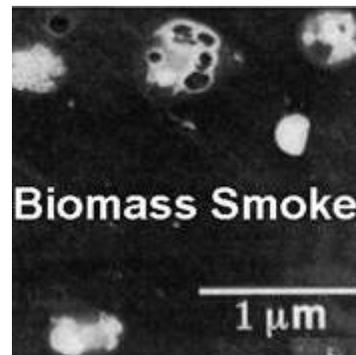
➔ Epaisseur optique en aérosols (AOT ou AOD) représente la quantité d'aérosols sur la colonne atmosphérique (0.1 = ciel clair, 0.5 = très chargé)

Différents types d'aérosols: formes/tailles

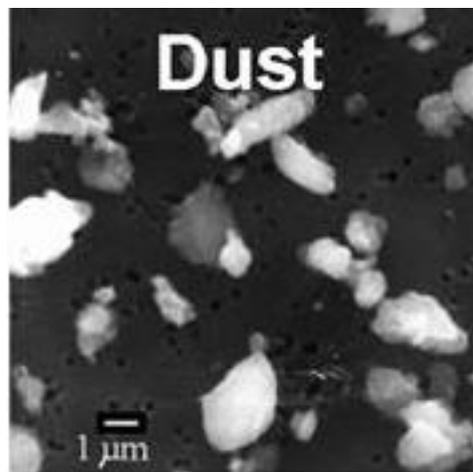
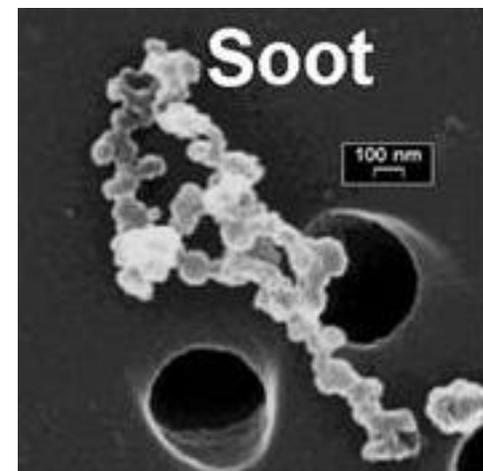


Aérosols industriels
(Sulfate/Nitrate)

Feux de forêt

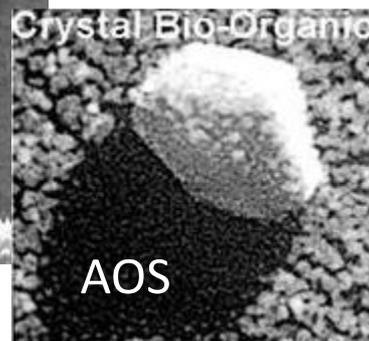
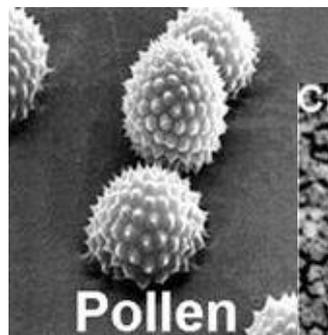


Aérosols de combustion
(Suies)

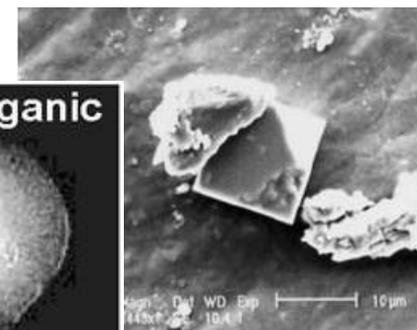


Poussières désertiques

Aérosols biogéniques



Sels de mer



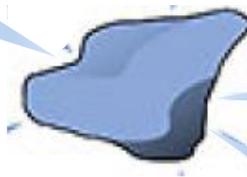
Différents types d'aérosols: formes/tailles

Cette grande diversité de tailles et formes fait qu'on utilise deux notions pour décrire un aérosol:

-Le **diamètre** (nm, μm):



Diamètre aérodynamique :
diamètre d'une particule
sphérique qui a une masse
volumique de 1 g/cm^3 et qui a la
même vitesse de sédimentation
dans un fluide que la particule
étudiée.

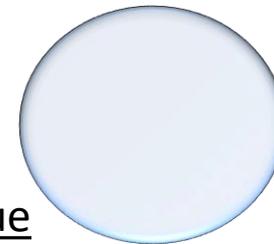


Diamètre équivalent
(de la sphère ayant la même masse)



Diamètre géométrique

(équivalent d'une enveloppe sphérique)



Différents types d'aérosols: formes/tailles

Cette grande diversité de tailles et formes fait qu'on utilise deux notions pour décrire un aérosol:

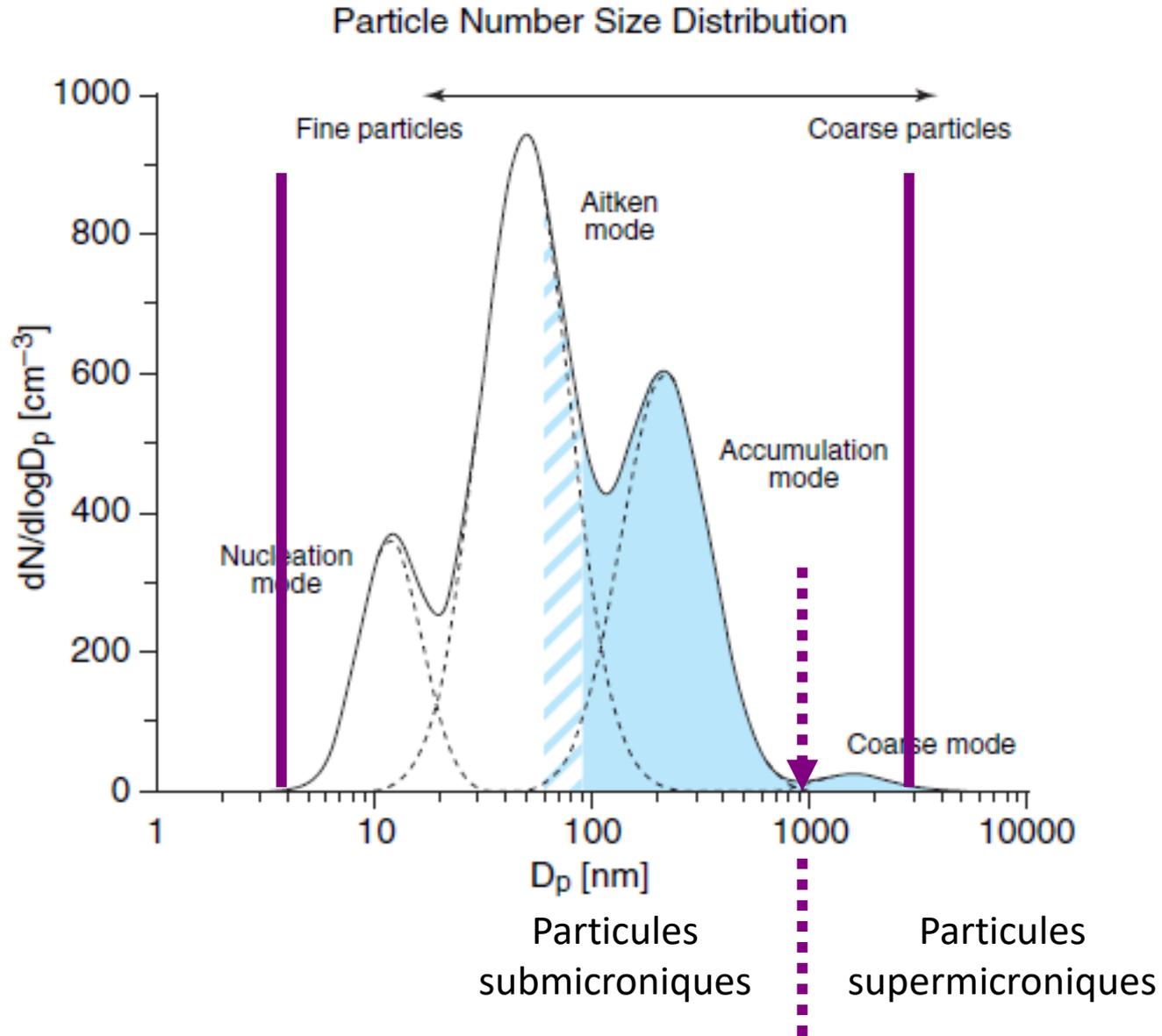
-Le **diamètre** (nm, μm):

-aérodynamique : diamètre d'une particule sphérique qui a une masse volumique de 1 g/cm^3 et qui a la même vitesse de sédimentation dans un fluide que la particule étudiée.

- géométrique (équivalent d'une enveloppe sphérique),
équivalent (de la sphère ayant la même masse), de giration...

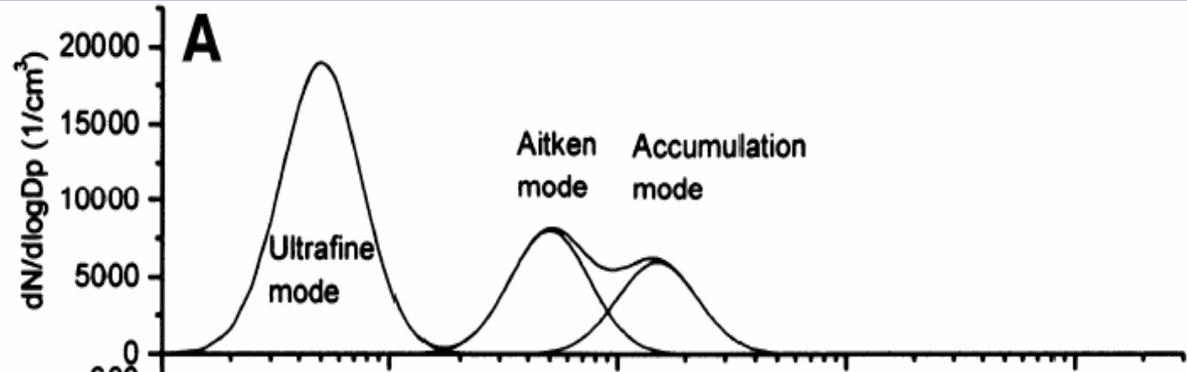
- La **surface spécifique** ($\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$): superficie réelle de la surface d'un objet par opposition à sa surface apparente

Différents types d'aérosols: tailles



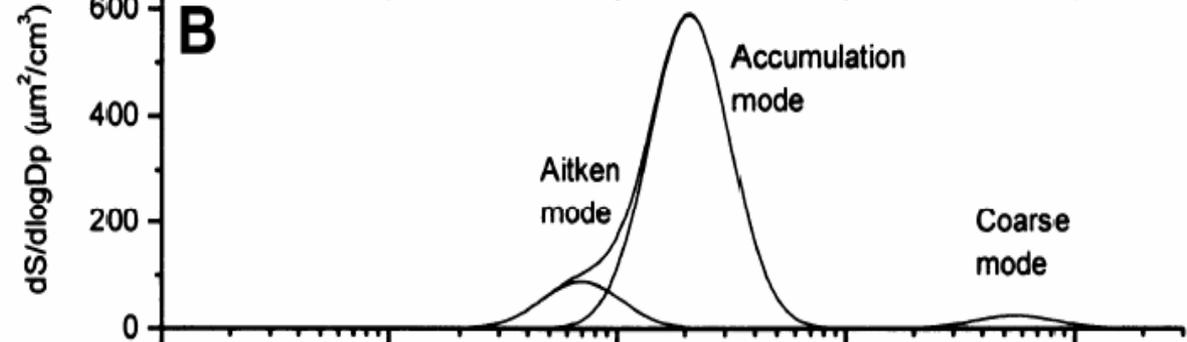
Distributions en Log-normal

Distribution en nombre \rightarrow
 $n_n(\log D_p) = dN/d \log D_p$



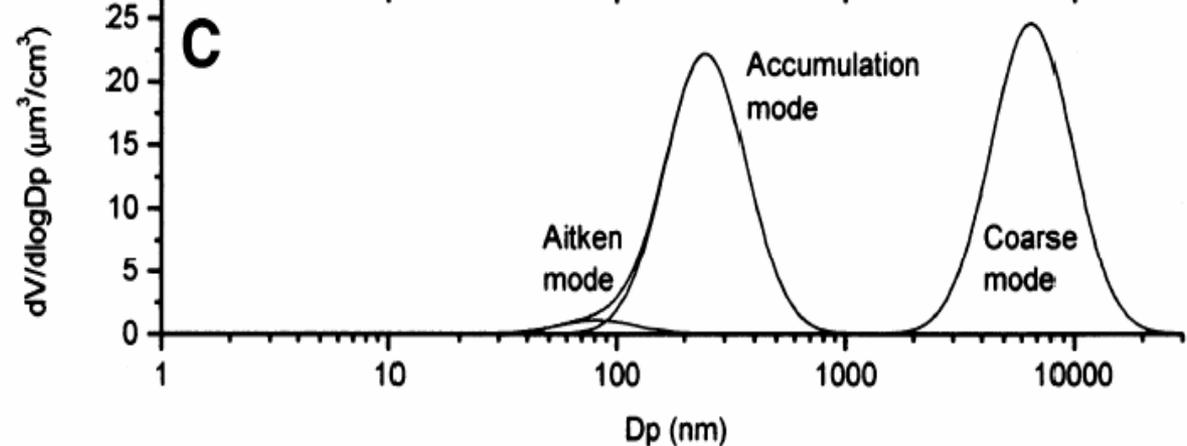
Distribution en surface \rightarrow
 $n_s(\log D_p) = dS/d \log D_p$

$$S = N * 4\pi R^2$$



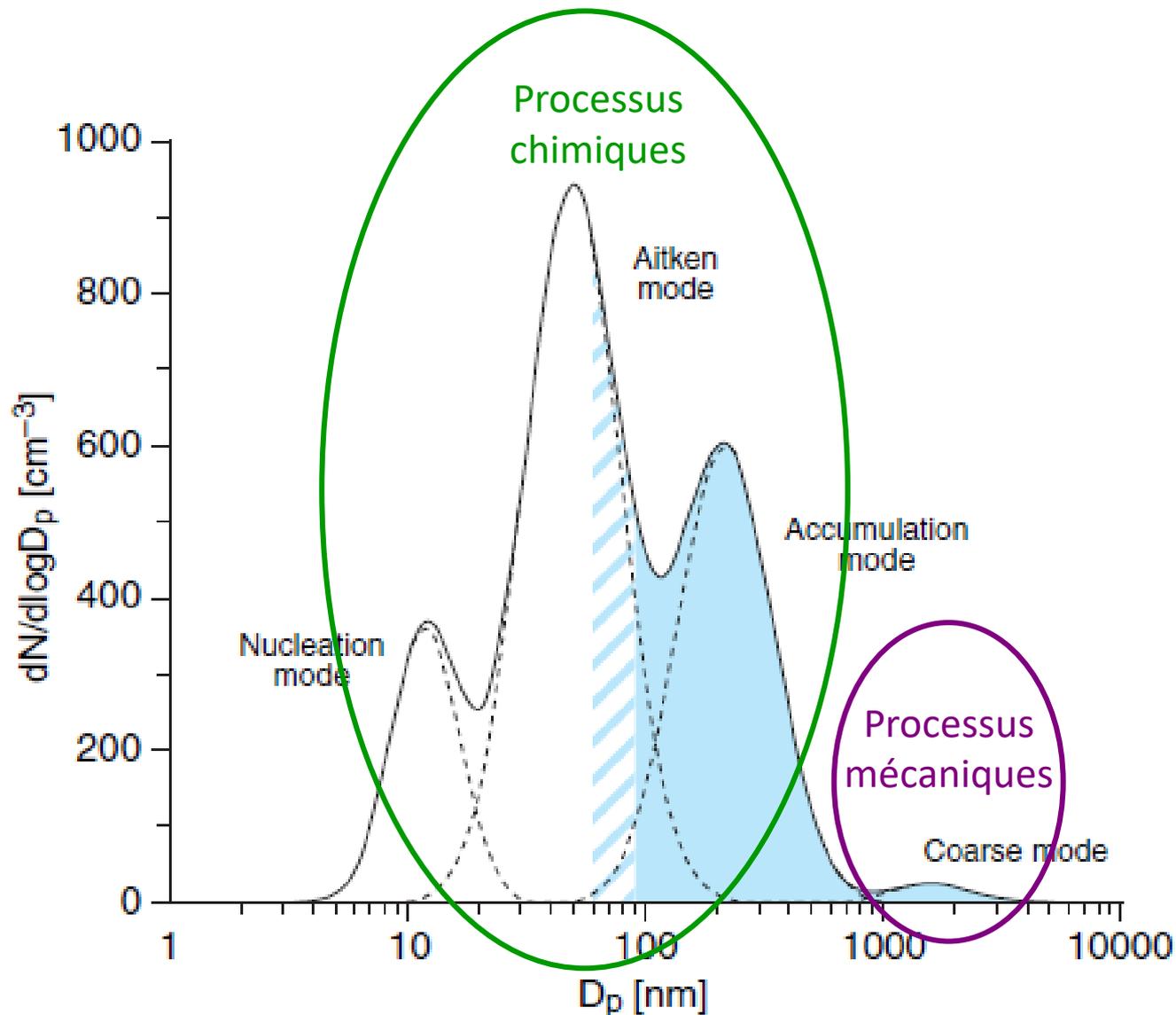
Distribution en volume \rightarrow
 $n_v(\log D_p) = dV/d \log D_p$

$$V = N * 4/3\pi R^3 \approx m$$



Q: Combien faut-il de particules de 0.01 μm pour faire la même masse qu'1 particule de 1 μm?

Différents types d'aérosols: Tailles

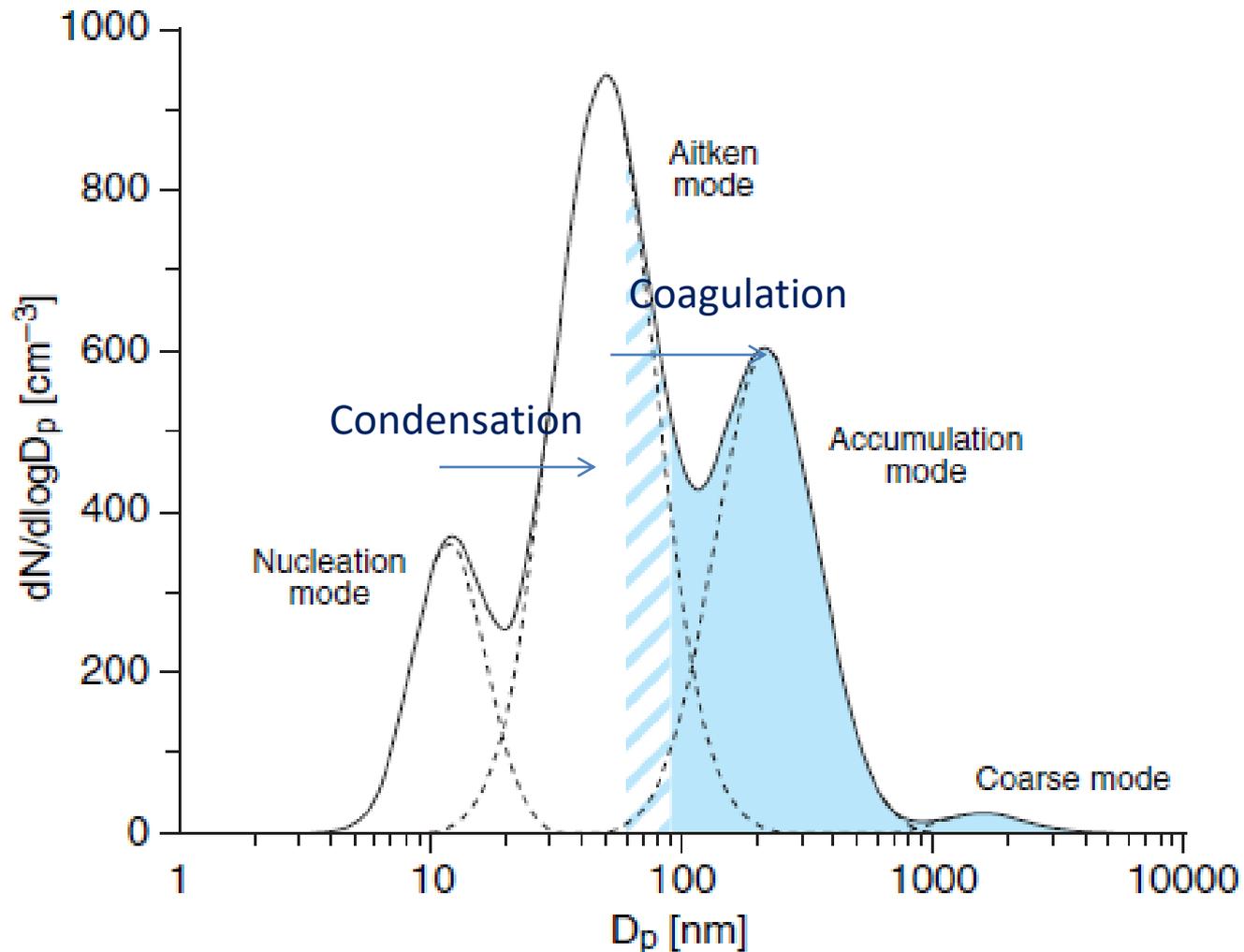


Différents types d'aérosols: Processus de formation

- **Aérosol Primaire:** un aérosol **émis directement** dans l'atmosphère en tant que tel:
 - par **action mécanique** de l'eau, du gel ou du vent sur les roches, les sols, l'océan, la végétation..
 - lors d'activités industrielles telles que la plâtrerie et la cimenterie, la construction de bâtiment
 - par usure de matériaux de synthèse tels que les pneus, les revêtements des routes
 - lors de processus de **combustion** tels que les feux de forêt, les éruptions volcaniques, les incinérateurs, les transports, les usines électriques...
- **Aérosol Secondaire:** un aérosol qui est formé dans l'atmosphère par processus chimique de **nucléation/condensation** à partir de **précurseurs gazeux (conversion gaz-particules)**.

Attention: Ne pas confondre aérosols primaires et aérosols produits par processus mécaniques.

Différents types d'aérosols: Tailles

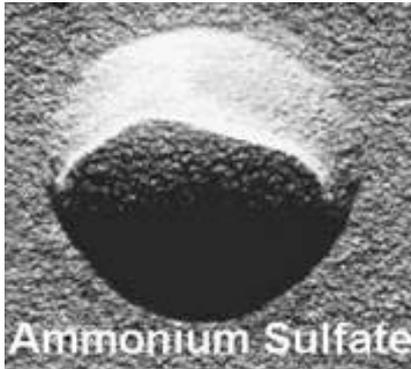


Différents types d'aérosols: Composition chimique

Phase inorganique

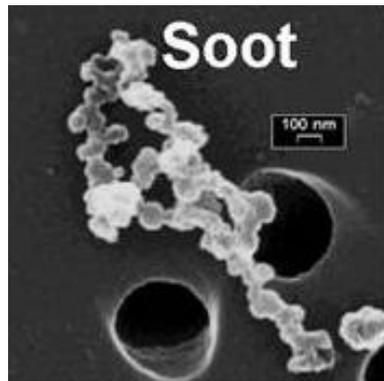
Phase minérale

Qui ne contient pas de carbone



Carbone élémentaire

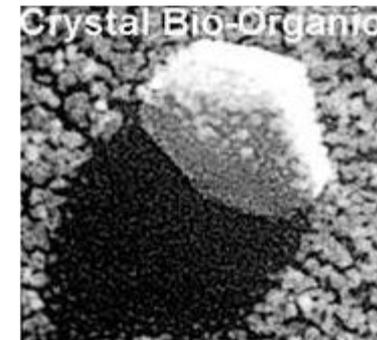
Qui contient du carbone élémentaire



Phase organique

Phase carbonée

Qui contient du carbone hydrogéné



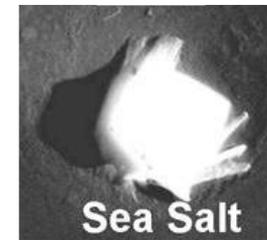
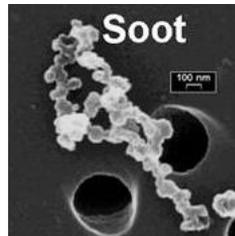
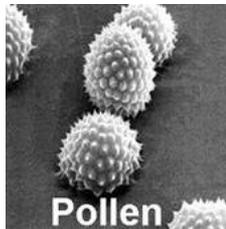
Différents types d'aérosols: Classification

Du fait de la diversité des caractéristiques des aérosols, il y a différents types de classifications:

- Aérosols fins ou grossiers
- Aérosols anthropiques ou naturels
- Aérosols primaires ou secondaires
- Aérosols produits par processus mécaniques ou chimiques
- Aérosols organiques ou inorganiques

➔ **Les différentes classifications ne se superposent pas et sont imbriquées les unes dans les autres.**

Q: Quelles sont les classification de chacun de ces aérosols?

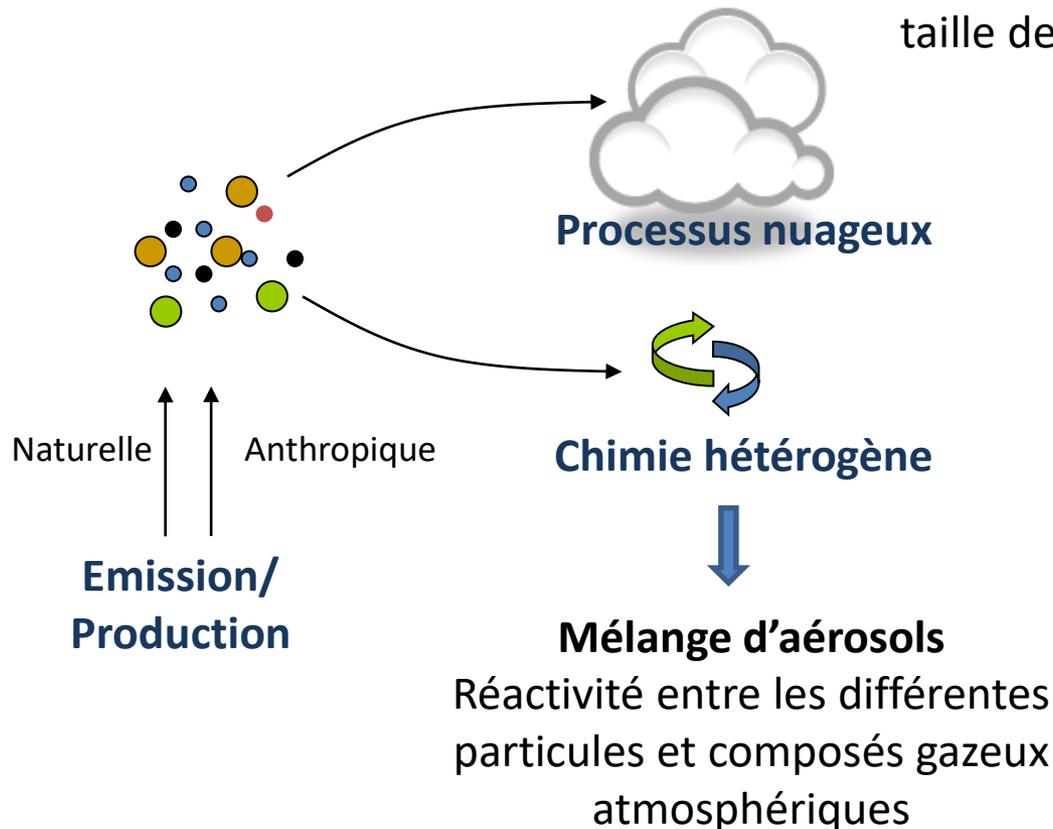


➔ **Toutes les classifications sont utilisées, on utilisera celle qui sera la plus pertinente par rapport à la question posée.**

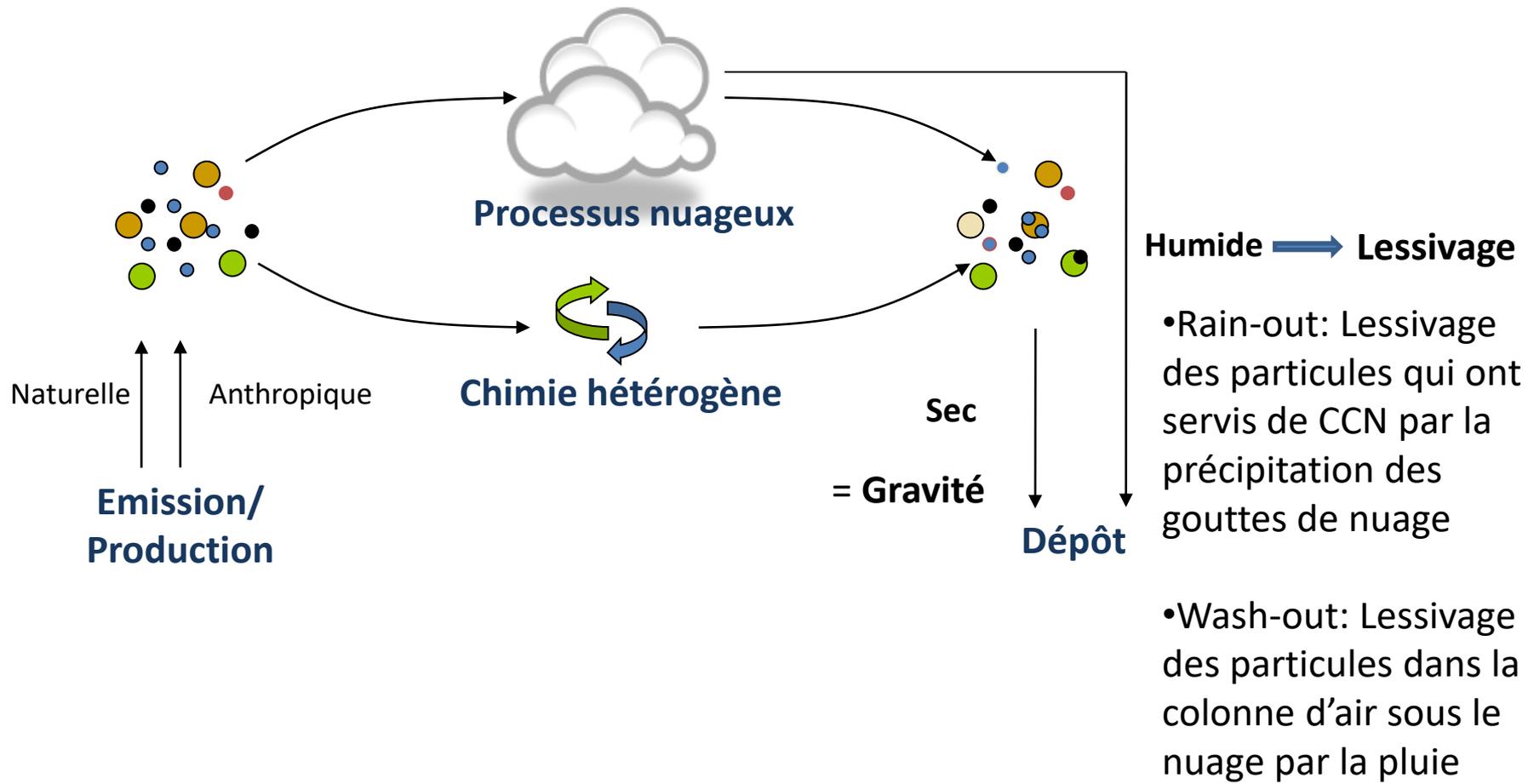
Cycle des aérosols atmosphériques

**Noyaux de Condensation Nuageuse
(CCN: Cloud Condensation Nuclei)**

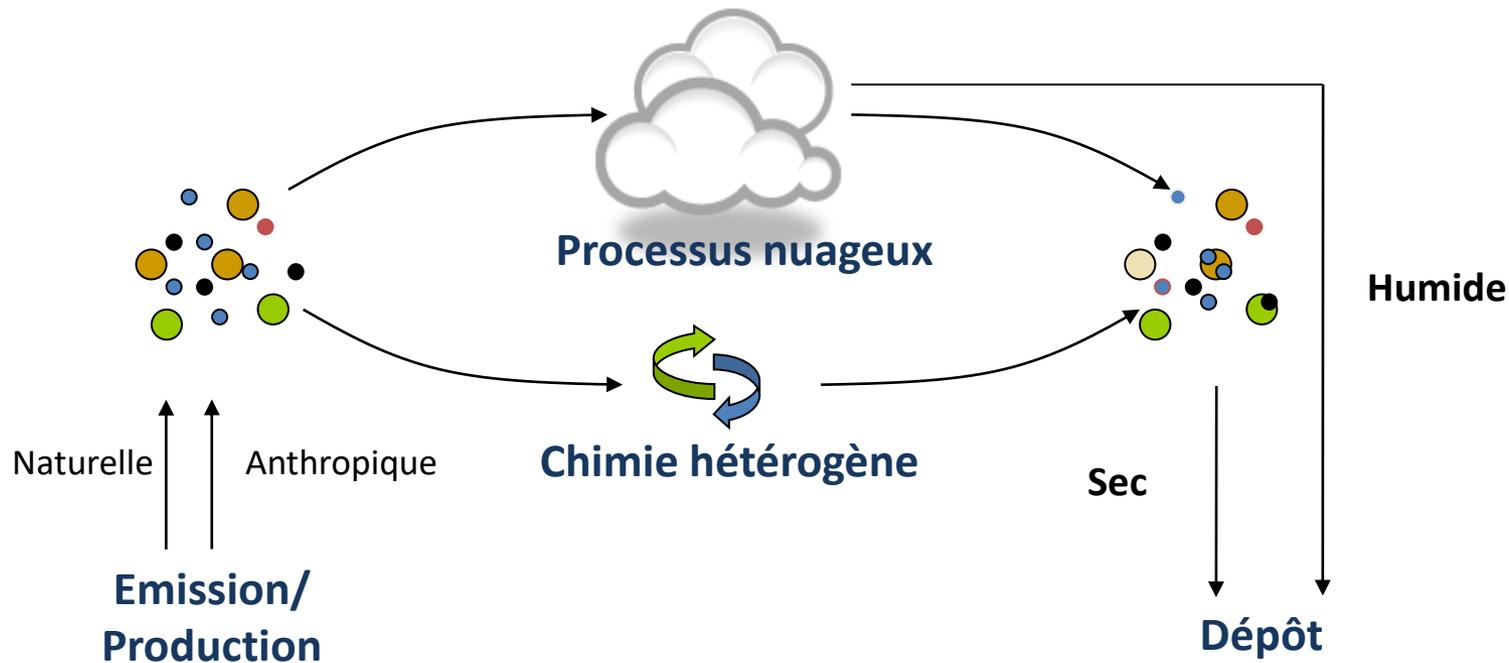
Hygroscopicité dépend fortement de
la composition chimique et de la
taille des aérosols.



Cycle des aérosols atmosphériques



Cycle des aérosols atmosphériques

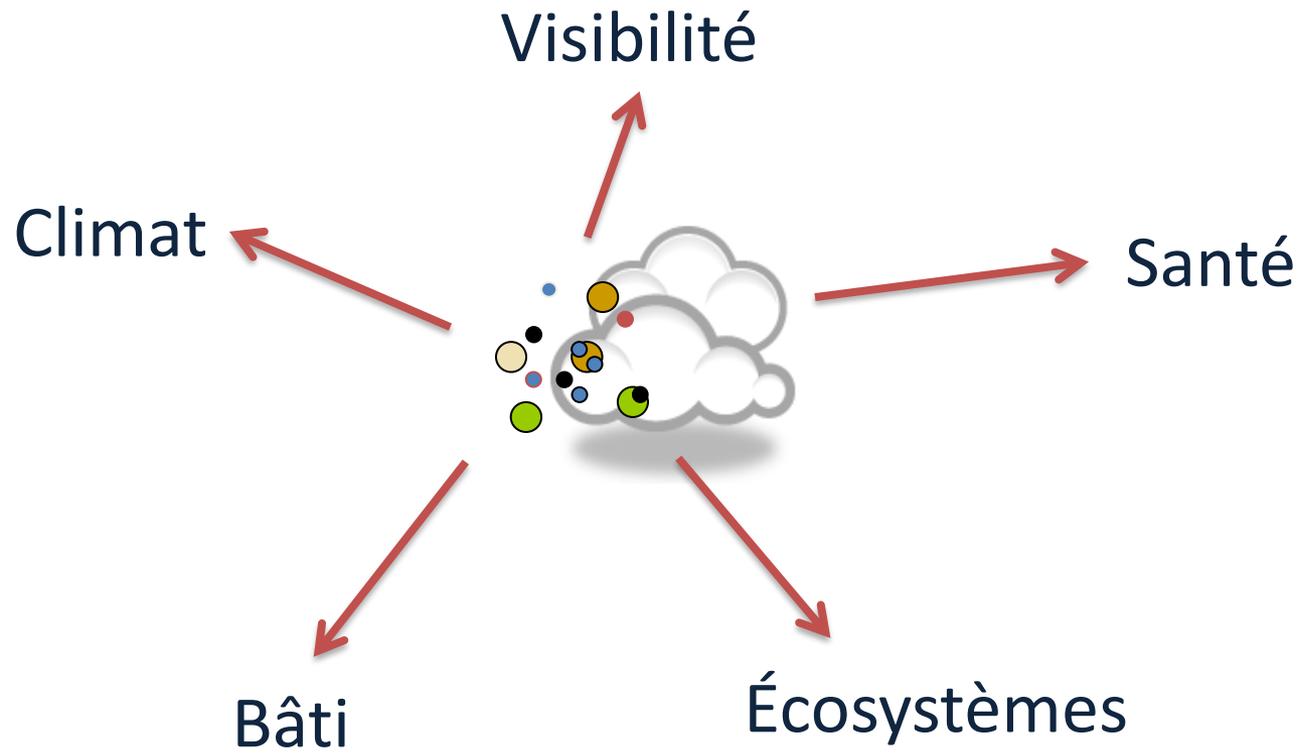


➔ Durée de vie d'un aérosol dans l'atmosphère de quelques heures à quelques semaines

Ils peuvent parcourir jusqu'à plus de 10 000km (transport intercontinental)

Q: Quels sont les aérosols qui ont la plus longue durée de vie dans l'atmosphère? Pourquoi?

Impacts environnementaux des aérosols



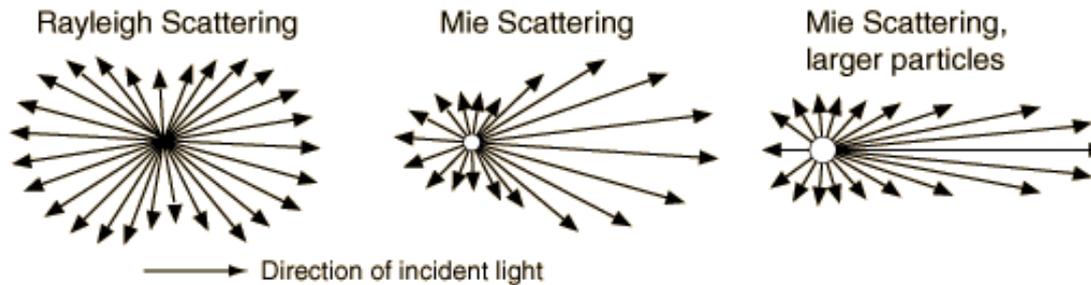
Impacts environnementaux des aérosols: le **climat**

- 1. Impacts directs:** liés à l'interaction directe des particules avec le rayonnement solaire et/ou tellurique
- 2. Impacts indirects:** liés à l'interaction des nuages formés à partir des aérosols avec le rayonnement solaire et/ou tellurique
- 3. Impact semi-direct:** lié au réchauffement induit par l'interaction directe des particules avec le rayonnement solaire et/ou tellurique.

Impacts directs sur le climat

Propriétés optiques des aérosols:

- **Diffusion** du rayonnement (Scattering)



- **Absorption** (Absorption) et libération sous forme de chaleur

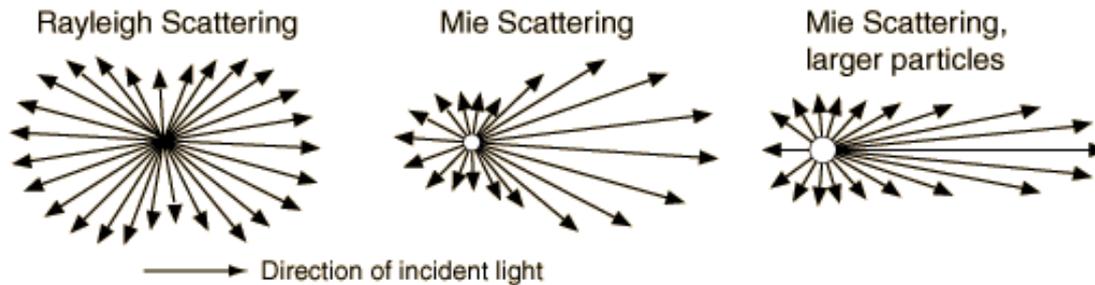
➔ Les aérosols atmosphériques agissent sur le rayonnement allant de l'UV/VISIBLE à l'Infrarouge (IR)



Impacts directs sur le climat

Propriétés optiques des aérosols:

- **Diffusion** du rayonnement (Scattering)



- **Absorption** (Absorption) et libération sous forme de chaleur

➔ -Les aérosols atmosphériques agissent sur le rayonnement allant de l'UV/VISIBLE à l'Infrarouge (IR)

-**ATTENUATION (EXTINCTION)** : est la somme des phénomènes de diffusion et d'absorption et représente l'effet total de l'atmosphère sur le rayonnement

Impacts environnementaux des aérosols: le **climat**

- 1. Impacts directs:** liés à l'interaction directe des particules avec le rayonnement solaire et/ou tellurique (Voir cours de S. Jacquemoud)
- 2. Impacts indirects:** liés à l'interaction des nuages formés à partir des aérosols avec le rayonnement solaire et/ou tellurique
- 3. Impact semi-direct:** lié au réchauffement induit par l'interaction directe des particules avec le rayonnement solaire et/ou tellurique.

Impacts indirects sur le climat

L'impact indirect est lié au rôle des aérosols sur la **formation des nuages**.



L'augmentation de la **concentration des CCN** induit **l'augmentation du nombre de gouttelettes** et la **diminution de leurs rayons**.

EFFET TWOMEY (1974)



Pour la même quantité d'eau condensée, les nuages composés de petites gouttelettes diffusent plus que ceux composés de grosses.



Augmentation de la réflectivité des nuages formés (Ramanathan et al., Science 2001), et donc **augmentation de leur albédo** (Kaufman et Koren, Science 2006 ; Penner et al., Atmos. Chem. Phys. 2006).

EFFET ALBRECHT (1989)



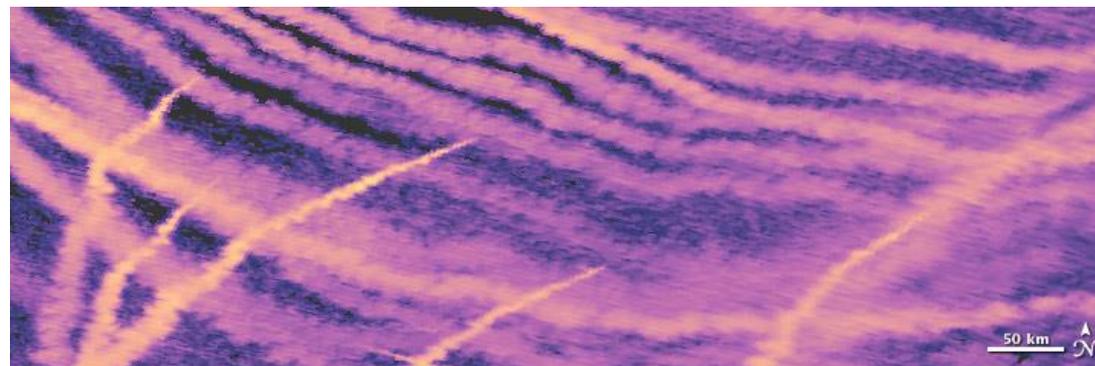
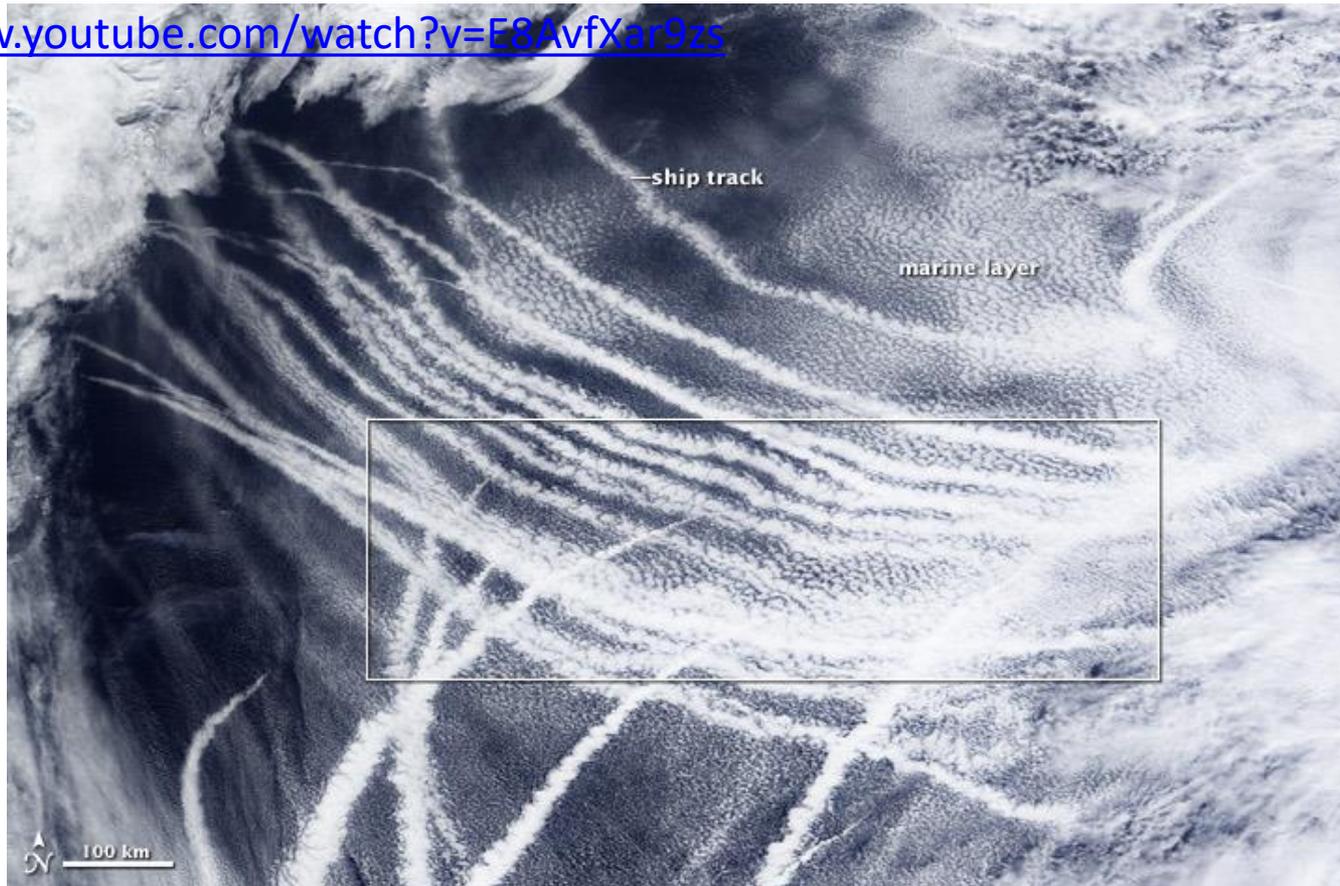
Plus les gouttelettes sont petites, plus les précipitations sont faibles et plus la durée de vie du nuage augmente.



Allongement du temps de vie des nuages, d'où **augmentation de la couverture nuageuse** et **modification du cycle de l'eau** au niveau global (Ramanathan, Science 2001; PNAS 2005)

<https://www.youtube.com/watch?v=0JtBZGXd5zo>

<https://www.youtube.com/watch?v=E8AvfXar9zs>



Cloud Droplet Radius (μm)

6 12 18 24 30

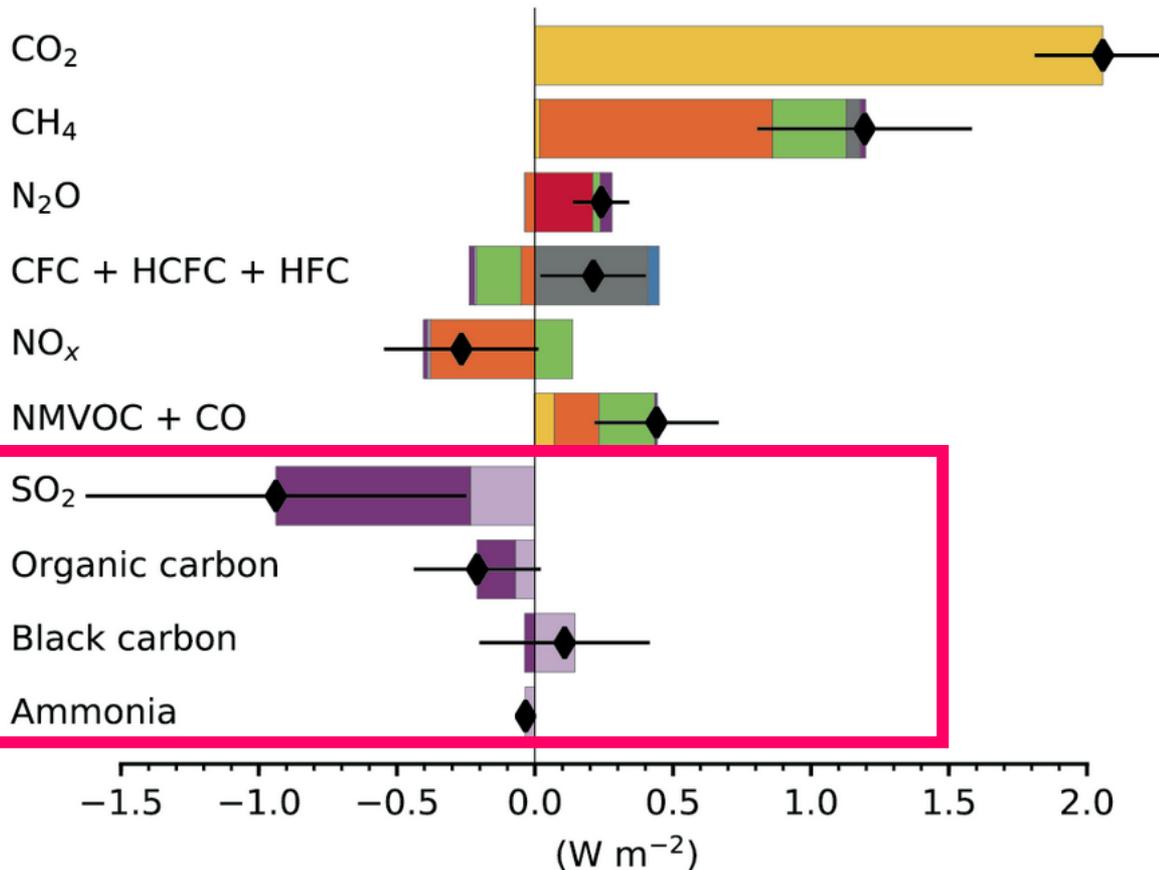
A color scale legend for the cloud droplet radius, ranging from 6 μm (dark purple) to 30 μm (yellow). The scale is marked at 6, 12, 18, 24, and 30 μm .

Impacts environnementaux des aérosols: le climat

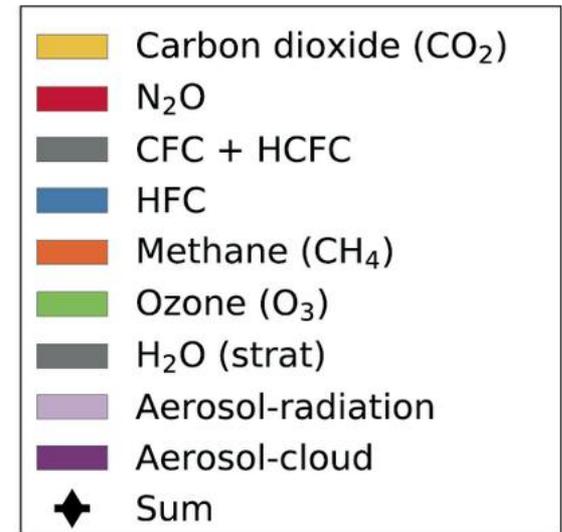
- 1. Impacts directs:** liés à l'interaction directe des particules avec le rayonnement solaire et/ou tellurique (Voir cours de S. Jacquemoud)
- 2. Impacts indirects:** liés à l'interaction des nuages formés à partir des aérosols avec le rayonnement solaire et/ou tellurique
- 3. Impact semi-direct:** lié à l'**absorption du rayonnement solaire** mène à un **réchauffement** de la couche dans laquelle les aérosols sont présents. Ceci entraîne la modification du profil vertical de température et éventuellement la disparition de nuages ou leur moindre extension

Impacts environnementaux des aérosols: le climat

(a) Effective radiative forcing, 1750 to 2019



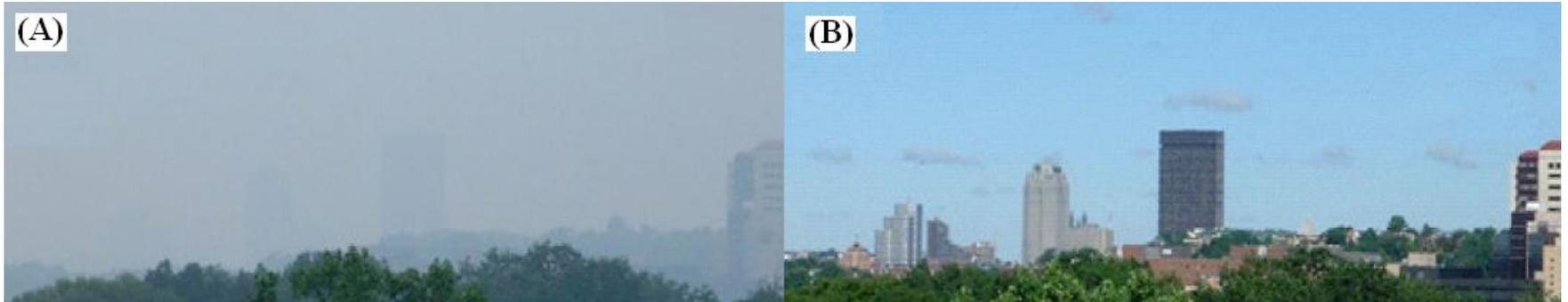
GIEC = Groupe Intergouvernemental pour l'étude du climat, (angl. IPCC) Final report 2021



L'effet de serre engendré par les aérosols est globalement négatif (refroidissement lié à une diminution du flux solaire), mais cela va dépendre du type d'aérosol (taille, composition chimique..)

Impact sur la visibilité

Cas de brumes sèches



Photographie de la ville de Pittsburgh illustrant la diminution de la visibilité lors de fortes concentrations en aérosols (<http://cires.colorado.edu/jimenez/AtmChem>)

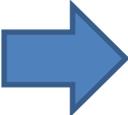
(A) 2 juillet 2001, $PM_{2,5} = 45 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,

(B) 18 juillet 2001, $PM_{2,5} = 4 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$

➡ Conséquences au niveau aéronautique, du tourisme....

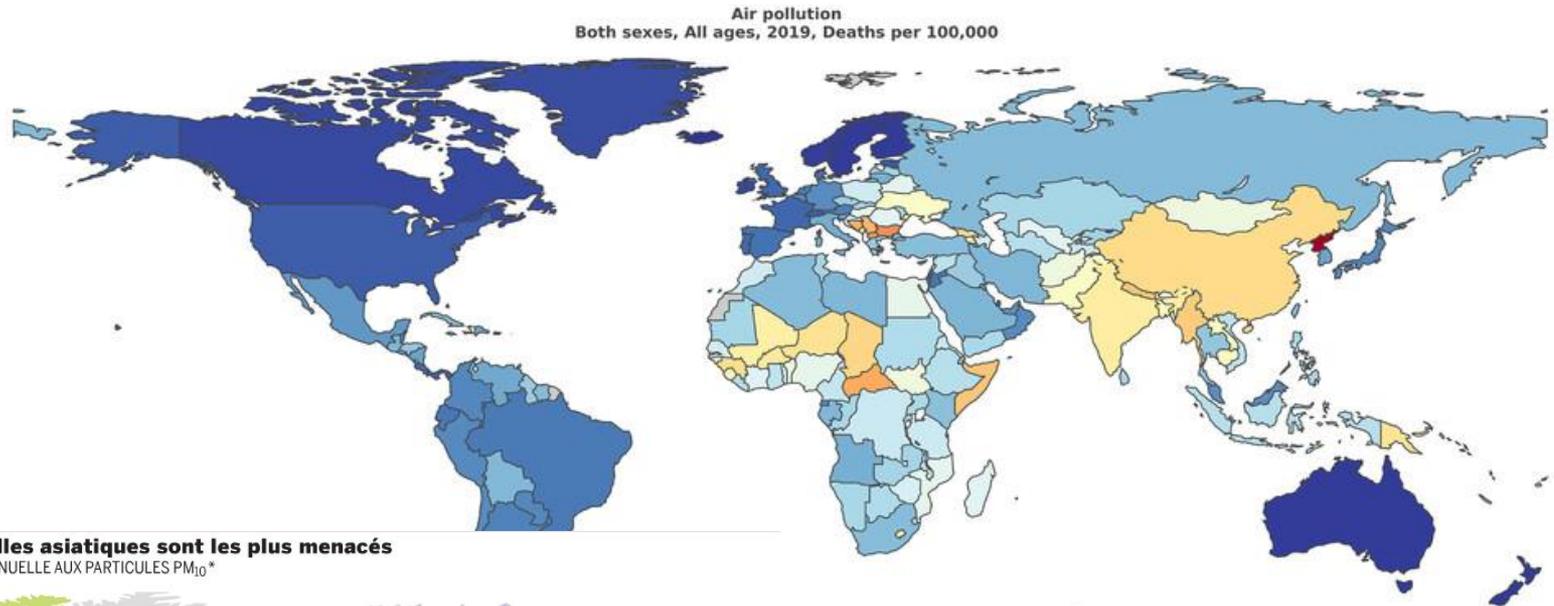
Impacts sur la santé

- **Impacts sur l'état de santé, observés par l'épidémiologie:**
 - Depuis plusieurs d'années, le lien entre **taux de mortalité et morbidité humaine** et **concentrations en particules** dans l'atmosphère est bien reconnu
 - La toxicité induite par les aérosols se concrétise par
 - Symptômes respiratoires, dont exacerbation de l'asthme
 - Pathologies cardiovasculaires
 - Cancer du poumon

 17/10/2013: OMS a classé officiellement la pollution atmosphérique en tant que « cancérigène certain »

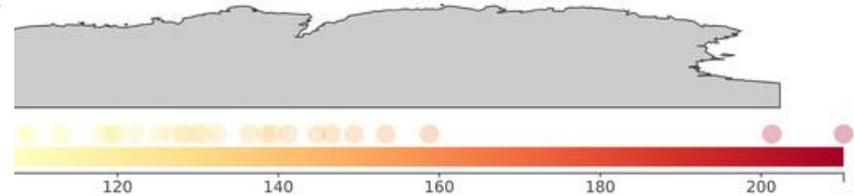
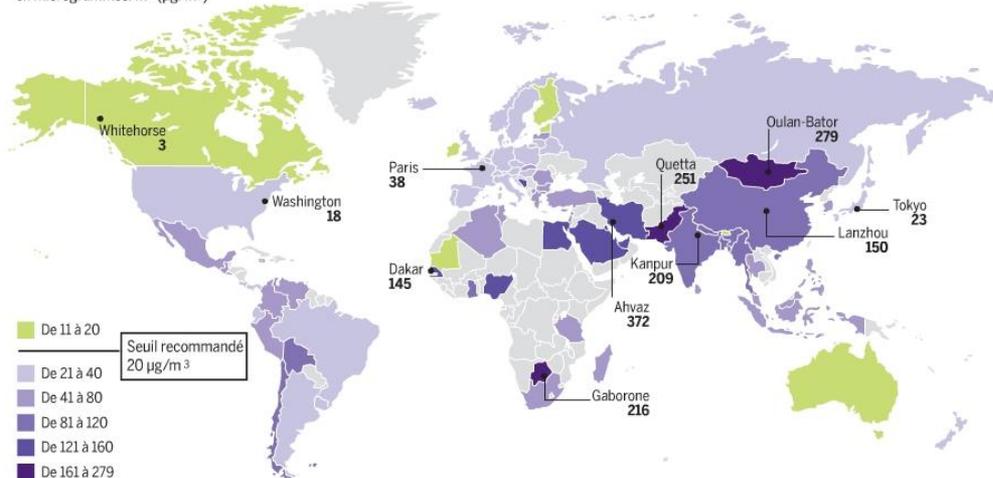
Impacts sur la santé

Décès prématurés attribuables à la pollution atmosphérique



Les habitants des villes asiatiques sont les plus menacés

CONCENTRATION MOYENNE ANNUELLE AUX PARTICULES PM₁₀*
en microgrammes/m³ (µg/m³)



Impacts sur la santé

- Les effets sont majoritairement liés à l'exposition chronique
- Programme européen CAFE:

Estimation basée sur les niveaux observés en 2000 à travers les Etats membres de l'Union Européenne.

- **348 000** morts anticipés/an liés à l'exposition aux particules fines
- **9 mois** en moyenne de perte d'espérance de vie
- **110 000** hospitalisations graves / an

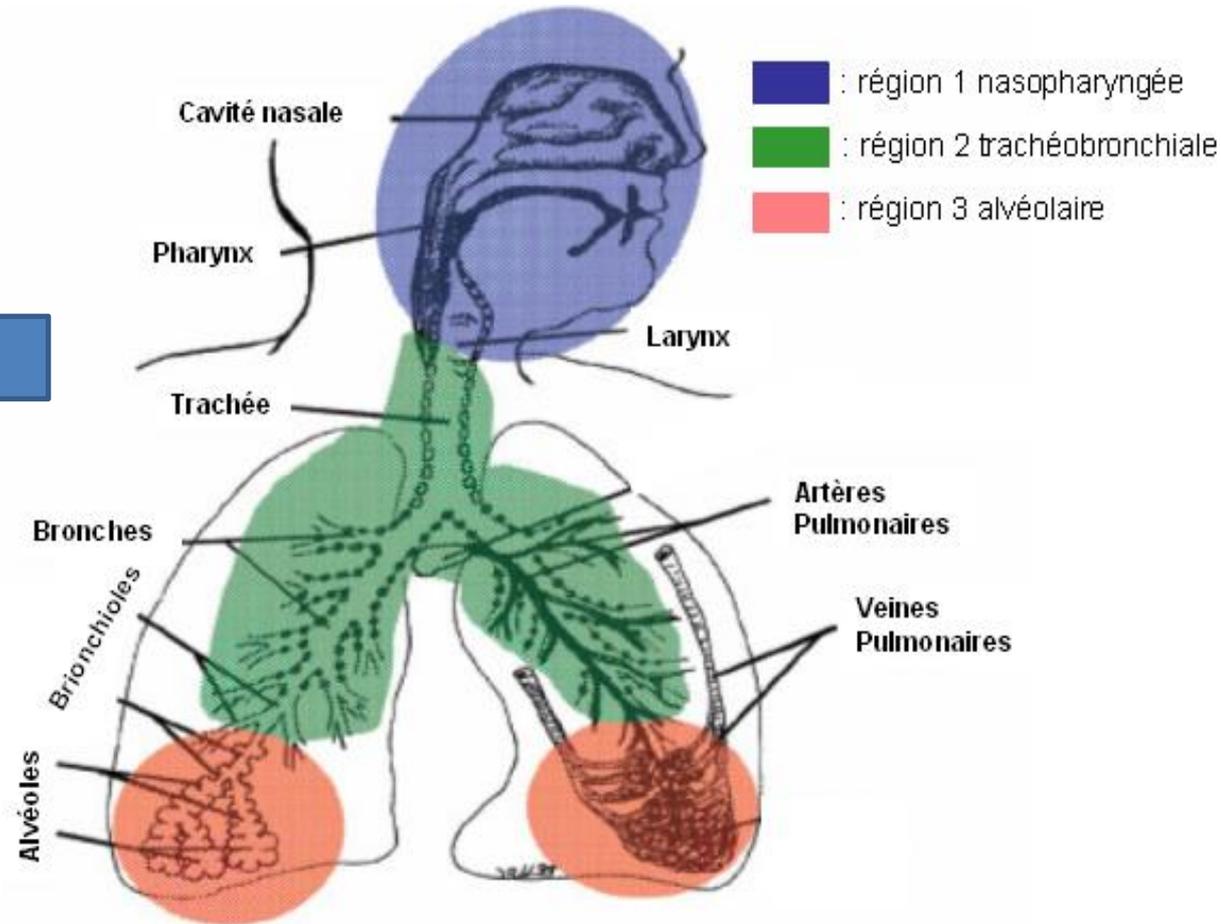


➔ Les personnes les plus sensibles: enfants de moins de 8 ans, personnes âgées, personnes avec problématiques cardio-vasculaires, sportifs

Comportement des particules dans l'organisme

☐ La taille des particules détermine leur site de dépôt dans l'appareil respiratoire.

☐ Trois régions principales de dépôt de particules:



NF ISO 7708 – Définition des fractions de particules pour l'échantillonnage lié aux problèmes de santé



Comportement des particules dans l'organisme

❑ La taille des particules détermine leur site de dépôt dans l'appareil respiratoire.

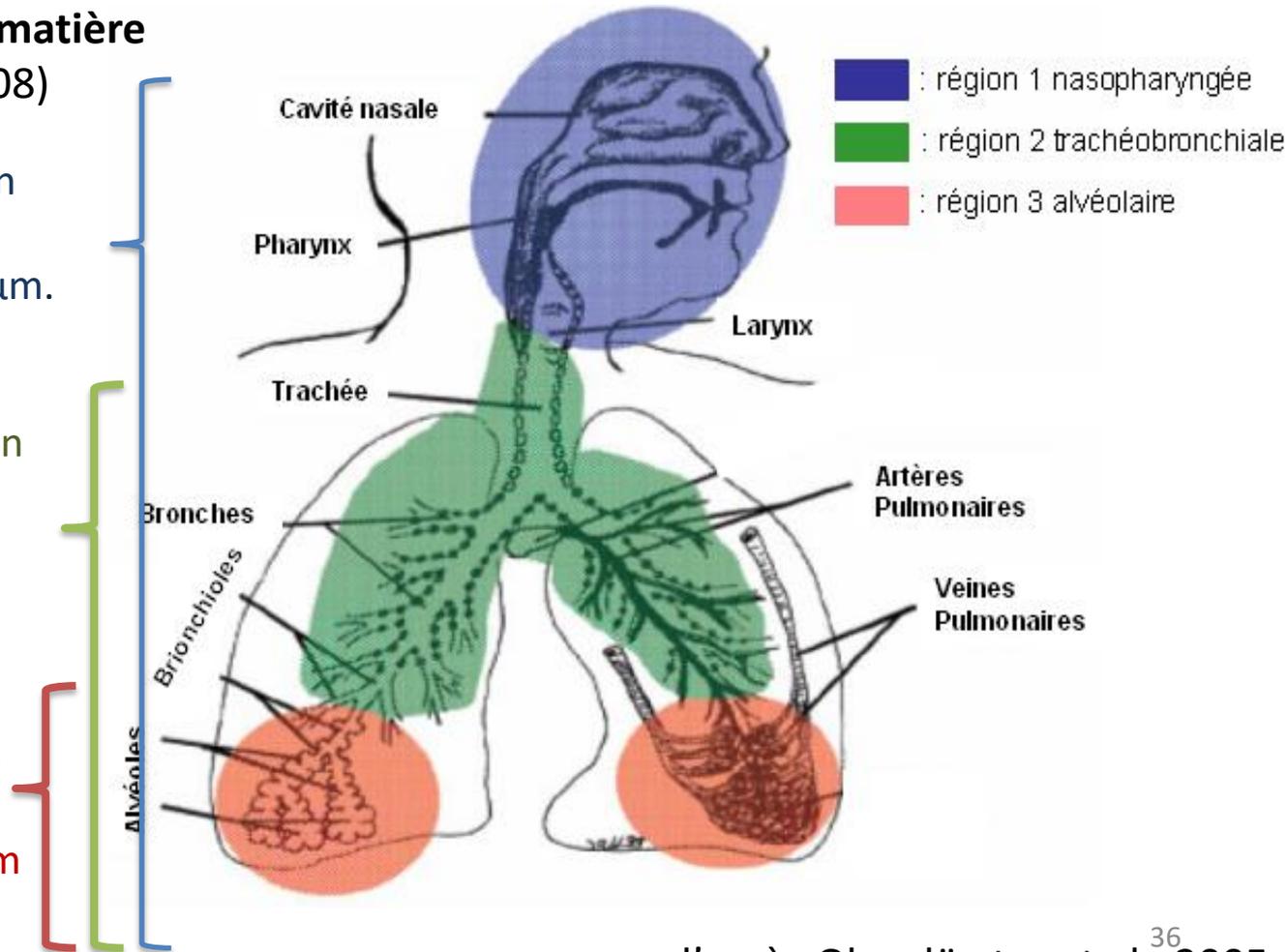
❑ Trois régions principales de dépôt de particules:

PM = particulate matter ou matière particulaire (NF ISO 7708)

PM₁₀ = particules en suspension dans l'air d'un diamètre aérodynamique inférieur à 10 µm.

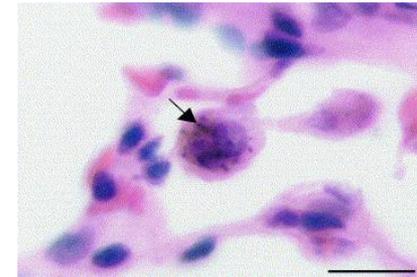
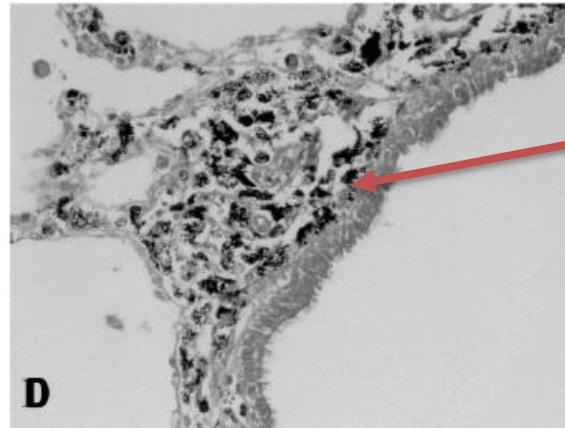
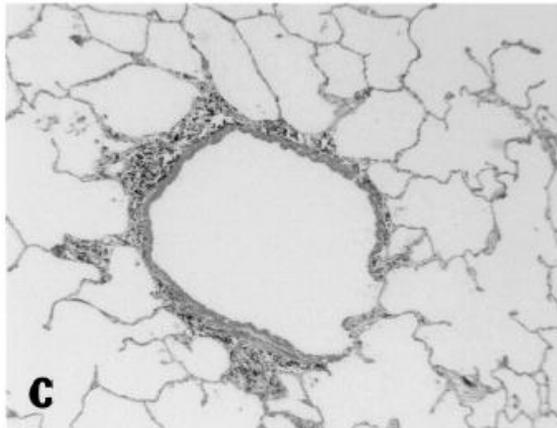
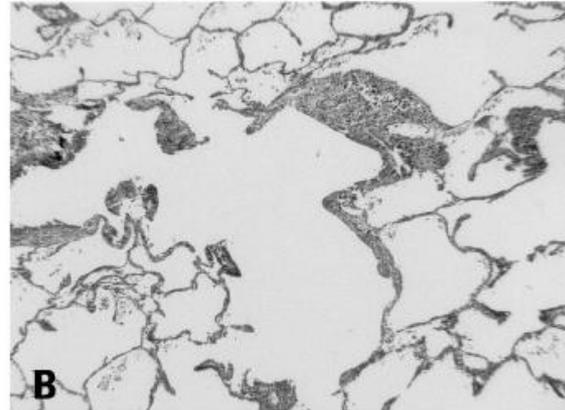
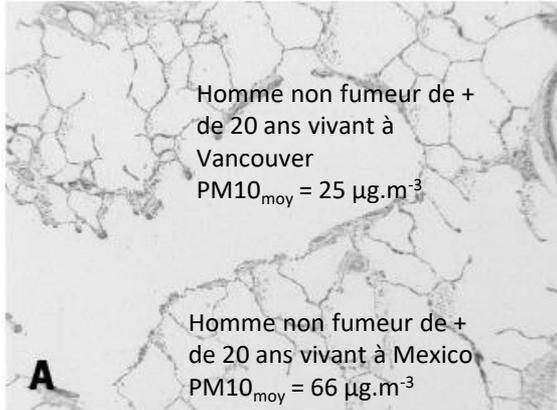
PM_{2.5} = particules en suspension dans l'air d'un diamètre aérodynamique inférieur à 2,5 µm.

PM₁ = particules en suspension dans l'air d'un diamètre aérodynamique inférieur à 1 µm



Comportement des particules dans l'organisme

Impact pulmonaire



Particules de suie
phagocytées dans le tissu
pulmonaire

Churg et al., 2003

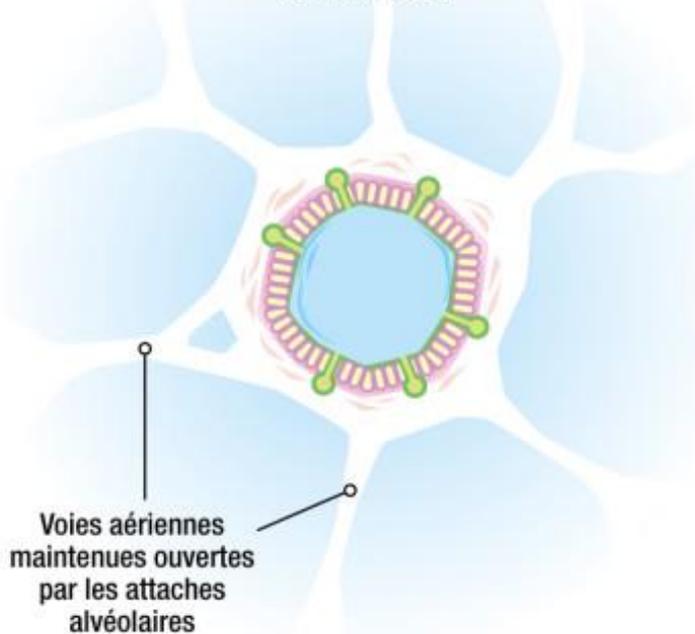
➡ Inflammation des tissus pulmonaires et stress oxydant (ERO)

Comportement des particules dans l'organisme

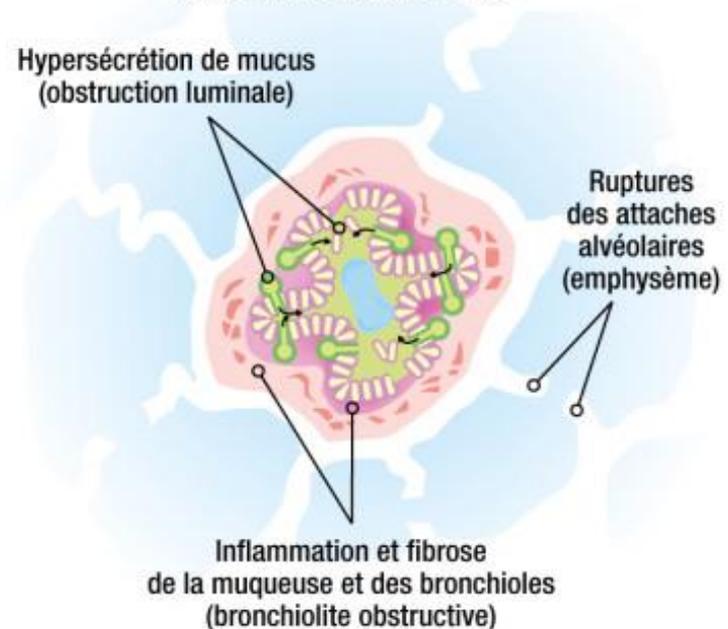
Impact pulmonaire

Ex: Bronchopneumaopathie Chronique Obstructive

Voies aériennes périphériques normales



Voies aériennes périphériques atteintes de BPCO*



Normes liées aux aérosols

1. Normes sur les particules sont exprimées en concentrations massiques sur la fraction PM10
 - Au niveau européen: directive 2008/50/CE
 - Au niveau français: Décret du 21/10/10 (article R221-1 du code de l'environnement)

	Valeurs limites	Objectifs de qualité	Seuil de recommandation et d'information	Seuils d'alerte
PM10	En moyenne annuelle : 40 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. En moyenne journalière : 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ à ne pas dépasser plus de 35 jours par an.	En moyenne annuelle : 30 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.	En moyenne journalière : 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.	En moyenne journalière : 80 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.
PM2.5	En moyenne annuelle : 25 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	En moyenne annuelle : 20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$		

Normes liées aux aérosols

1. Normes sur les particules sont exprimées en concentrations massiques sur la fraction PM10
 - Au niveau européen: directive 2008/50/CE
 - Au niveau français: Décret du 21/10/10 (article R221-1 du code de l'environnement)

Résultats de l'AEE (Agence Européenne pour l'Environnement):

- En 2011: 85 à 96% des habitants de zones urbaines en Europe sont soumis à des concentrations en PM 10 et PM2.5 > au seuil recommandé par l'OMS

Concentrations typiques

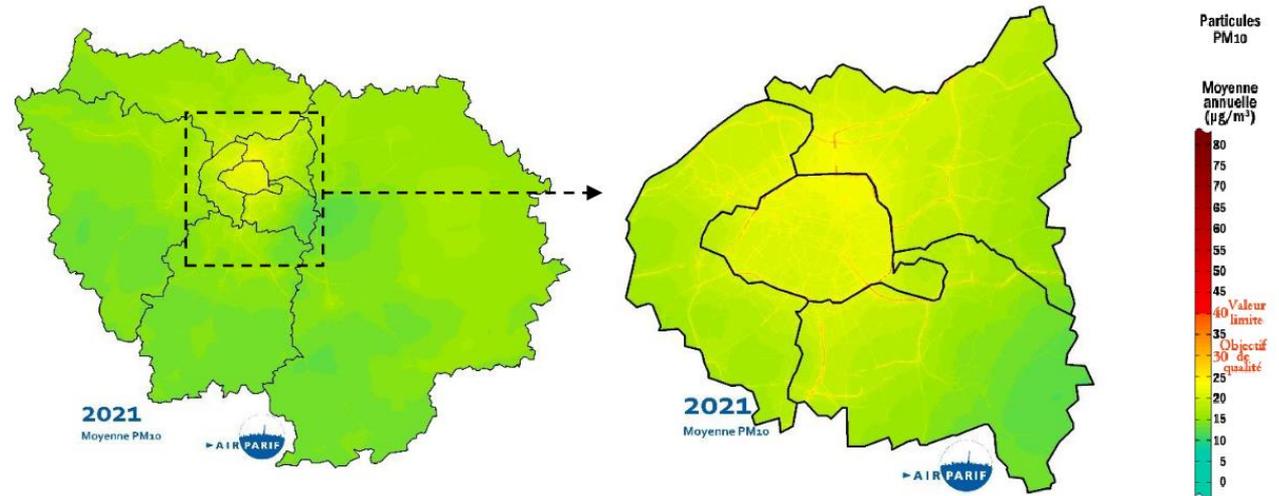


Figure 11 : concentrations moyennes annuelles de particules PM₁₀ en Île-de-France et zoom sur Paris et la petite couronne parisienne en 2021



Figure 15 : évolution, à échantillon évolutif de stations de fond, des concentrations moyennes sur 3 ans en particules PM₁₀ de 2009-2011 à 2019-2021 dans l'agglomération parisienne (en bleu) et hors agglomération (en vert)

Rapport activités AirParif 2022

Concentrations typiques

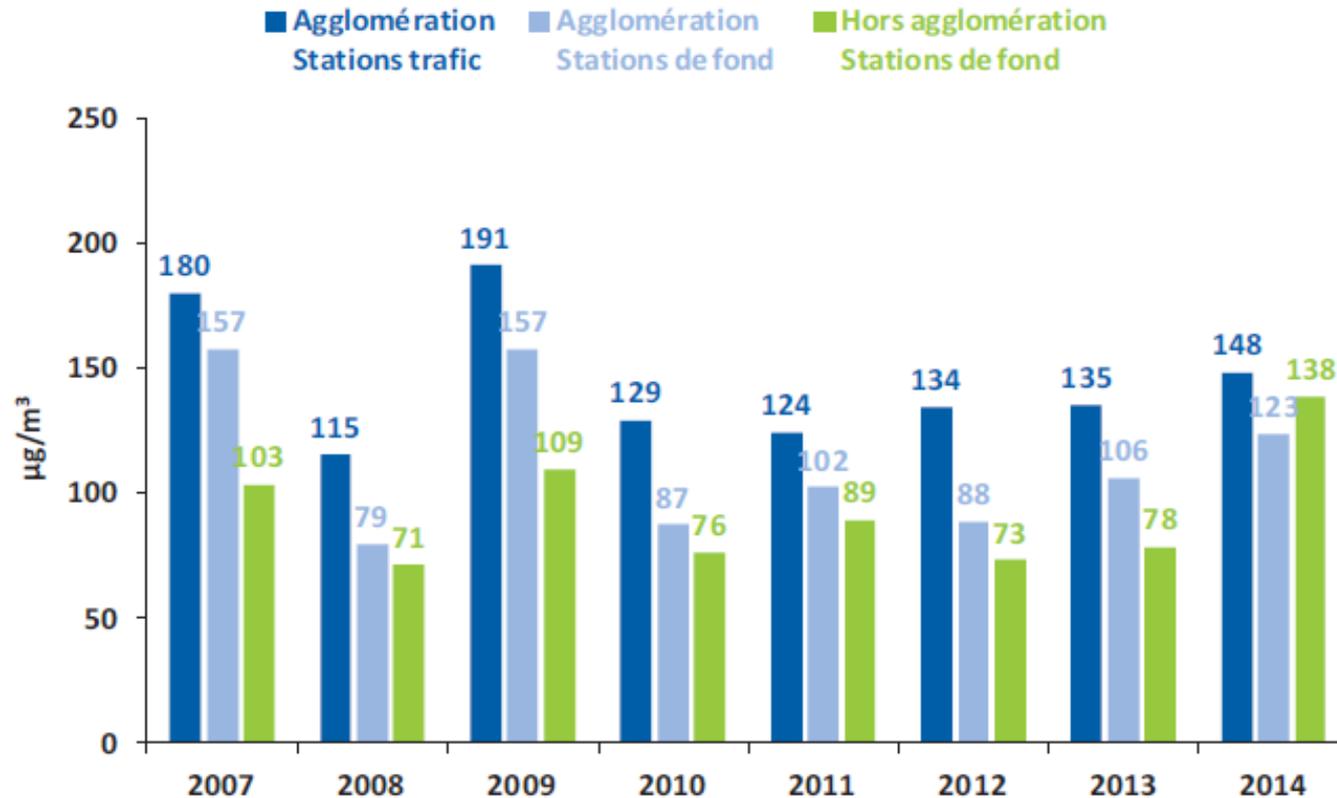
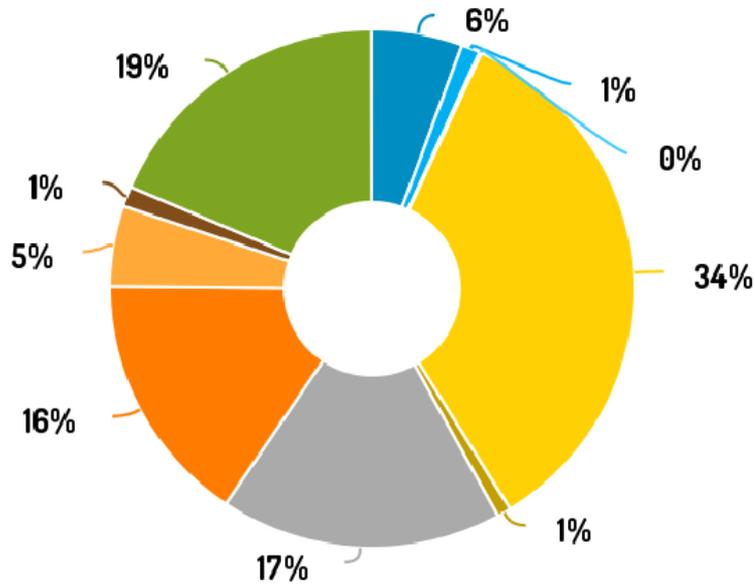


Figure 13 : concentrations moyennes journalières de PM10 les plus fortes pour chaque année de 2007 à 2014 en Ile-de-France (réseau évolutif)

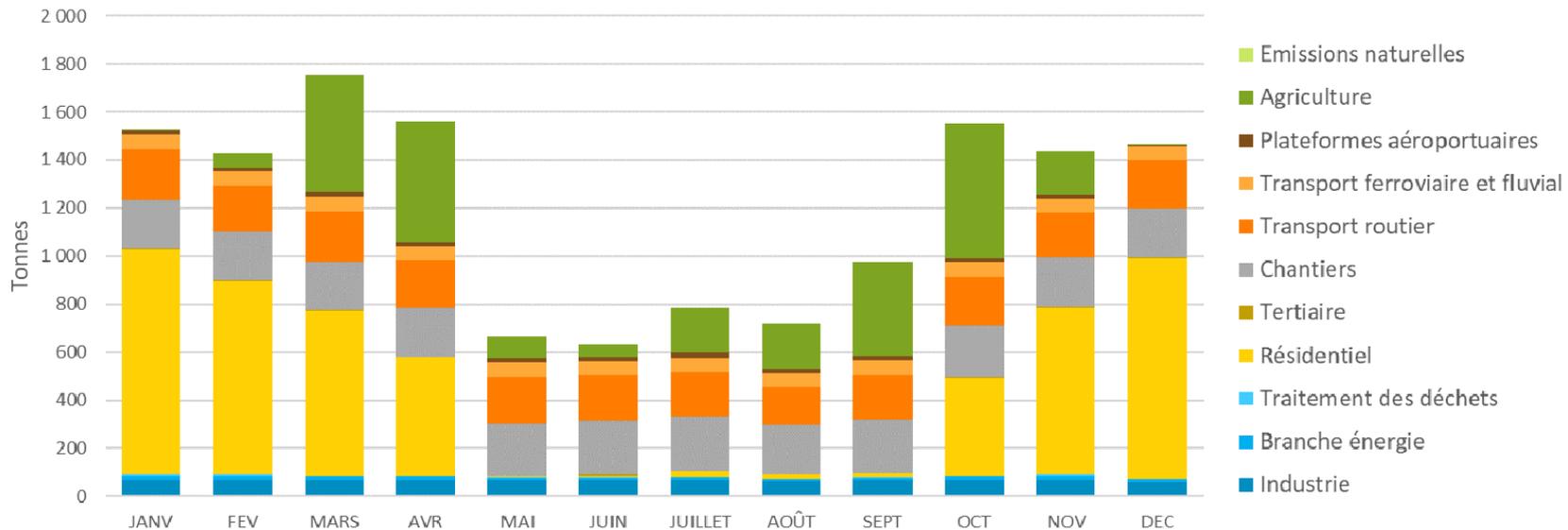
Sources de pollution en PM10

Répartition par secteur et par mois des émissions de PM10 primaires en Ile de France en 2019



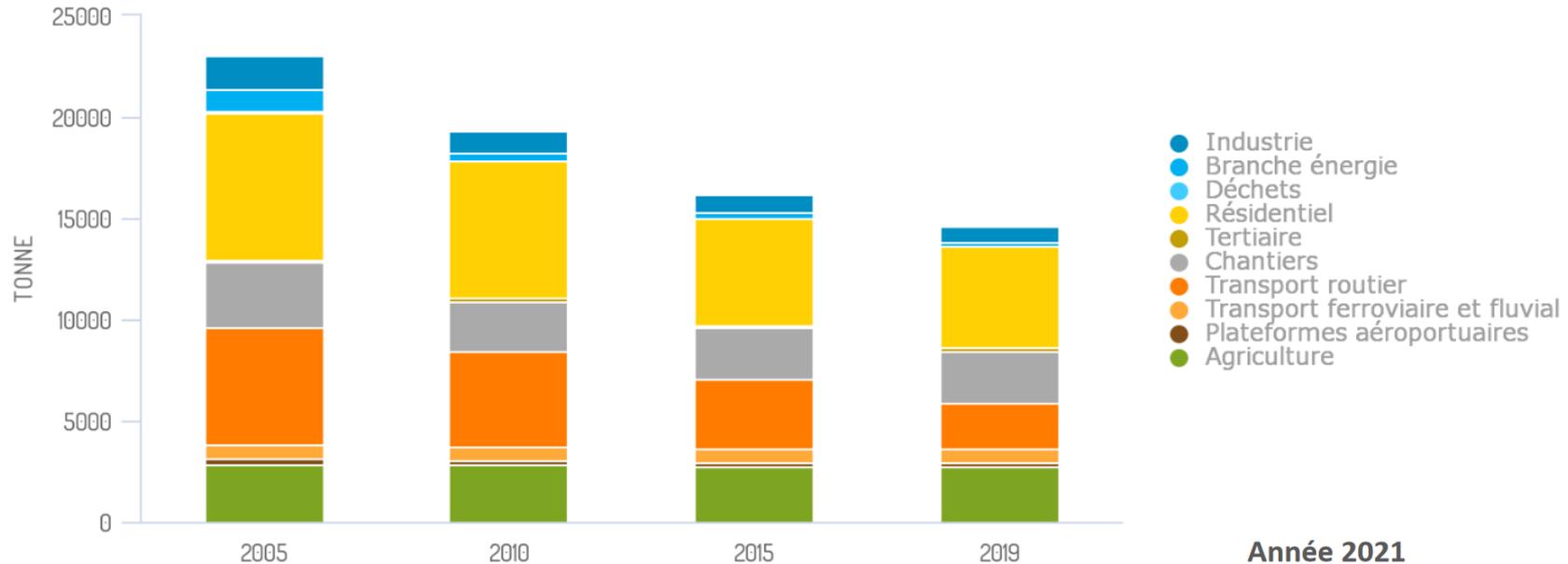
- Industrie
- Branche énergie
- Déchets
- Résidentiel
- Tertiaire
- Chantiers
- Transport routier
- Transport ferroviaire et fluvial
- Plateformes aéroportuaires
- Agriculture

Rapport Emissions AirParif 2022

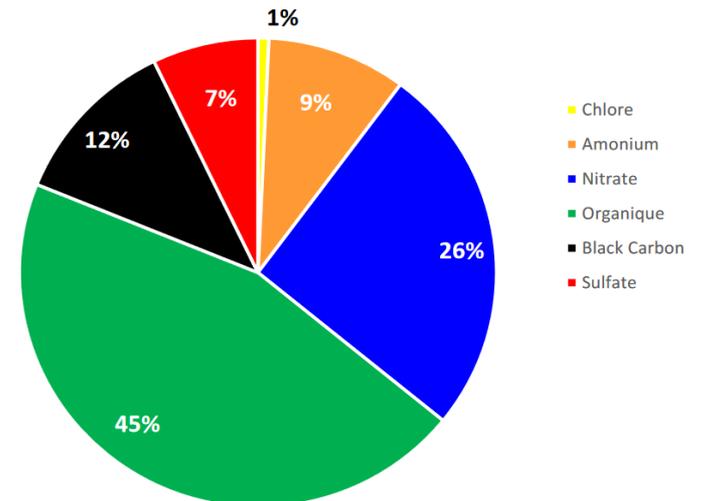


Sources de pollution en PM10

Evolution temporelle des émissions depuis 2005 en PM10 en Ile de France



Année 2021



Composition moyenne PM2.5 à la station de fond urbain (Les Halles)

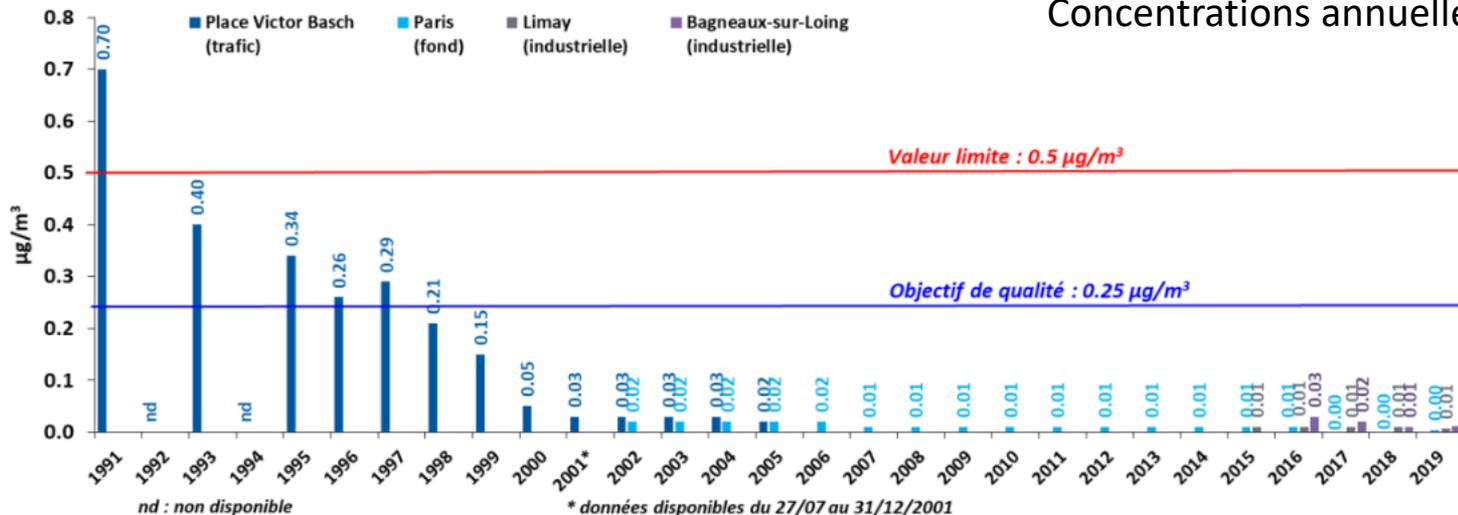
Normes liées aux aérosols

2. Concernant la chimie des particules seulement deux types de substances sont réglementées:

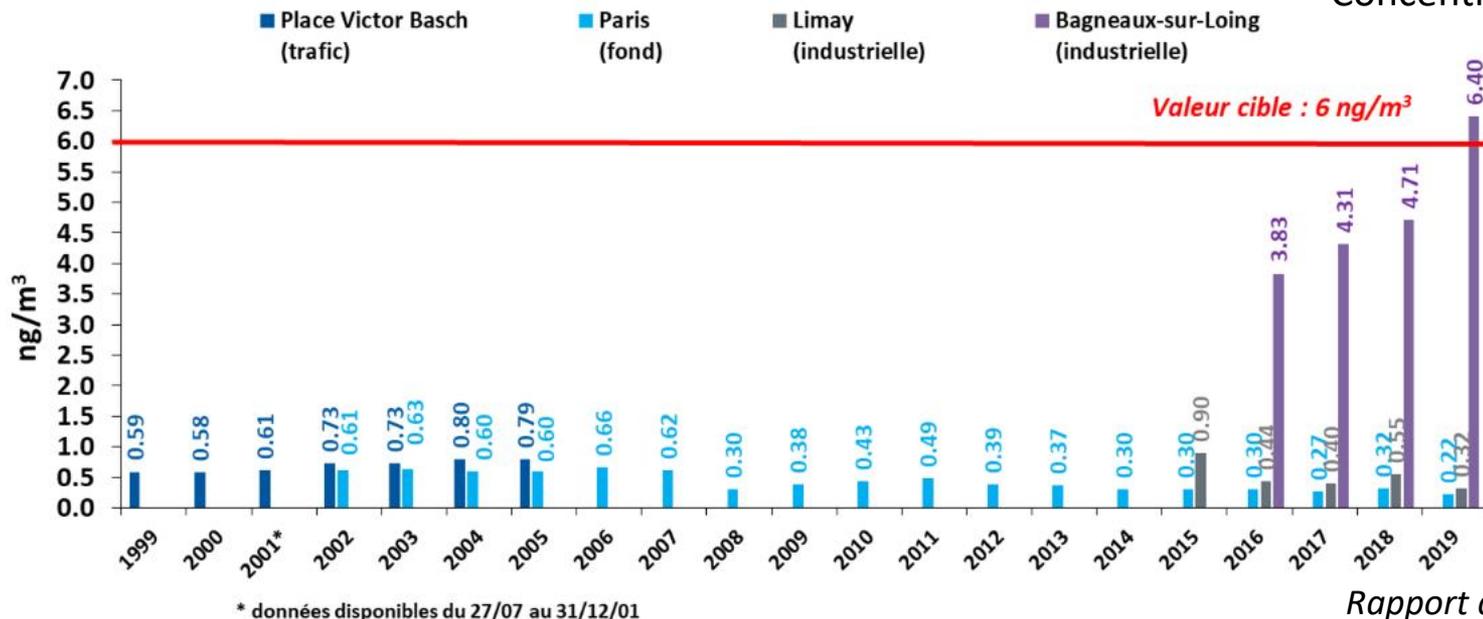
- Métaux lourds (Cd, Ni, As, Pb, Hg):
 - Cadmium : 5 ng/m^3 en moyenne annuelle du contenu total de la fraction PM 10
 - Nickel : Valeur cible : 20 ng/m^3
 - Arsenic : Valeur cible : 6 ng/m^3
 - Plomb : Valeur limite : $0,5 \text{ } \mu\text{g/m}^3$ (Objectif: $0,25 \text{ } \mu\text{g/m}^3$)
- HAP (Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques)
 - Benzo(a)pyrène : 1 ng/m^3 , en moyenne annuelle du contenu total de la fraction PM10

Normes liées aux aérosols

Concentrations annuelles Pb



Concentrations annuelles As



Normes liées aux aérosols

