

---

# Cours VET

## « Environnement atmosphérique et qualité de l'air »

### Émissions

Christian Seigneur  
Cerea

Michel André  
Ifsttar

# Plan du cours

---

- Sources de polluants atmosphériques
- Formation et émission des polluants atmosphériques
- Inventaires d'émissions de polluants atmosphériques
- Réductions des émissions de polluants émis par les sources fixes
- Émissions du trafic routier : Michel André, IFSTTAR

# Polluants atmosphériques

---

- Polluants primaires : émis directement dans l'atmosphère
  - particules, monoxyde de carbone, oxydes d'azote, composés organiques volatiles, dioxyde de soufre, etc.
- Polluants secondaires : formés par réactions chimiques dans l'atmosphère
  - ozone, pluies acides, particules secondaires, etc.

# Sources anthropiques et naturelles

---



# Sources de pollution atmosphérique

---

- Sources anthropiques (dues aux activités humaines)
  - Transports (routier, aérien, maritime, ferroviaire...)
  - Industrie (centrales électriques, incinérateurs, sidérurgie...)
  - Agriculture (engrais, élevage...)
  - Secteur résidentiel (chauffage, produits sanitaires...)
- Sources naturelles
  - Végétation
  - Sols (érosion éolienne...)
  - Océans
  - Volcans, sources géothermales, foudre, feux de forêts...

# Émissions de polluants atmosphériques

---

Polluants formés lors de la combustion

- à partir de l'air
- à partir d'éléments présents dans le combustible et émis lors de la combustion (sous diverses formes chimiques)

Polluants émis par volatilisation

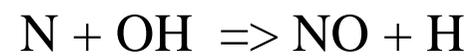
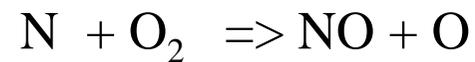
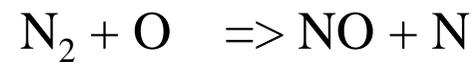
Polluants émis par des processus mécaniques

Polluants produits par des processus naturels, puis émis naturellement ou suite à des perturbations anthropiques

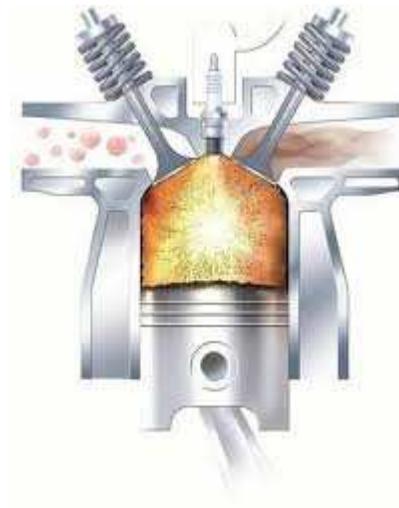
# Émissions de polluants Combustion

---

- Polluants formés lors de la combustion à partir de l'air
  - Oxydes d'azote ( $\text{NO}_x$ ) : NO,  $\text{NO}_2$  et HONO



...



# Émissions de polluants

## Combustion

---

- Polluants formés à partir d'éléments présents dans le combustible (hydrocarbure, charbon... + impuretés telles que soufre, mercure...)
  - Dioxyde de carbone ( $\text{CO}_2$ )
  - Monoxyde de carbone ( $\text{CO}$ )
  - Composés organiques volatils (benzène, formaldéhyde...)
  - Composés organiques semi-volatils et non-volatils (hydrocarbures aromatiques polycycliques, dioxines et furanes...)
  - Particules de suie
  - Oxydes de soufre ( $\text{SO}_2$  et  $\text{SO}_3$ )
  - Composés minéraux halogénés ( $\text{HCl}$ )
  - Mercure ( $\text{Hg}^0$ ,  $\text{HgCl}_2$ ...)
  - ...



# Émissions de polluants

## Volatilisation

---

- Polluants émis par volatilisation
  - Composés organiques volatils (essences, peintures...)
  - Mercure élémentaire (sols, océans...)
  - Ré-émission de composés déposés sur les sols (POPs, mercure...)



# Émissions de polluants

## Processus mécaniques

---

- Polluants émis par des processus mécaniques
  - Métaux (abrasion des freins, usure des caténaires, activités industrielles...)
  - Poussières (activités agricoles, construction, resuspension due au trafic...)



# Émissions de polluants

## Processus naturels

---

- Polluants émis par des processus naturels
  - Composés organiques volatils émis par la végétation (isoprène, méthylbuténol, monoterpènes, sesquiterpènes, terpénoïdes...)
  - Méthane
  - Composés soufrés (diméthylsulfure des océans, H<sub>2</sub>S des sources géothermiques, SO<sub>2</sub> des volcans)
  - Composés azotés (ammoniac, protoxyde d'azote (N<sub>2</sub>O) ...émis en surface ; NO<sub>2</sub> émis par les éclairs en altitude)
  - Poussières éoliennes
  - Sels marins
  - Produits des feux de biomasse (CO<sub>2</sub>, CO, NO<sub>x</sub>, COV, particules...)
  - ...



# Dioxyde de soufre (SO<sub>2</sub>)

---

- Émissions globales annuelles\*
  - Énergies fossiles  
et sources industrielles : 70 Tg
  - Feux de biomasse : 3 Tg
  - Volcans : 8 Tg

\* en Tg (10<sup>12</sup> g) de soufre

# Oxydes d'azote (NO et NO<sub>2</sub>)

---

- Émissions globales annuelles\*
  - Énergies fossiles : 25 Tg
  - Sols : 12 Tg
  - Feux de biomasse : 8 Tg
  - Foudre : 5 Tg
  - Aviation : 0,5 Tg
- Formation dans l'atmosphère\*
  - Oxydation de l'ammoniac : 3 tonnes

\* en Tg (10<sup>12</sup> g) d'azote

# Ammoniac (NH<sub>3</sub>)

---

- Émissions globales annuelles\*
  - Élevage : 22 Tg
  - Engrais : 6 Tg
  - Feux de biomasse : 2 Tg
  - Végétation : 5 Tg
  - Animaux sauvages : 3 Tg
  - Océans : 7 Tg

\* en Tg (10<sup>12</sup> g) d'azote

# Monoxyde de carbone (CO)

---

- Émissions globales annuelles
  - Activités humaines : 400 Tg
  - Feux de biomasse : 500 Tg
  - Végétation : 100 Tg
  - Océans : 100 Tg
- Formation dans l'atmosphère
  - Oxydation du méthane : 700 Tg
  - Oxydation d'autres COV : 400 Tg

# Méthane (CH<sub>4</sub>)

---

- Émissions globales annuelles
  - Énergies fossiles : 100 Tg
  - Activités agricoles : 275 Tg
  - Sources naturelles : 160 Tg

# Composés organiques volatils (COV)

---

- Émissions globales annuelles\*
  - Transport routier : 40 Tg
  - Combustion du bois : 25 Tg
  - Utilisation de solvants : 20 Tg
  - Production d'énergies fossiles : 20 Tg
  - Autres sources anthropiques : 40 Tg
  - Végétation : 1150 Tg

\* en Tg ( $10^{12}$  g) de C ; les émissions de COV listées ici excluent celles du méthane (peu réactif)

# Particules

---

- Émissions globales annuelles
  - Industrie : 100 Tg
  - Transport : 10 Tg
  - Sources naturelles (sels marins, poussières éoliennes, volcans, pollens...) : 3000 Tg
- Formation dans l'atmosphère
  - Activités humaines : 350 Tg
  - Sources naturelles : 250 Tg

# Particules fines

---

- Pour les particules, la taille et la composition chimique sont très importantes pour déterminer leur impact sanitaire et environnemental
- Les inventaires de particules ne reflètent donc pas les impacts potentiels de ces émissions

# Mercure

---

- Émissions globales annuelles
  - Industrie\* : 2200 Mg
  - Sols et végétation§ : 2200 Mg
  - Volcans : 120 Mg
  - Océans§ : 2000 Mg

\* centrales électriques au charbon, incinérateurs, etc.

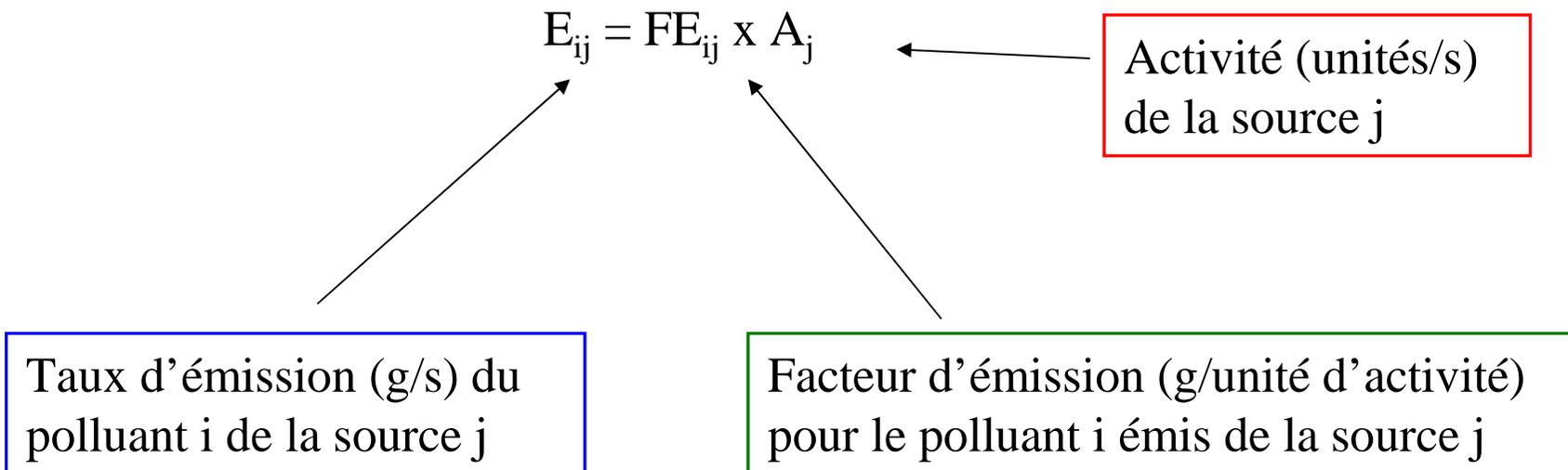
§ émissions directes et ré-émissions partielles de dépôts de mercure

1 Mg =  $10^6$  g = 1 tonne

# Inventaires d'émissions

---

L'équation fondamentale pour l'estimation des émissions de polluants d'une source est :



# Inventaires d'émissions

## Activité d'une source

---

L'activité d'une source est définie de façon différente selon les types de sources, par exemple :

- Trafic automobile : kilomètres parcourus par l'ensemble du parc roulant par heure ; soit : véhicules km / heure
- Centrale électrique : production électrique par an
- Chauffage résidentiel : quantité de combustible consommée par an

Pour les sources biogéniques, le taux d'émission est calculé directement

Pour les polluants de certaines sources industrielles ( $\text{SO}_2$  et  $\text{NO}_x$  des centrales électriques par exemple), le taux d'émission est mesuré directement à l'émission (dans la cheminée)

# Inventaires d'émissions

## Facteurs d'émission d'une source

---

Les facteurs d'émissions peuvent être obtenus de plusieurs façons :

- mesures à la source (pour un type de source)
- estimation à partir d'un bilan matière (par exemple concentration d'un élément dans le charbon)
- simulation (par exemple pour la spéciation de certaines espèces)

# Inventaires d'émissions

## Facteurs d'émission des véhicules

---



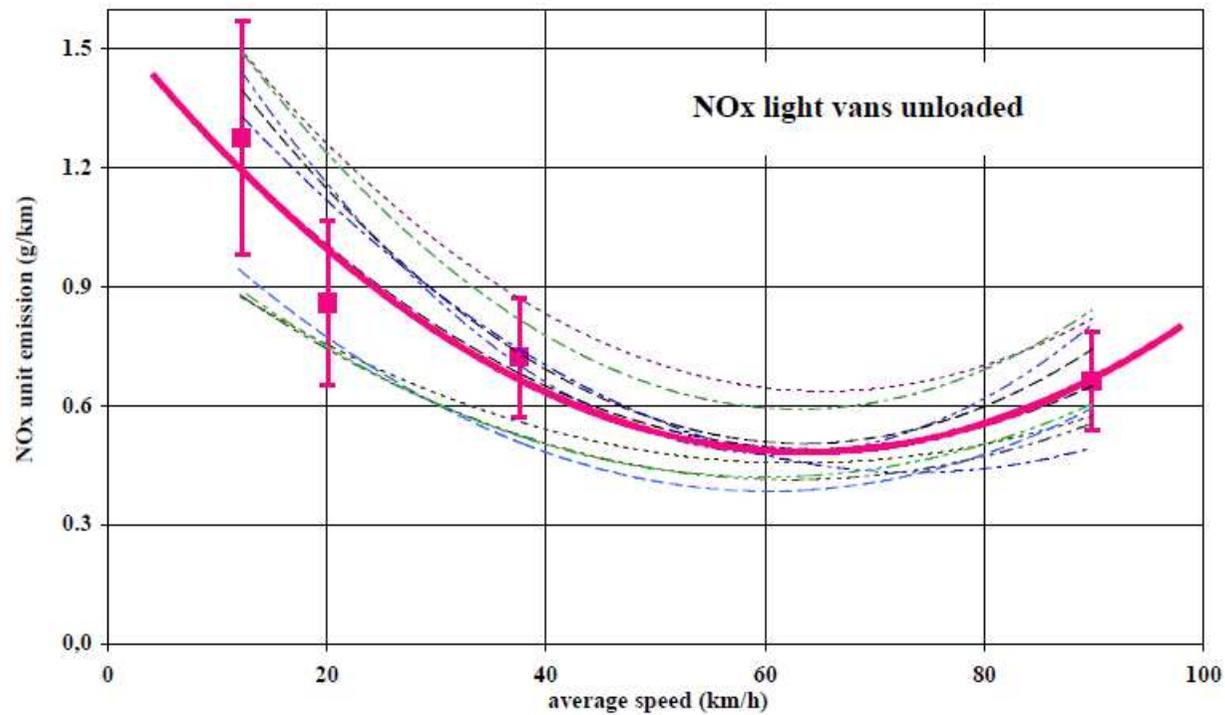
Les facteurs d'émissions des véhicules sont obtenus sur banc d'essai, par exemple à l'Institut français des sciences et technologies des transports, des aménagements et des réseaux (Ifsttar). Le véhicule suit un cycle de conduite et les émissions de certains polluants sont mesurées à la sortie du pot d'échappement après dilution.

# Inventaires d'émissions

## Facteurs d'émission des véhicules

Exemple de facteur d'émission d'oxydes d'azote ( $\text{NO}_x$ ) émis de véhicules utilitaires en fonction de la vitesse

(Source : Joumard et al., *Atmos. Environ.*, **37**, 5217, 2003).



# Inventaires d'émissions

## Résolution spatio-temporelle

---

Une fois les taux d'émissions calculés, ils doivent être répartis dans l'espace (cadastre d'émissions) et dans le temps (profils temporels)

- Résolution spatiale

- sources ponctuelles : elles peuvent être localisées exactement
- sources surfaciques : on utilise des facteurs suppléants qui permettent de distribuer spatialement les émissions totales
- sources linéiques : elles peuvent être localisées exactement et sont généralement attribuées aux mailles d'un cadastre avec un système d'information géographique (SIG)

- Résolution temporelle

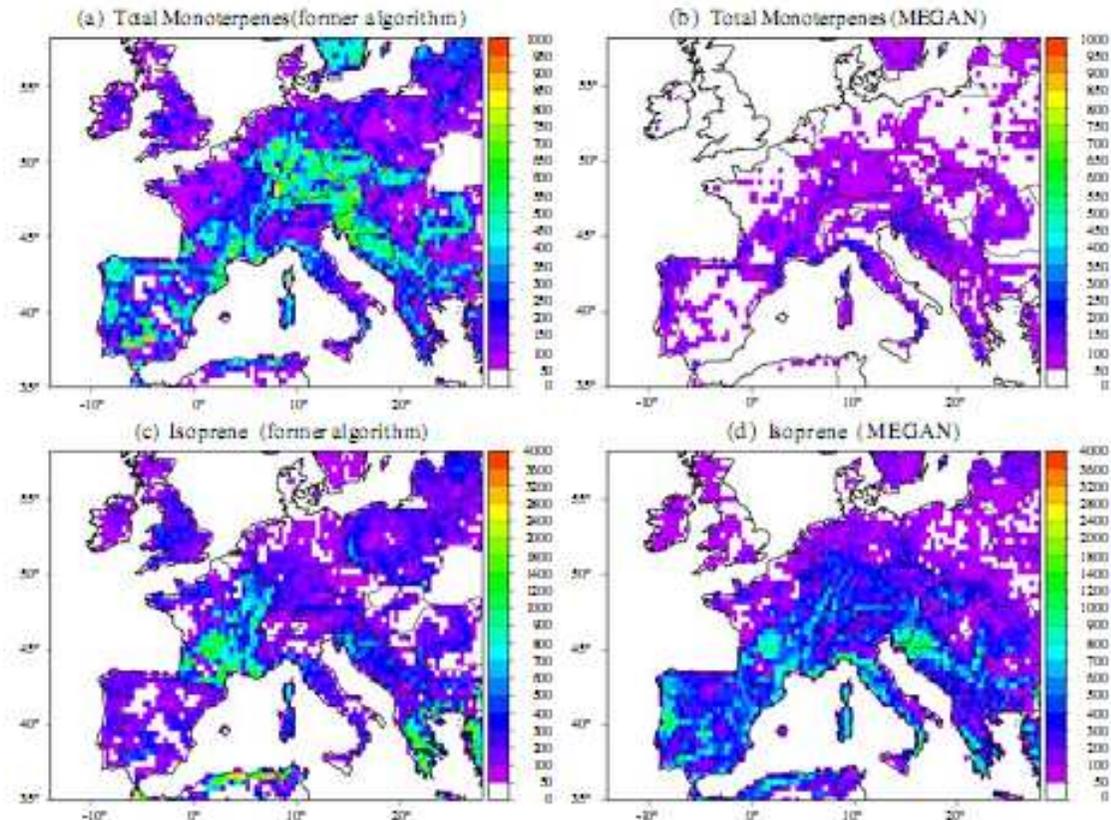
- Des profils horaires sont généralement nécessaires

# Émissions biogéniques de COV

Modèle EMEP

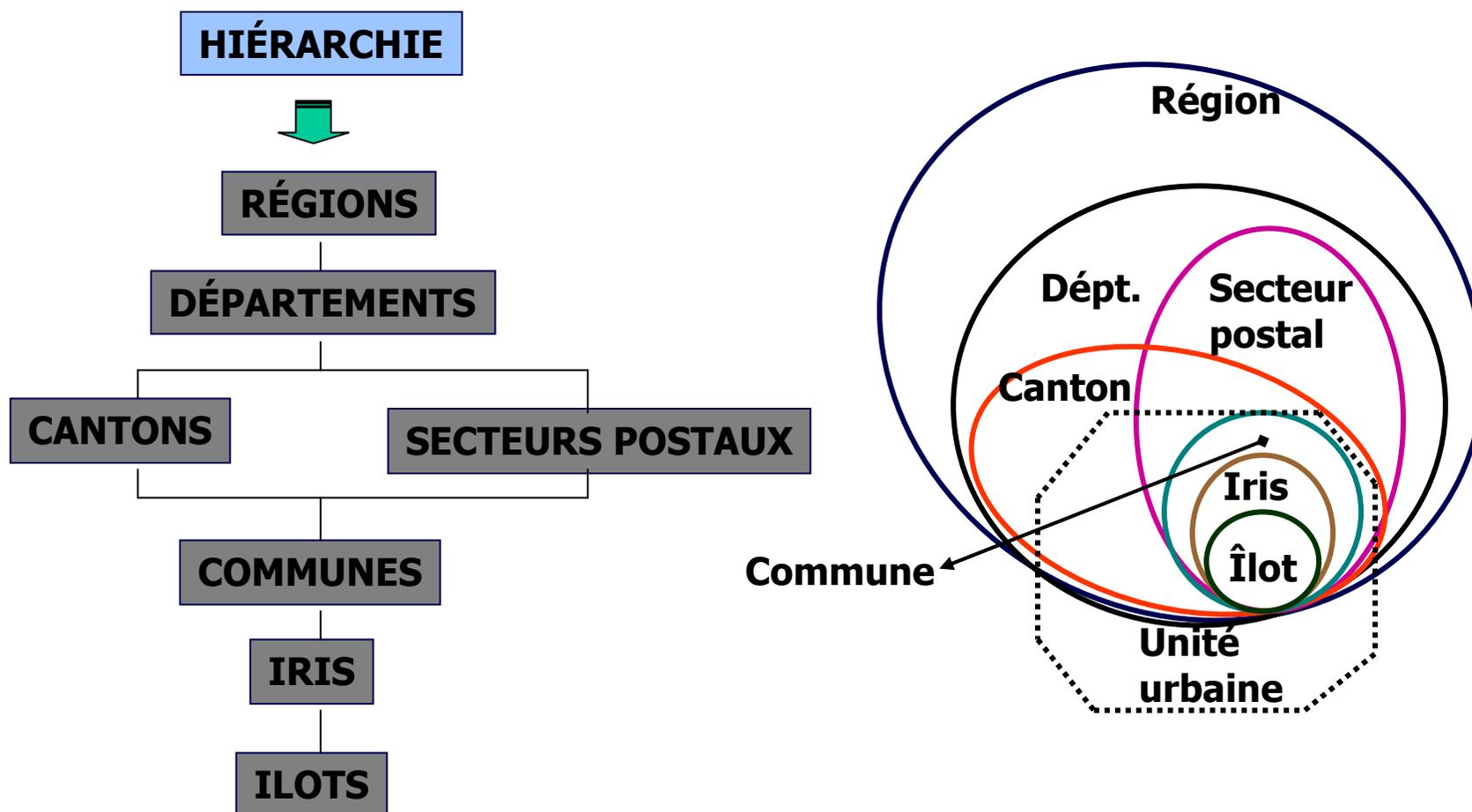
Modèle MEGAN

Monoterpènes



Isoprène

# Résolution spatiale administrative (INSEE)

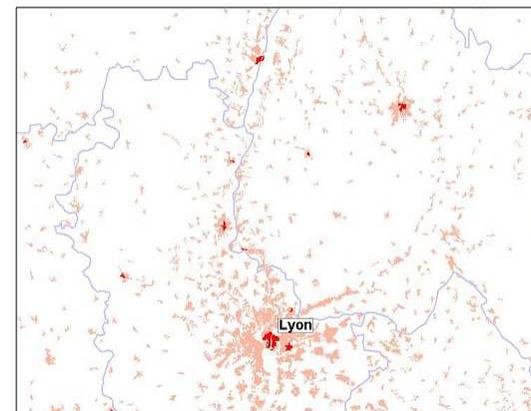
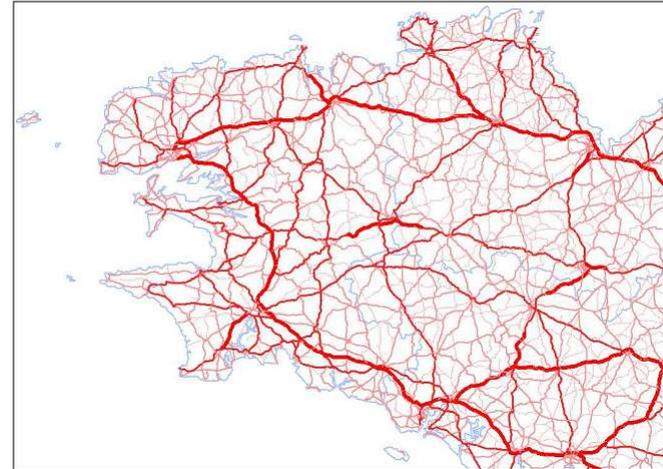


INSEE : Institut national de la statistique et des études économiques

IRIS : Îlots regroupés pour l'information statistique

# Trafic routier

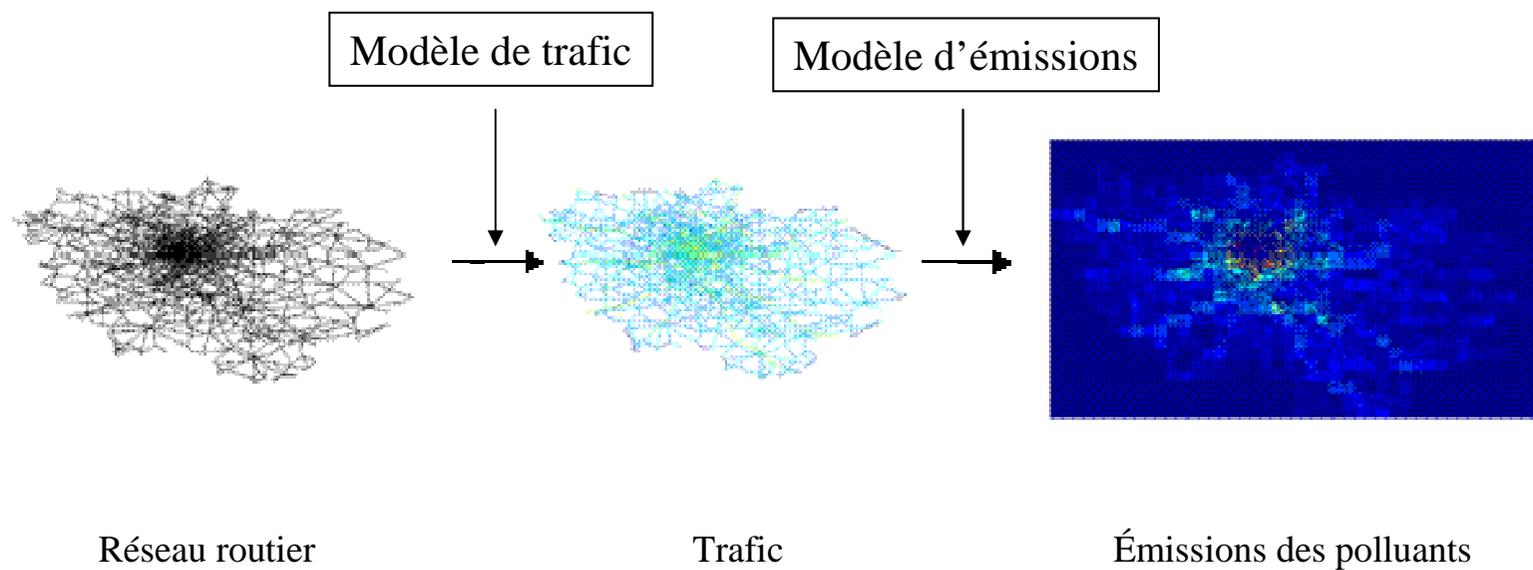
- Trafic des grands axes (autoroutes, nationales & départementales)
  - modèles de trafic (Paris...)
  - compteurs de trafic (SIREDO...)
  - valeurs par défaut
- Trafic diffus
  - répartition sur les communes
- Stationnement



SIREDO : système informatisé de recueil de données

# Résolution spatiale pour les émissions du trafic

---



Exemple de spatialisation des émissions du trafic routier sur l'Île-de-France

# Polluants atmosphériques

---

- Polluants pris en compte par le ministère de l'Écologie (MEDDE) :
  - monoxyde de carbone (CO)
  - oxydes d'azote (NO<sub>x</sub>)
  - dioxyde de soufre (SO<sub>2</sub>)
  - composés organiques volatils (COV), y compris benzène (C<sub>6</sub>H<sub>6</sub>) et formaldéhyde (HCHO)
  - ammoniac (NH<sub>3</sub>)
  - particules (PM)
  - métaux (As, Cd, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb, Se, V et Zn)
  - POP (HAP et dioxines/furannes)
  - GES (CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> et N<sub>2</sub>O)

# Polluants atmosphériques

---

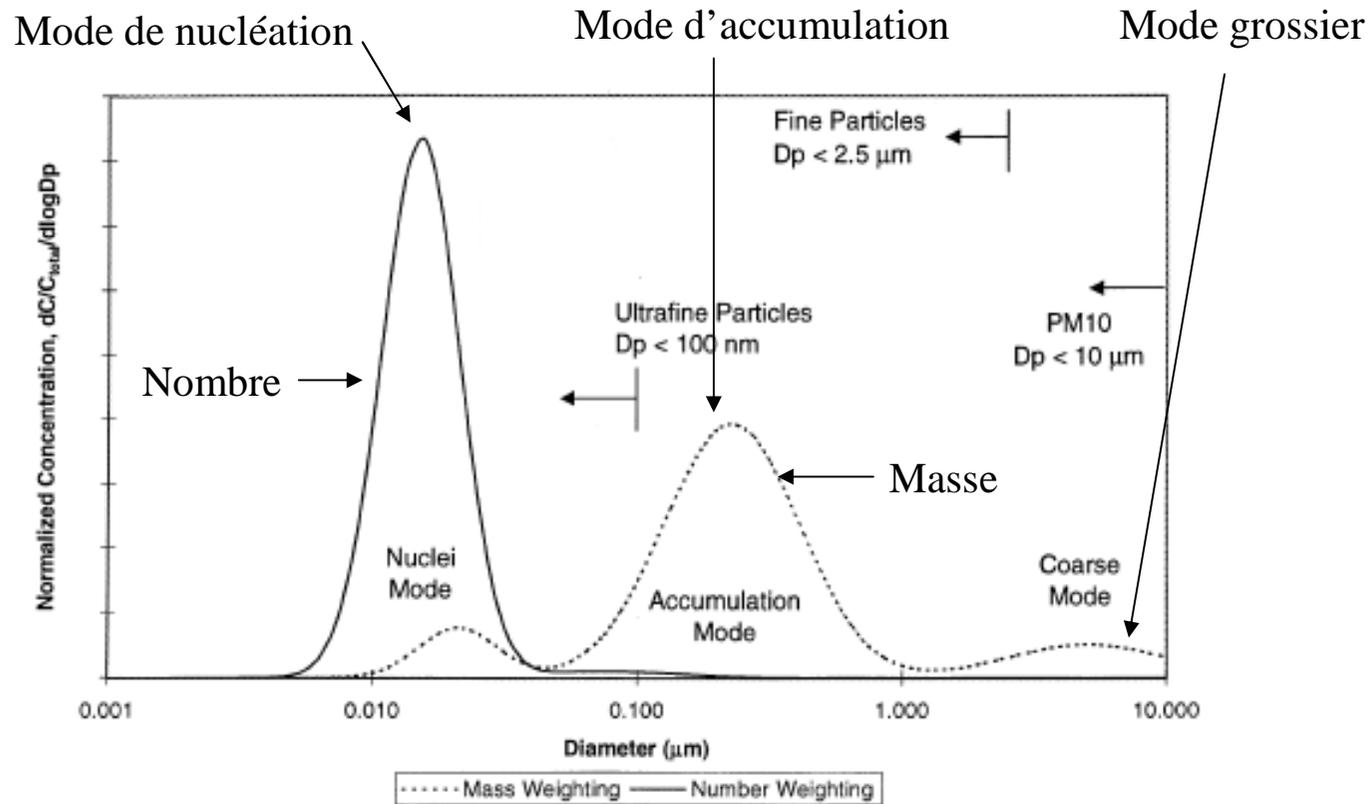
- Autres polluants :
  - produits phytosanitaires
  - PCB, HCl, HF
  - autres GES
  - autres métaux lourds (Co, Mn, Pd, Pt, Sb...)
  - HNO<sub>3</sub>
  - autres POP (HCB, PCPh...)

# Spéciation chimique

---

- COV :
  - Spéciation par molécules
  - Regroupement par espèces « modèle »
- NO<sub>x</sub>: NO et NO<sub>2</sub>
- SO<sub>x</sub>: SO<sub>2</sub> et SO<sub>3</sub> (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>)
- HAP : par exemple 8 composés (toxicité)
- PM : sulfate, carbone organique (OC), carbone suie (EC) et NaCl pour les sels marins
- Produits phytosanitaires (toxicité)
- Chrome : Cr<sup>VI</sup> (cancérogène) et Cr<sup>III</sup>
- Mercure : Hg<sup>0</sup>, Hg<sup>II</sup> et Hg<sub>p</sub>

# Granulométrie des particules



Source : adapté de Kittelson, *JAS*, **29**, 575, 1998

# Géoréférencement

---

- Lambert : utilisé par des AASQAs et les administrations
- UTM : utilisé par des AASQAs avec des situations trans-frontalières
- Latitude/longitude : utilisé par des organismes d'études et de recherche
  
- La possibilité de spatialiser l'inventaire avec plusieurs systèmes de projection est souhaitable

AASQA : Association agréée de surveillance de la qualité de l'air

UTM : Universal Transverse Mercator

# Résolution spatiale

---

- Mailles de 1 km pour les inventaires régionaux réalisés par les Agences de surveillance de la qualité de l'air (AASQAs) et l'inventaire national du ministère de l'Écologie (MEDDE)
- Mailles de 50 km environ pour l'inventaire européen (EMEP)
- Mailles de l'ordre de  $1^\circ$  (environ 1000 km) à  $0,25^\circ$  pour les inventaires globaux

# Référentiels des sources

---

- Élaboration de l'inventaire :
  - SNAP : “Selected nomenclature for air pollution”
  
- Format de sorties :
  - SECTEN (Secteurs économiques et énergie)
  - SNAP
  - NFR (format européen, “nomenclature for reporting”), CRF, etc.

# Référentiels des sources

## Code SNAP

---

- 01 : Combustion pour la production/transformation d'énergie
- 02 : Combustion non-industrielle (chauffage résidentiel...)
- 03 : Combustion dans l'industrie manufacturière
- 04 : Processus de production (industrie chimique, sidérurgique...)
- 05 : Extraction et distribution de combustibles fossiles
- 06 : Utilisation de solvants
- 07 : Trafic routier
- 08 : Autres trafic (avions, trains...)
- 09 : Traitement des déchets
- 10 : Agriculture
- 11 : Autres sources et puits (émissions biogéniques...)

# Référentiels des sources

## Code SNAP : détails

---

07 : Trafic routier

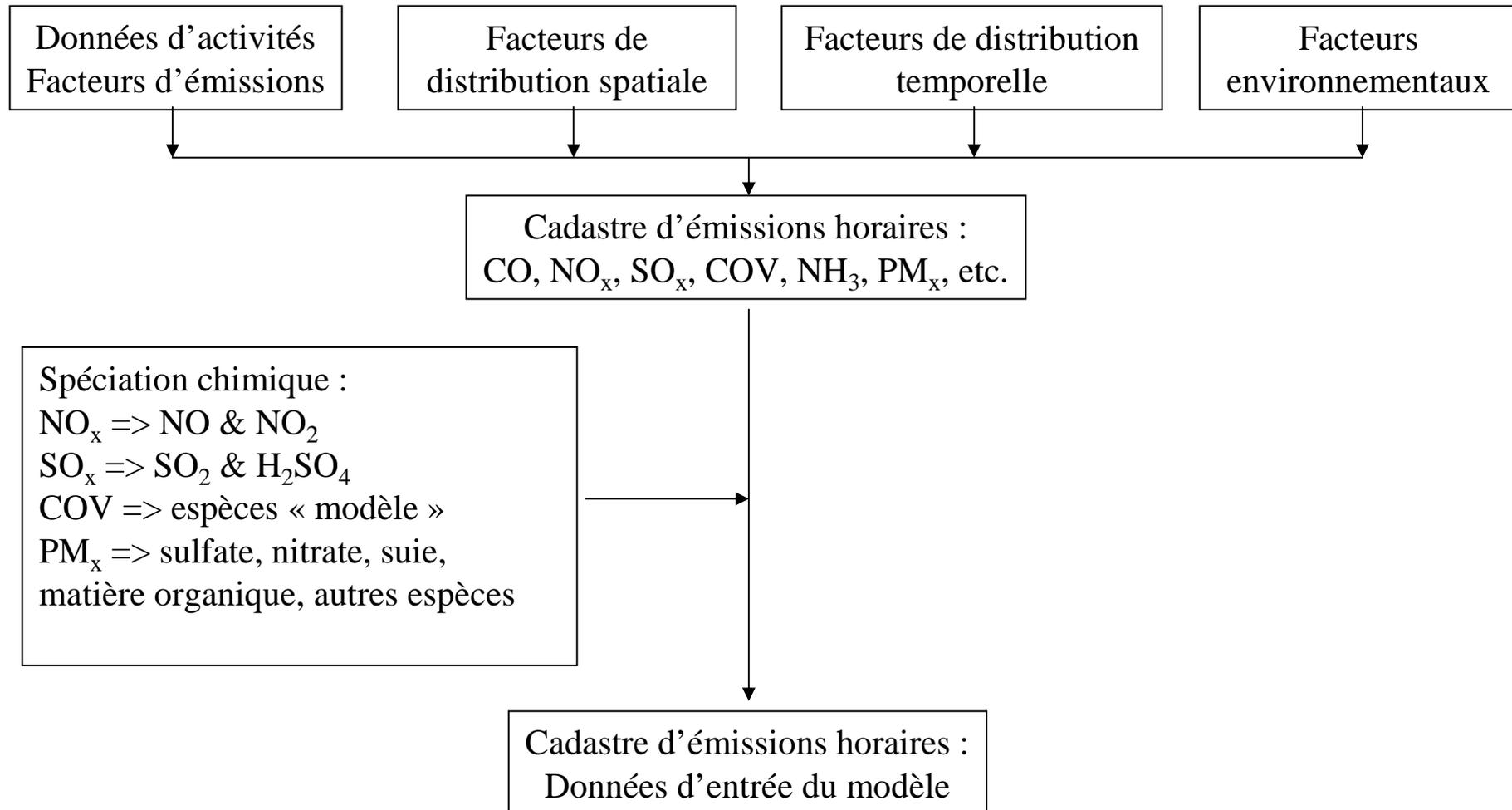
- 07 01 : véhicules particuliers
    - 07 01 01 : essence sans catalyseur
    - 07 01 02 : essence avec catalyseur
    - 07 01 03 : diesel
    - 07 01 04 : GPL
    - 07 01 05 : moteurs 2 temps
- etc.

# Réalisation de l'inventaire

---

- Inventaire des émissions
  - activités
  - facteurs d'émission
  - méthodes de répartition spatiale
  - clefs de répartition temporelle
  - spéciations chimiques
  - granulométrie des PM
- Logiciels pour la réalisation d'un inventaire spatialisé : « modèle d'émissions »

# Réalisation d'un inventaire d'émissions



# Manuels pour inventaires d'émissions

---

- Europe : EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook – 2009  
<http://www.eea.europa.eu/publications/emep-eea-emission-inventory-guidebook-2009>
- France : Organisation et méthodes des inventaires nationaux des émissions atmosphériques en France (OMINEA)  
<http://citepa.org/emissions/methodologie/index.htm>
- États-Unis : AP-42 Compilation of air pollutant emission factors  
<http://www.epa.gov/ttnchie1/ap42/>

# Exemple d'inventaire d'émissions

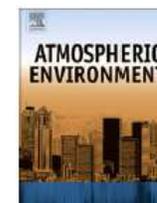
Atmospheric Environment 50 (2012) 88–96



Contents lists available at SciVerse ScienceDirect

Atmospheric Environment

journal homepage: [www.elsevier.com/locate/atmosenv](http://www.elsevier.com/locate/atmosenv)



## An atmospheric emission inventory of anthropogenic and biogenic sources for Lebanon

Antoine Waked<sup>a,b,\*</sup>, Charbel Afif<sup>b</sup>, Christian Seigneur<sup>a</sup>

<sup>a</sup>CEREA, Joint Laboratory École des Ponts ParisTech/EDF R&D, Université Paris-Est, Champs-sur-Marne, France

<sup>b</sup>Chemistry Department, Faculty of Sciences, Université Saint-Joseph, Beirut, Lebanon

### ARTICLE INFO

#### Article history:

Received 23 August 2011

Received in revised form

14 November 2011

Accepted 28 December 2011

#### Keywords:

Emissions

Air quality

Lebanon

Gridded inventory

Temporal profiles

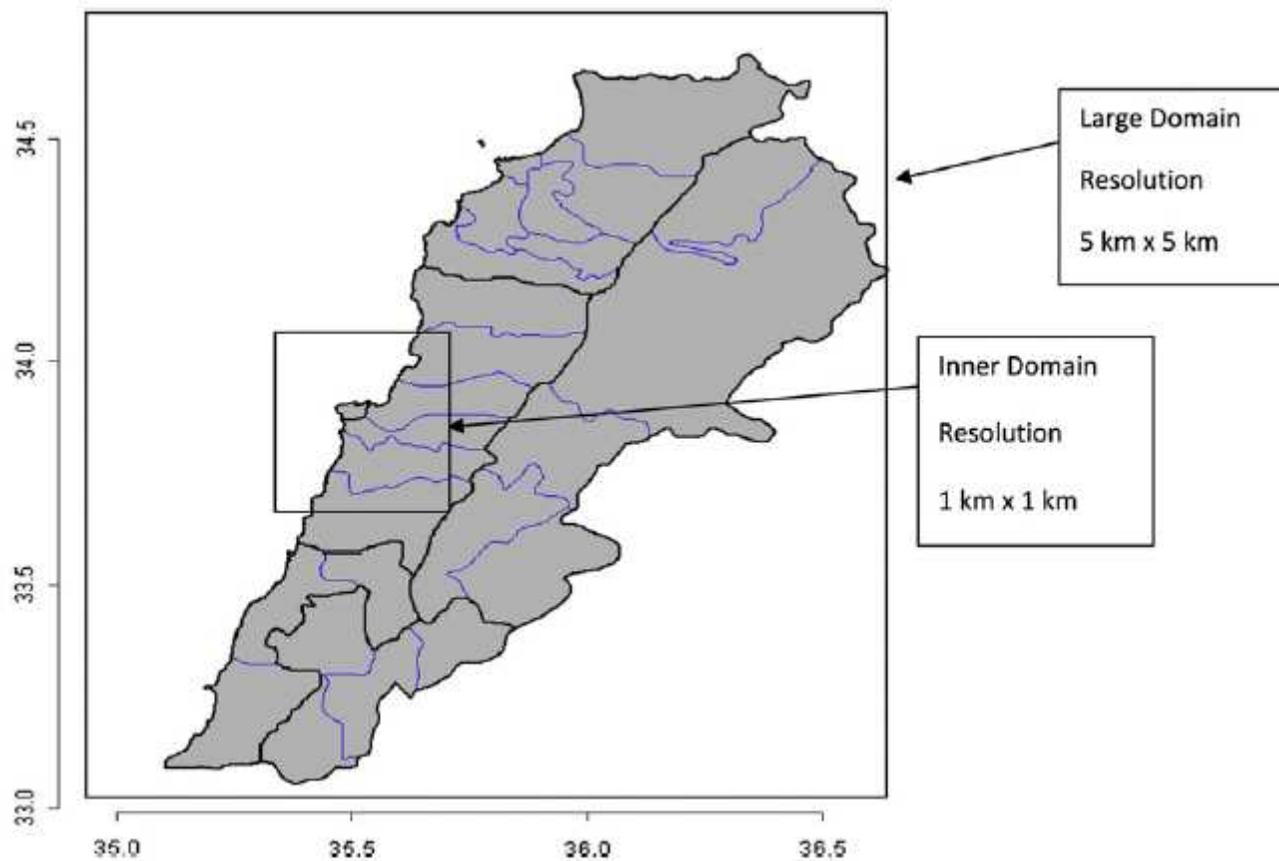
### ABSTRACT

A temporally-resolved and spatially-distributed emission inventory was developed for Lebanon to provide quantitative information for air pollution studies as well as for use as input to air quality models. This inventory covers major anthropogenic and biogenic sources in the region with 5 km spatial resolution for Lebanon and 1 km spatial resolution for its capital city Beirut and its suburbs. The results obtained for CO, NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub>, NMVOC, NH<sub>3</sub>, PM<sub>10</sub> and PM<sub>2.5</sub> for the year 2010 were 563, 75, 62, 115, 4, 12, and 9 Gg, respectively. About 93% of CO emissions, 67% of NMVOC emissions and 52% of NO<sub>x</sub> emissions are calculated to originate from the on-road transport sector while 73% of SO<sub>2</sub> emissions, 62% of PM<sub>10</sub> emissions and 59% of PM<sub>2.5</sub> emissions are calculated to originate from power plants and industrial sources. The spatial allocation of emissions shows that the city of Beirut and its suburbs encounter a large fraction of the emissions from the on-road transport sector while urban areas such as Zouk Mikael, Jieh, Chekka and Selaata are mostly affected by emissions originating from the industrial and energy production sectors. Temporal profiles were developed for several emission sectors.

© 2012 Elsevier Ltd. All rights reserved.

# Exemple d'inventaire d'émissions

Domaines de l'inventaire d'émissions : le Liban et l'agglomération de Beyrouth



# Exemple d'inventaire d'émissions

## Facteurs d'émission et activités par catégorie de sources : méthodologie EMEP

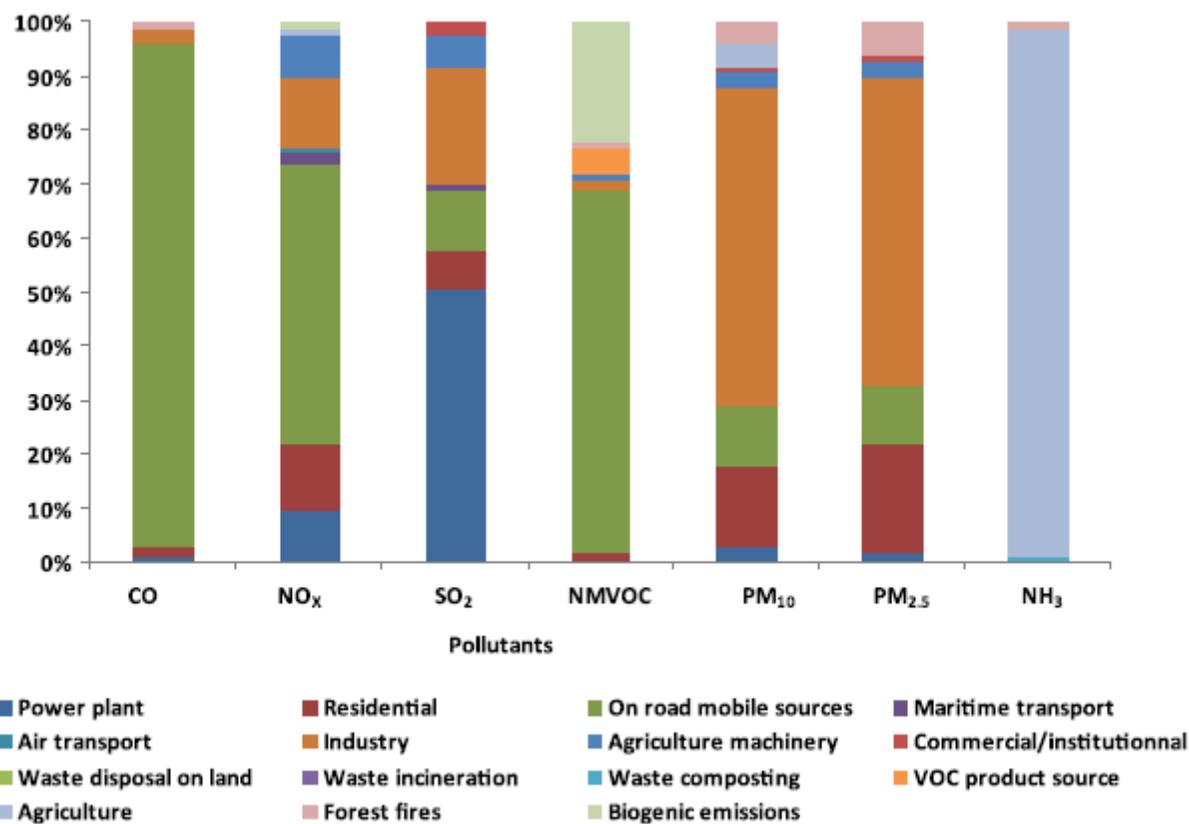
Source category	Emission factors (EF) and type of activity rate (AR)
Power plants	Tier 1 EF in g/TJ for fossil fuel power plants (EMEP, 2009) AR = energy production in TJ
Industry	Tier 2 EF in g/Mg of production (EMEP, 2009) AR = production in Mg
Other combustion sources	Tier 1 EF in g/TJ based on fuel consumption or in g kg <sup>-1</sup> of burned area for forest fires (EMEP, 2009)
Transport sector	Tier 3 EF in g km <sup>-1</sup> based on fuel consumption which depends on vehicle speed as well as on vehicle age and category. (EMEP, 2009) AR = travelled distance in km as well as the number of vehicles in each segment
Waste	Tier 1 EF in g m <sup>-3</sup> of landfill gas for waste disposal on land and in g kg <sup>-1</sup> of waste incinerated (EMEP, 2009). AR = kg of waste or m <sup>3</sup> of landfill gas
Agriculture	Tier 1 EF in g kg <sup>-1</sup> of fertilizers applied for crop production and in kg/animal (cow, sheep and goats) for animal manure management (EMEP, 2009) AR = kg of fertilizers per ha or number of cows, sheep and goats
Fugitive emissions	Tier 1 EF in kg/Mg of gasoline (EMEP, 2009) AR = Mg of gasoline for each fuel storage tank
Biogenic emissions	Tier 1 EF which depends on the flow in g ha <sup>-1</sup> of forest areas (EMEP, 2009) AR = forest surface area in ha

# Exemple d'inventaire d'émissions

## Répartition spatiale par catégorie de sources

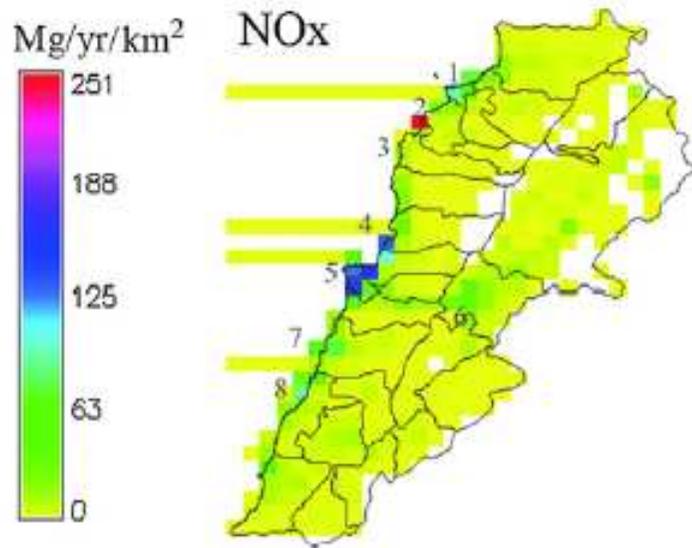
Sub-category	Spatial surrogate per sub-region	Spatial surrogate for the 5 km × 5 km grid cells
Urban traffic emissions	Origin/destination trips except for the city of Beirut where the emissions were provided for each segment road	Population densities except for the city of Beirut where the emissions were provided for each road segment
Line sources (highways, national roads)	Emissions based on observed daily traffic in several locations in Lebanon	Road network
Maritime transport	Annual incoming and outgoing ships in each harbour	Harbour areas
Air transport	Annual airplane landing and take-off	Airport
Power and large industrial plants as well as municipal waste incineration and waste composting	Emissions originated from each plant based on annual production in kWh/yr or in tons/yr	Geolocation of power and large industrial plants
Crop production and animal manure management	Emissions were allocated to the surface of cultivated area in ha for each sub-region and to the number of heads in each sub-region	Cultivated areas
Residential, commercial/institutional, small industrial plants, agricultural machinery and forest fires	Emissions based on fuel consumption or annual production was allocated to the number of units and establishments for each sub-region. Emissions based on the burned surface area provided by region were allocated to each sub-region based on the forest surface area in each sub-region	Population densities except for Beirut where the building densities for each district were provided  Geolocation of forests
Fuel storage tanks and waste disposal on land	The gasoline imported to Lebanon was allocated to each fuel tank based on their volume capacity The quantity of waste transported to each landfill site	Geolocation of fuel storage tanks  Geolocation of landfill sites
Emissions from forests and grasslands	Emissions were allocated based on forest and grassland surface area of each sub-region	Geolocation of forests

# Exemple d'inventaire d'émissions



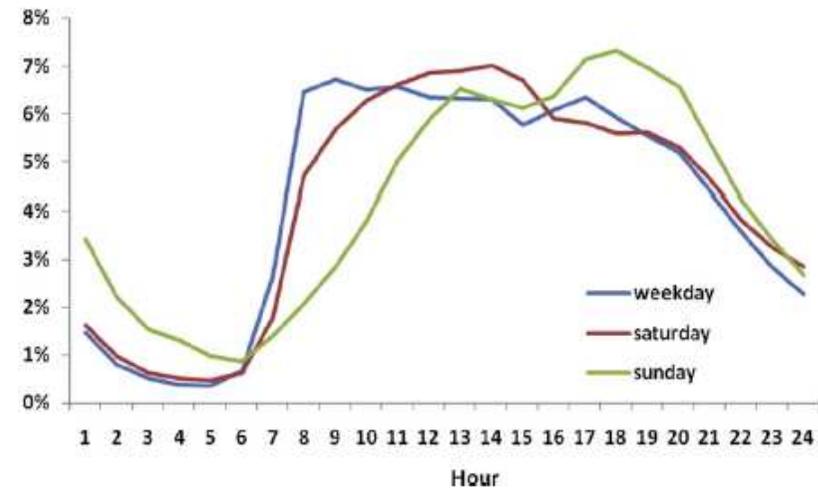
Émissions par catégorie de sources pour le Liban  
Waked et al., *Atmos. Environ.*, **50**, 88-96 (2012)

# Exemple d'inventaire d'émissions



Représentation spatiale des émissions d'oxydes d'azote (NO<sub>x</sub>)

Représentation temporelle des émissions du trafic routier



Représentation spatio-temporelle des émissions pour le Liban  
Waked et al., *Atmos. Environ.*, **50**, 88-96 (2012)

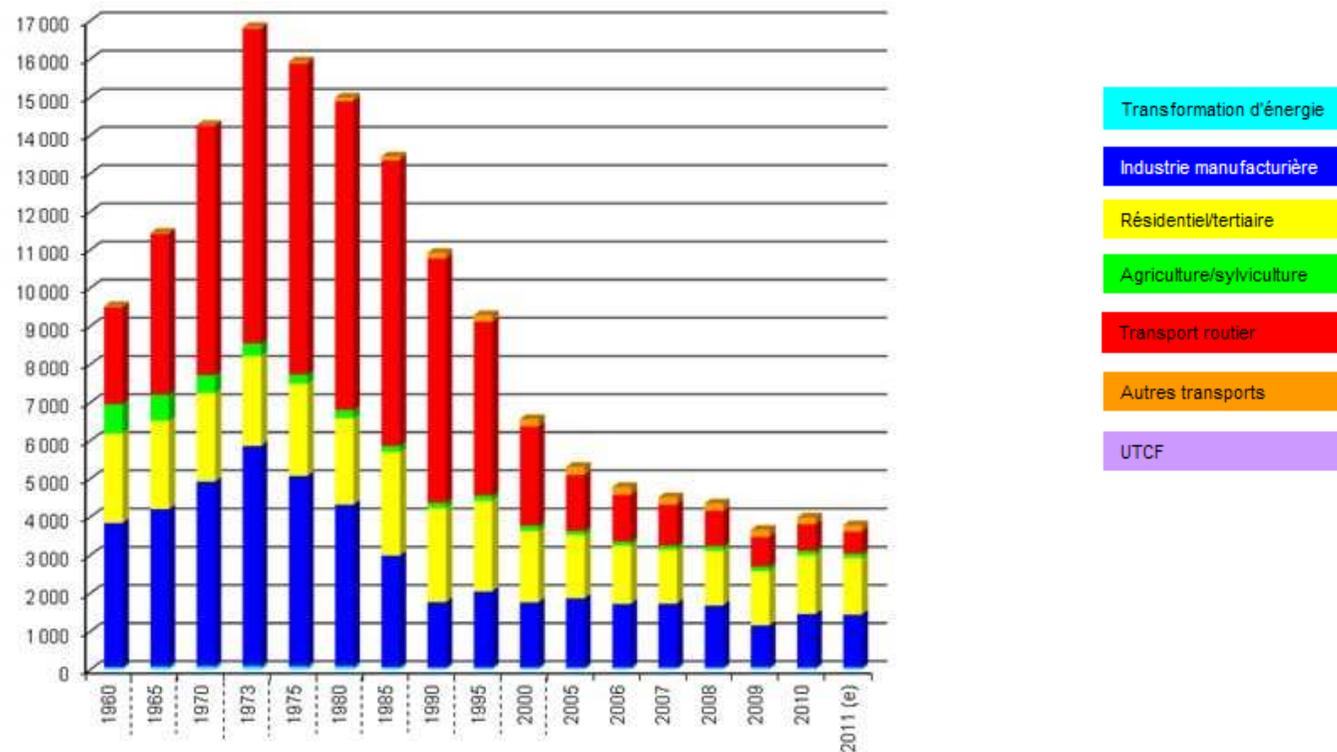
# Évolution des émissions de polluants atmosphériques en France

---

- Polluants primaires qui sont émis directement dans l'atmosphère
  - particules, monoxyde de carbone, oxydes d'azote, composés organiques volatils, dioxyde de soufre, plomb, etc.
- Précurseurs de polluants secondaires qui sont formés par réactions chimiques dans l'atmosphère
  - oxydes d'azote, composés organiques volatils, dioxyde de soufre, ammoniac

# Les émissions de monoxyde de carbone en France

CO Emissions atmosphériques par secteur en France métropolitaine en kt

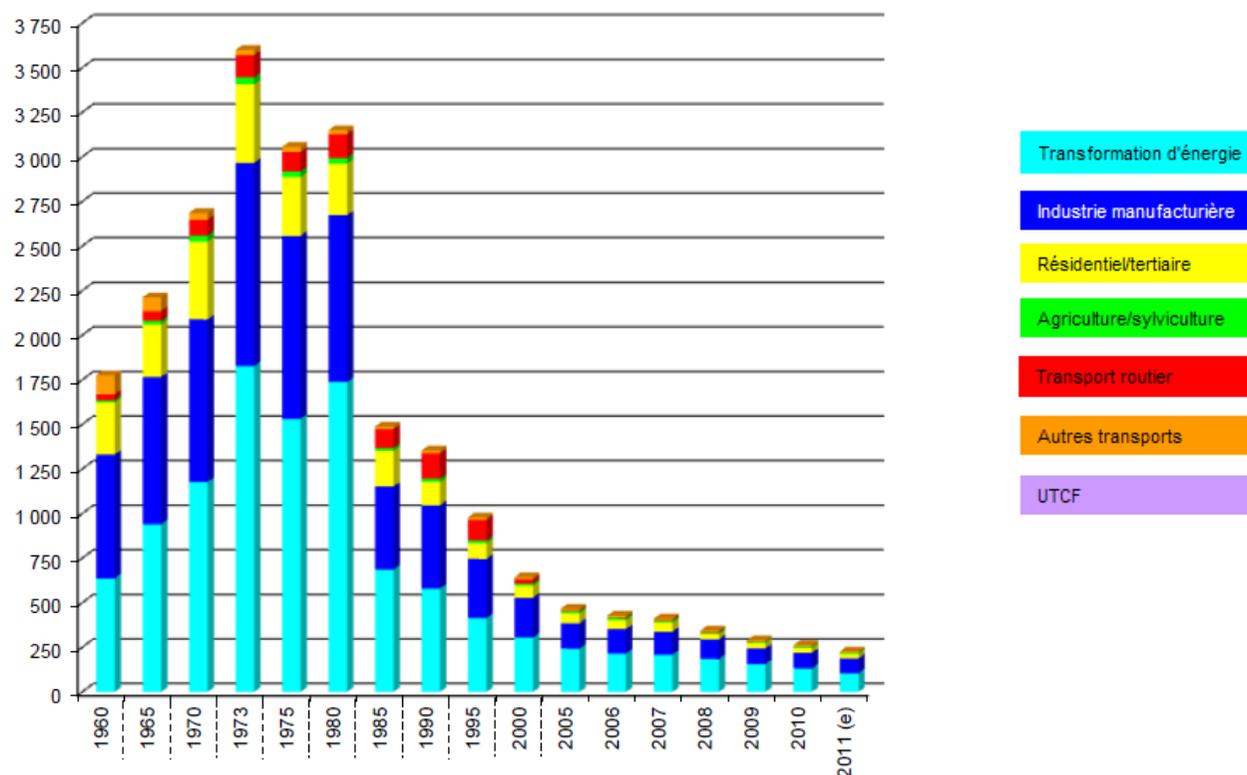


Source : [www.citepa.org](http://www.citepa.org)

# Les émissions de dioxyde de soufre en France

SO<sub>2</sub>

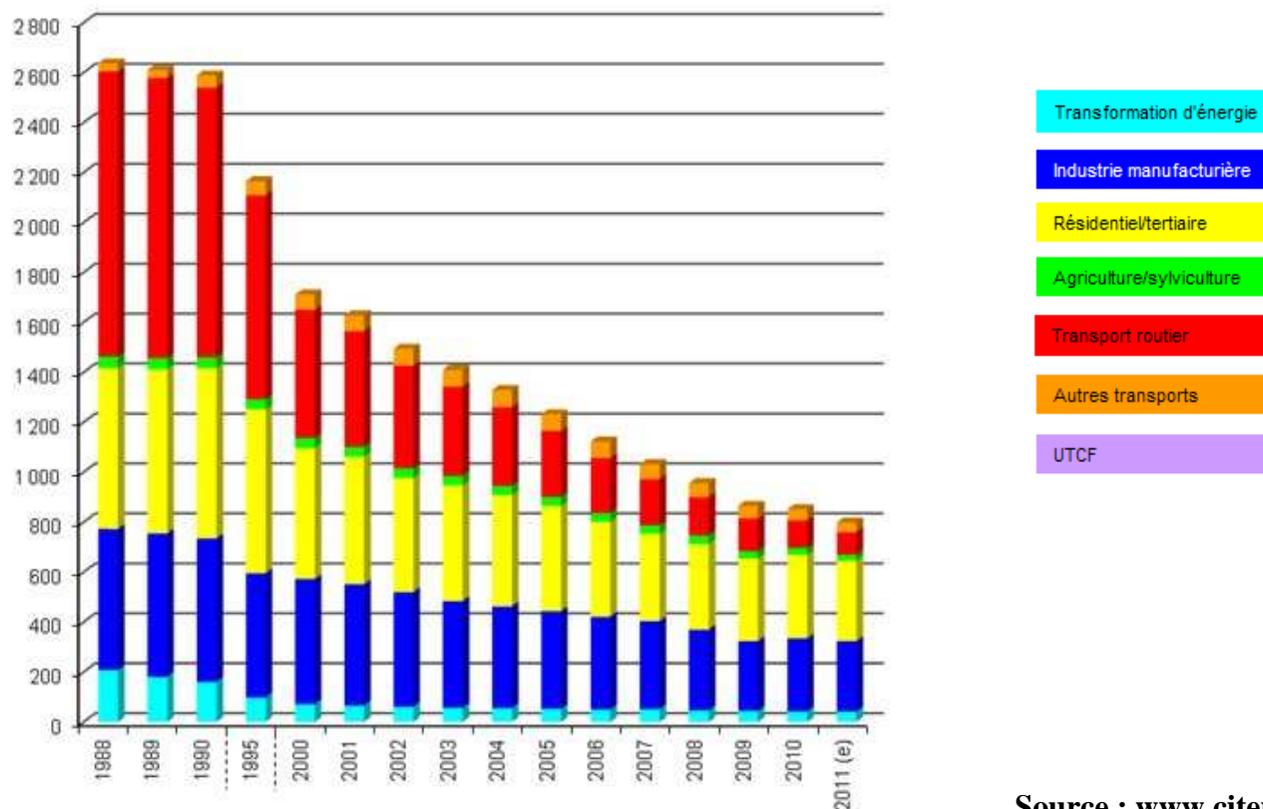
Emissions atmosphériques par secteur en France métropolitaine en kt



Source : [www.citepa.org](http://www.citepa.org)

# Les émissions de composés organiques volatils en France

COVNM Emissions atmosphériques par secteur en France métropolitaine en kt

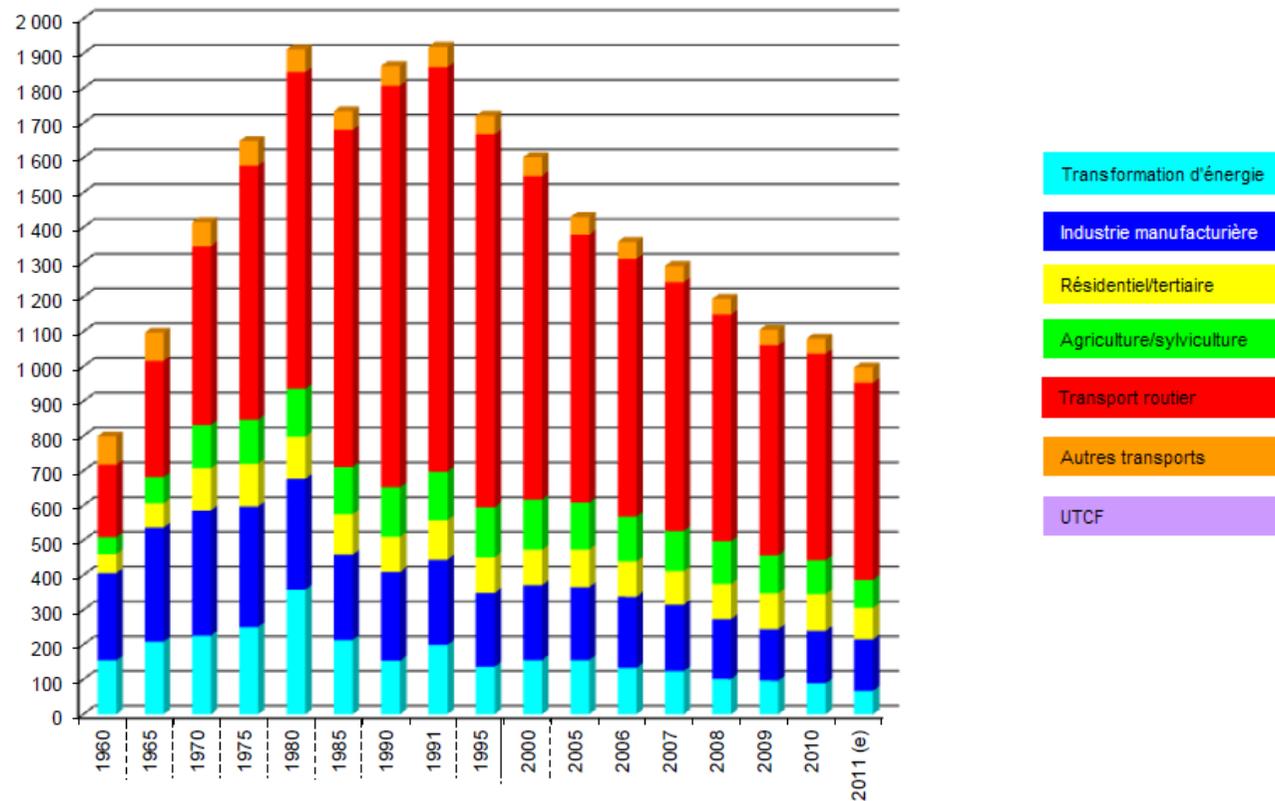


Source : [www.citepa.org](http://www.citepa.org)

# Les émissions d'oxydes d'azote en France

NOx

Emissions atmosphériques par secteur en France métropolitaine en kt



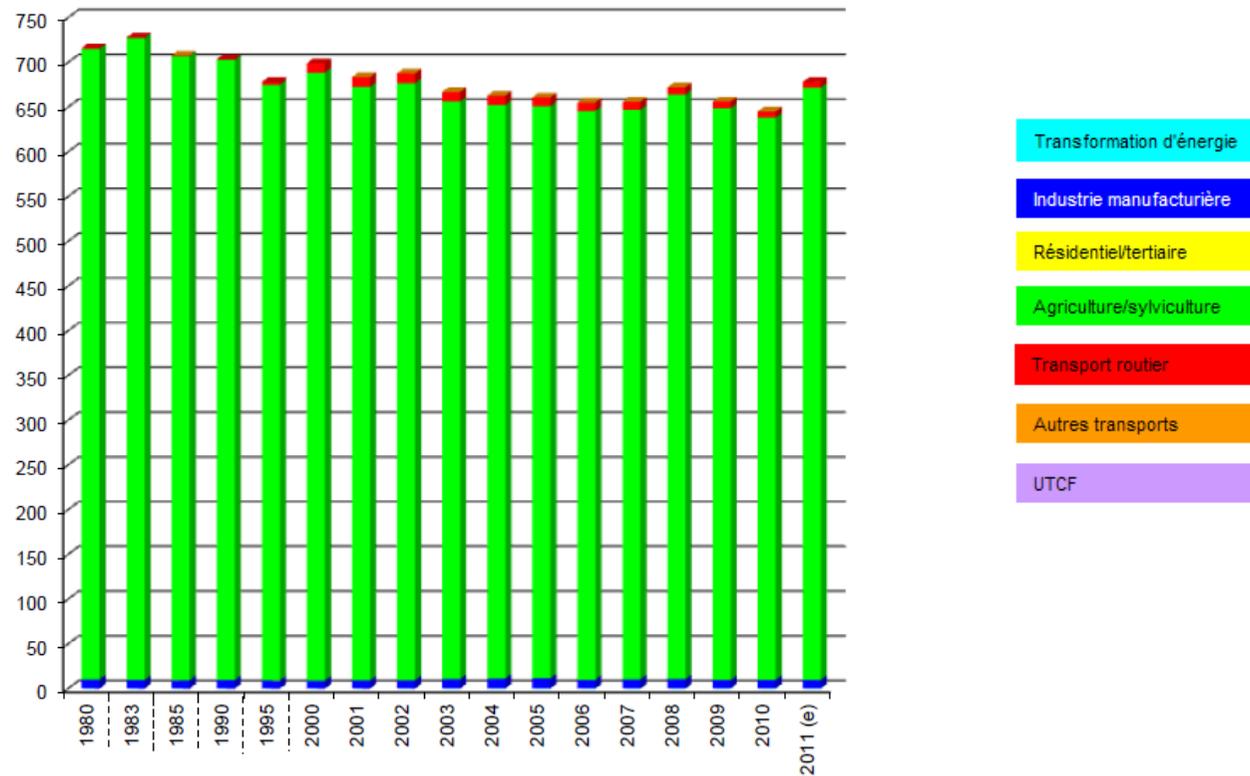
(e) estimation préliminaire

Source : [www.citepa.org](http://www.citepa.org)

# Les émissions d'ammoniac en France

NH<sub>3</sub>

Emissions atmosphériques par secteur en France métropolitaine en kt

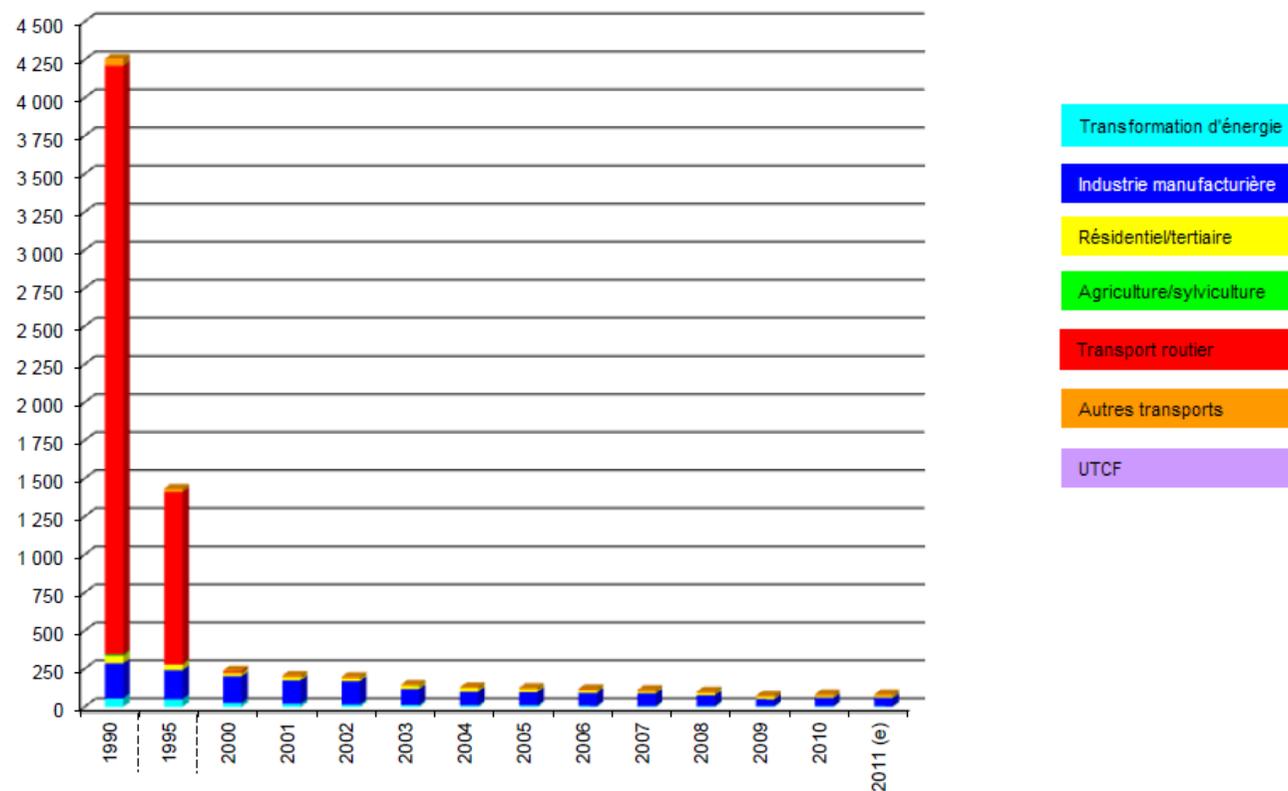


Source : [www.citepa.org](http://www.citepa.org)

# Les émissions de plomb en France

Pb

Emissions atmosphériques par secteur en France métropolitaine  
en t



(e) estimation préliminaire

Source : [www.citepa.org](http://www.citepa.org)

# Réduction des émissions

---

L'équation fondamentale pour l'estimation des émissions de polluants d'une source peut être augmentée d'un terme caractérisant la réduction des émissions :

$$E_{ij} = FE_{ij} \times A_j \times (1 - RE_{ij})$$



Fraction de réduction des émissions du polluant i émis de la source j

# Réduction des émissions de polluants gazeux

---

- Les principales méthodes pour réduire les émissions de gaz sont :
  - Absorption dans un liquide
  - Adsorption sur un solide
  - Transformation chimique
  - Incinération

# Absorption dans un liquide

---

- La méthode est fondée sur la différence entre la concentration du polluant à la surface du liquide et sa pression dans l'écoulement du rejet. Il faut donc que le polluant soit très soluble.
  - Pour des polluants très solubles dans l'eau (acide chlorhydrique, HCl, et acide fluorhydrique, HF) : absorption dans l'eau
  - Pour des polluants moins solubles dans l'eau mais acides (dioxyde de soufre, SO<sub>2</sub>) : absorption dans une solution alcaline (basique) afin de déplacer l'équilibre vers la phase liquide
  - L'absorption peut être augmentée si le polluant absorbé est ensuite transformé chimiquement en une espèce non-volatile (conversion de SO<sub>2</sub> en sulfate)

# Adsorption sur un solide

---

- La méthode est fondée sur la formation d'une liaison entre une molécule de gaz et la surface du solide. Ce phénomène d'adsorption peut être catégorisé selon trois grands principes :
  - Adsorption sur un solide non-polaire (carbone activé ou charbon actif)
  - Adsorption sur un solide polaire (alumine, silice...) : ces solides vont cependant aussi adsorber l'eau, ce qui peut diminuer l'efficacité
  - Chimie-sorption : une réaction chimique a lieu sur le solide avec possible désorption du produit moins polluant

# Adsorption sur un solide

---

- Exemple du transfert de masse du gaz dans une colonne de charbon actif
- Utilisé pour réduire les émissions d'hydrocarbures et de mercure gazeux
- Il faut ensuite disposer de façon propre du produit avec le polluant adsorbé

# Transformation chimique

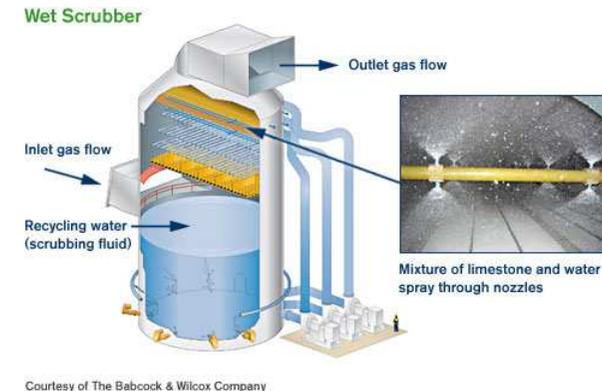
---

- La transformation chimique du polluant permet soit de former un produit polluant qui est plus facilement capté, soit de former un produit non polluant qui peut être émis dans l'atmosphère
  - Réduction des émissions de  $\text{SO}_2$
  - Réduction des émissions de  $\text{NO}_x$

# Transformation chimique

## Réaction de SO<sub>2</sub>

Le dioxyde de soufre émis par les centrales électriques au charbon peut être capté après réaction avec la chaux (CaO) ou le calcaire (CaCO<sub>3</sub>)



CaSO<sub>4</sub>·2 H<sub>2</sub>O (gypse) est un solide qui peut encrasser le laveur, mais qui peut aussi être vendu comme produit dans la construction. On minimise la formation du gypse si on maintient le pH > 6.

La réaction avec CaO est plus efficace que celle avec CaCO<sub>3</sub>, mais CaO coûte plus cher.

# Transformation chimique

## Réaction de $\text{SO}_2$

Le dioxyde de soufre émis par les centrales électriques au charbon peut être capté après réaction avec la chaux ( $\text{CaO}$ ) ou le calcaire ( $\text{CaCO}_3$ )

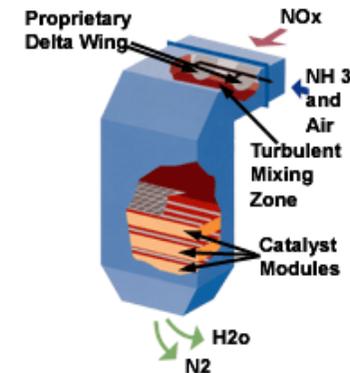
Le processus peut avoir lieu dans un laveur en milieu aqueux (voir absorption dans un liquide) ou avec pulvérisation de gouttelettes de chaux ou de calcaire dans l'écoulement contenant du  $\text{SO}_2$ . Ces gouttelettes s'évaporent avant d'atteindre le bas de la colonne et les particules sèches sont ensuite collectées par filtration.



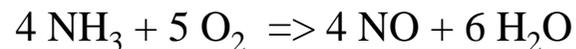
# Transformation chimique

## Réaction de NO<sub>x</sub>

Les oxydes d'azote émis par les centrales électriques au charbon peut être captés après réduction sélective catalytique (« SCR ») ou réduction sélective non-catalytique (« SNCR »)



La réduction non-catalytique a lieu en phase gazeuse (homogène) ; la réduction catalytique a lieu à la surface du catalyseur solide (hétérogène). Le catalyseur est généralement TiO<sub>2</sub> et/ou V<sub>2</sub>O<sub>5</sub>. Le terme « sélective » caractérise le fait que l'ammoniac réagit préférentiellement avec NO ou NO<sub>2</sub> plutôt qu'avec O<sub>2</sub> (à des températures entre 1200 et 1300 K).



$$T > 1370 \text{ K}$$

# Réduction des émissions de polluants gazeux : Efficacités

---

Efficacité des équipements utilisés pour réduire les émissions de SO<sub>2</sub> et NO<sub>x</sub> des centrales électriques au charbon

Équipement	Polluant	Efficacité
Laveur (FGD)	SO <sub>2</sub>	75 à 90%
Réduction sélective non-catalytique	NO <sub>x</sub>	30 à 80%
Réduction sélective catalytique	NO <sub>x</sub>	90%

# Réduction des émissions de polluants particulaires

---

- Les principales méthodes pour réduire les émissions de particules sont :
  - Filtration
  - Capture électrostatique
  - Capture par inertie aérodynamique

# Réduction des émissions de polluants particulaires

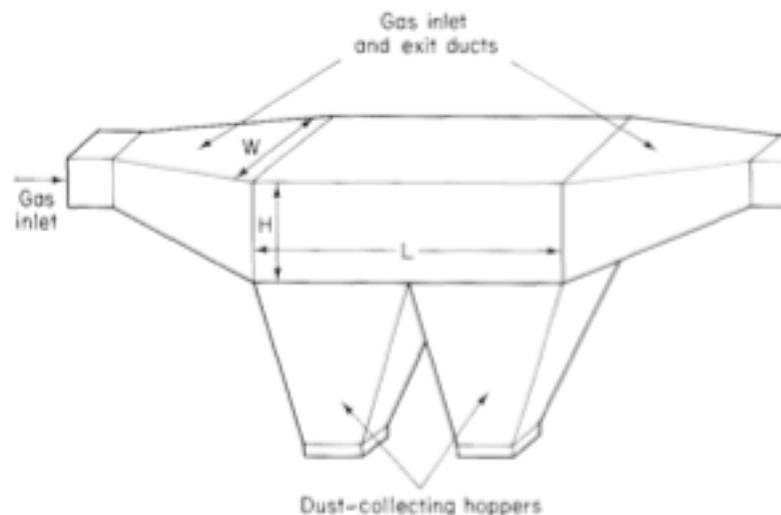
---

- Les processus physiques qui gouvernent la capture des particules dans un écoulement fluide gazeux sont principalement les suivants :
  - Impact par inertie et interception
  - Diffusion brownienne
  - Sédimentation
  - Migration dans un champ électrique (électrophorèse)
- Les deux premiers processus sont aussi importants pour les dépôts atmosphériques et lors de l'inhalation, le troisième est important pour les dépôts atmosphériques secs.

# Réduction des émissions de polluants particulaires

---

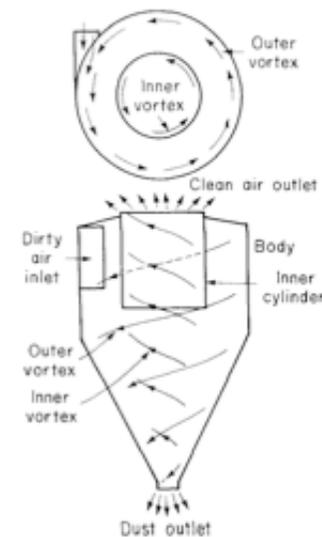
- Chambre de sédimentation
  - Ce procédé est efficace seulement pour les poussières de taille suffisante pour que la vitesse de sédimentation soit suffisamment élevée.



Source : Flagan et Seinfeld, 1988

# Réduction des émissions de polluants particulaires

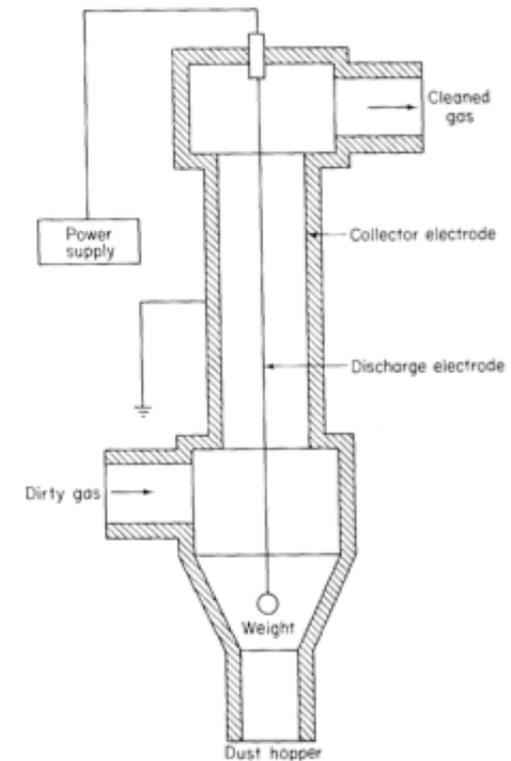
- Cyclones
  - Ces appareils utilisent principalement l'inertie des particules dans un écoulement pour les capter sur la paroi ou des gouttelettes.



Source : Flagan et Seinfeld, 1988

# Réduction des émissions de polluants particulaires

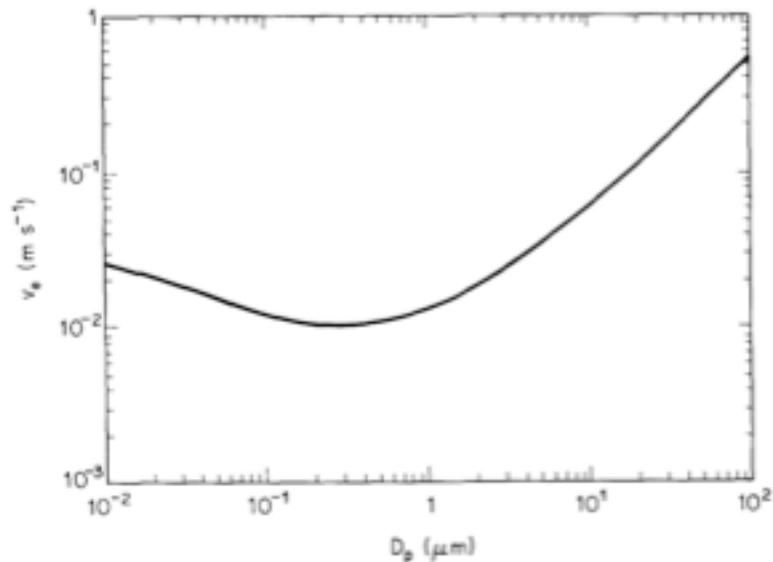
- Précipitateurs électrostatiques
  - Une décharge électrique est effectuée dans l'écoulement pour charger les particules électriquement.
  - Les particules chargées migrent alors vers la paroi « électrode »



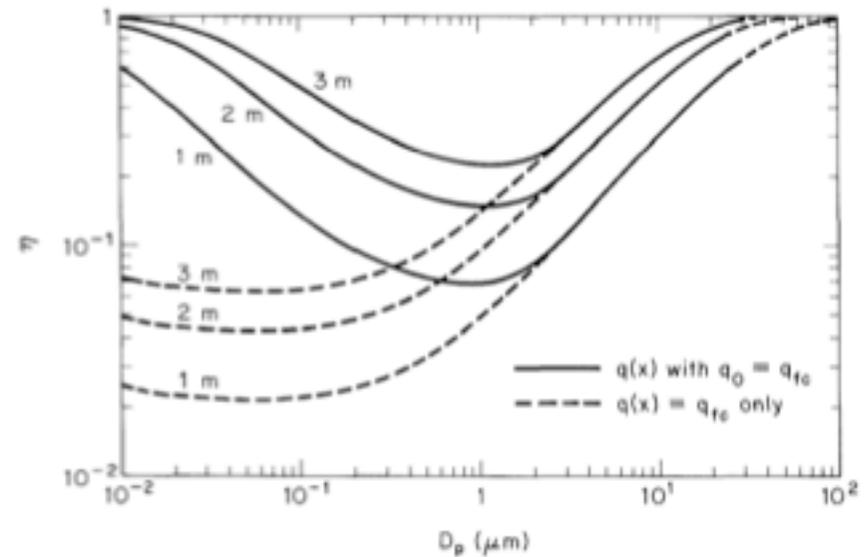
Source : Flagan et Seinfeld, 1988

# Réduction des émissions de polluants particulaires : ESP

Dans un précipitateur électrostatique (ESP), les particules grossières ( $> \sim 1$  micron) se chargent principalement par capture directe des ions gazeux alors que les particules fines ( $< \sim 1$  micron) se chargent par diffusion des ions gazeux vers les particules



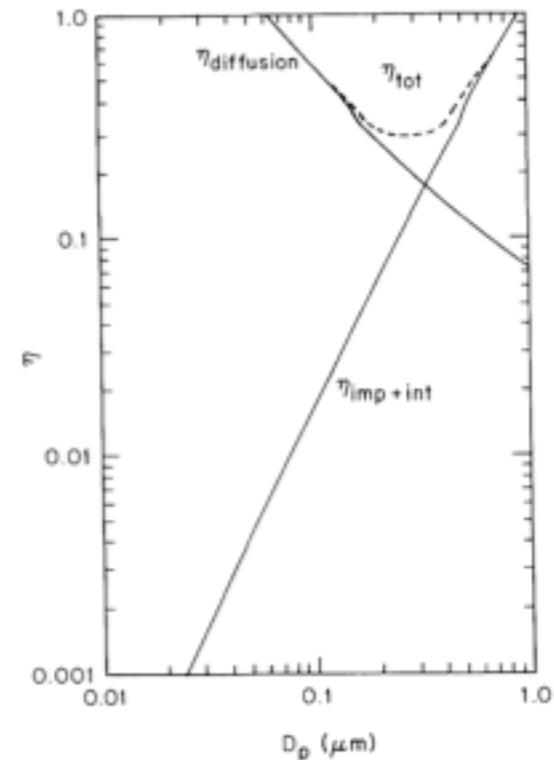
Vitesse de migration dans un champ électrique  
Source : Flagan et Seinfeld, 1988



Efficacité de l'ESP avec et sans l'effet de la charge par diffusion

# Réduction des émissions de polluants particulaires : Filtration

Les filtres à particules collectent les particules selon les mêmes processus que ceux qui affectent les dépôts atmosphériques secs : impact par inertie, interception et diffusion brownienne (les forces électrostatiques peuvent aussi jouer un rôle)



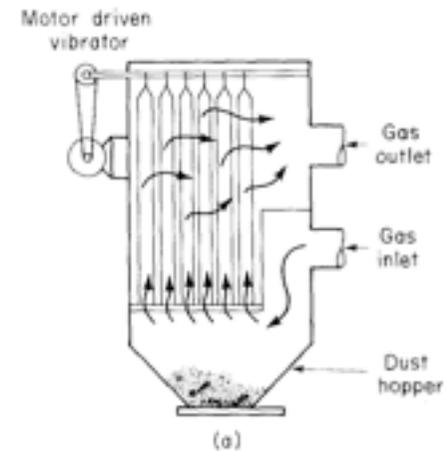
Efficacité pour impact par inertie et interception et par diffusion brownienne pour un cylindre placé transversalement à l'écoulement

Source : Flagan et Seinfeld, 1988

# Réduction des émissions de polluants particulaires : Filtration

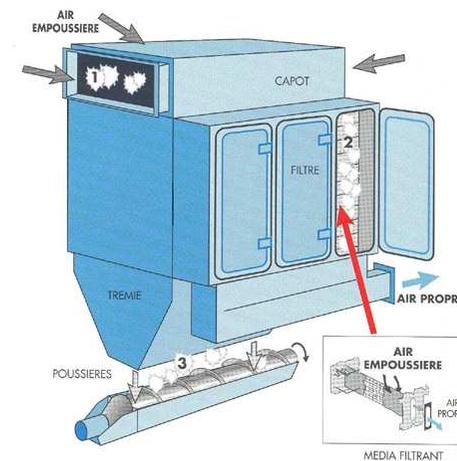
Les filtres à particules captent les particules avec une très bonne efficacité.

Un mécanisme (vibration, jet d'air, nettoyage mécanique) doit être utilisé pour enlever les particules captées sur les filtres à manche et les récupérer dans le fond de l'appareil



Exemple d'un appareil de filtration

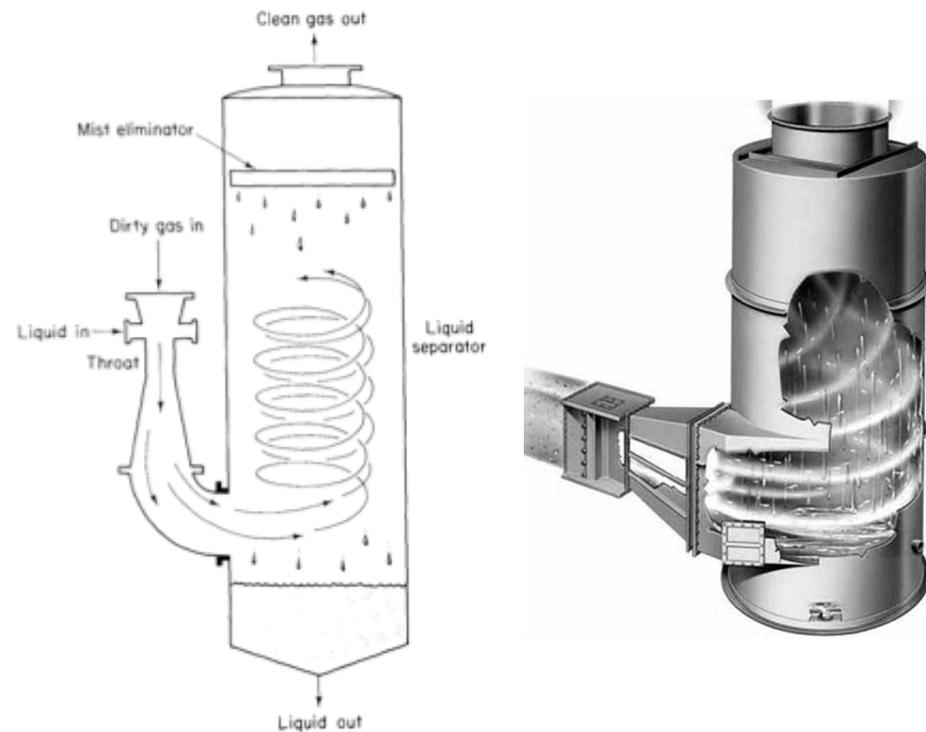
Source : Flagan et Seinfeld, 1988



# Réduction des émissions de polluants particulaires : Laveurs

Différents appareils existent pour collecter les particules au moyen de gouttelettes : laveurs avec pulvérisation, laveurs de type venturi, tours

Dans un laveur venturi, l'effet venturi (accélération des particules et des gouttelettes) permet d'augmenter l'efficacité de collision entre particules et gouttelettes

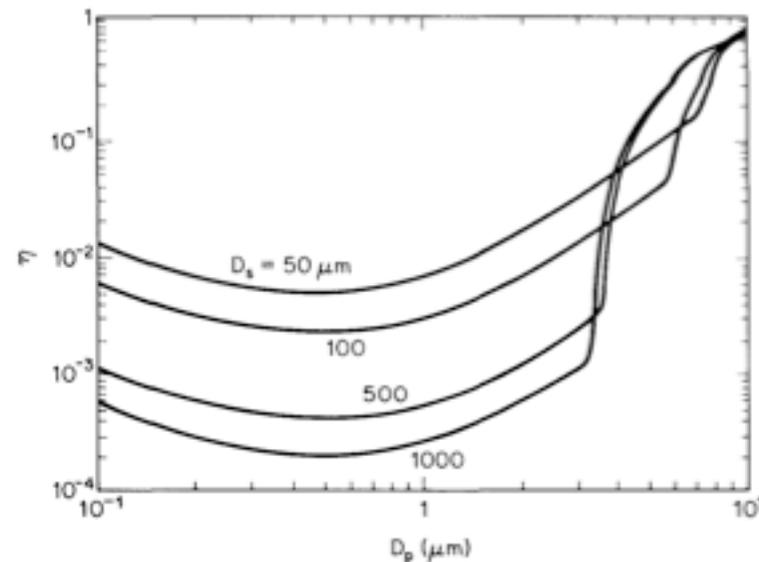


Source : Flagan et Seinfeld, 1988

Exemple d'un laveur venturi

# Réduction des émissions de polluants particulaires : Laveurs

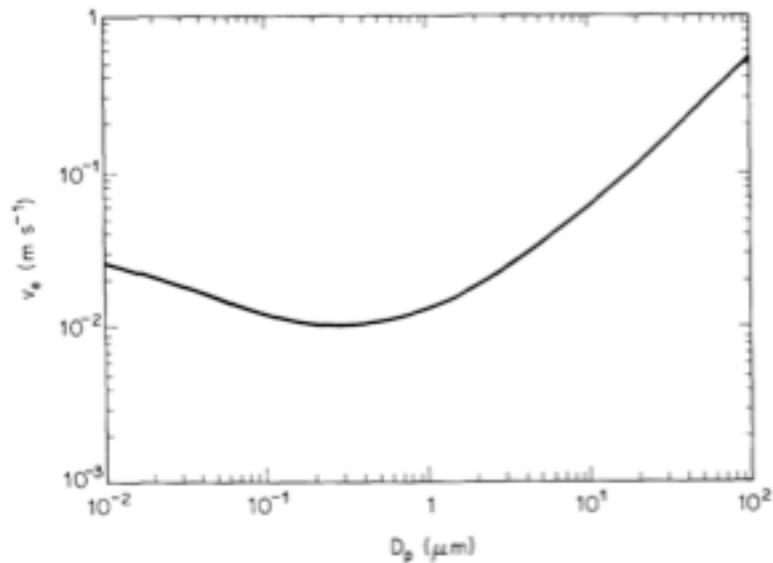
Les processus d'impact par inertie, interception et diffusion brownienne gouvernent l'efficacité de ces appareils de type laveur. Comme pour les dépôts humides atmosphériques, ce sont les plus grosses particules qui sont lessivées le plus efficacement



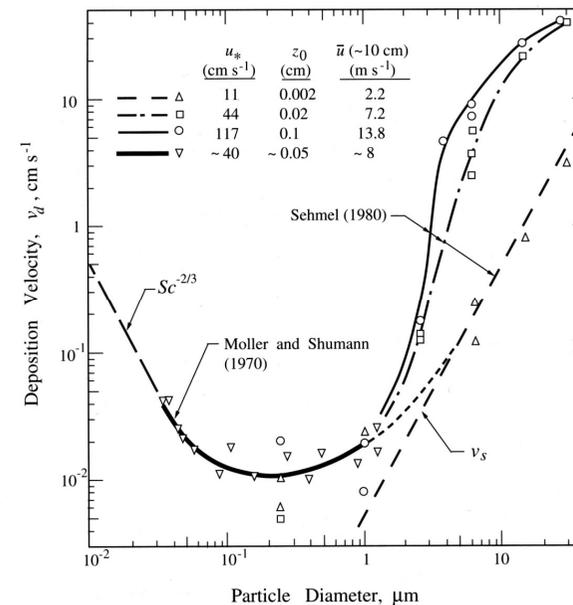
Efficacité de capture d'une particule par une goutte d'eau en fonction de la taille

# Réduction des émissions de polluants particulaires

Tous ces processus sont efficaces pour les très grosses particules (poussières), modérément efficaces pour les particules ultra fines et le moins efficaces pour les particules fines (0,1 à 2,5 microns)



Vitesse de migration dans un champ électrique



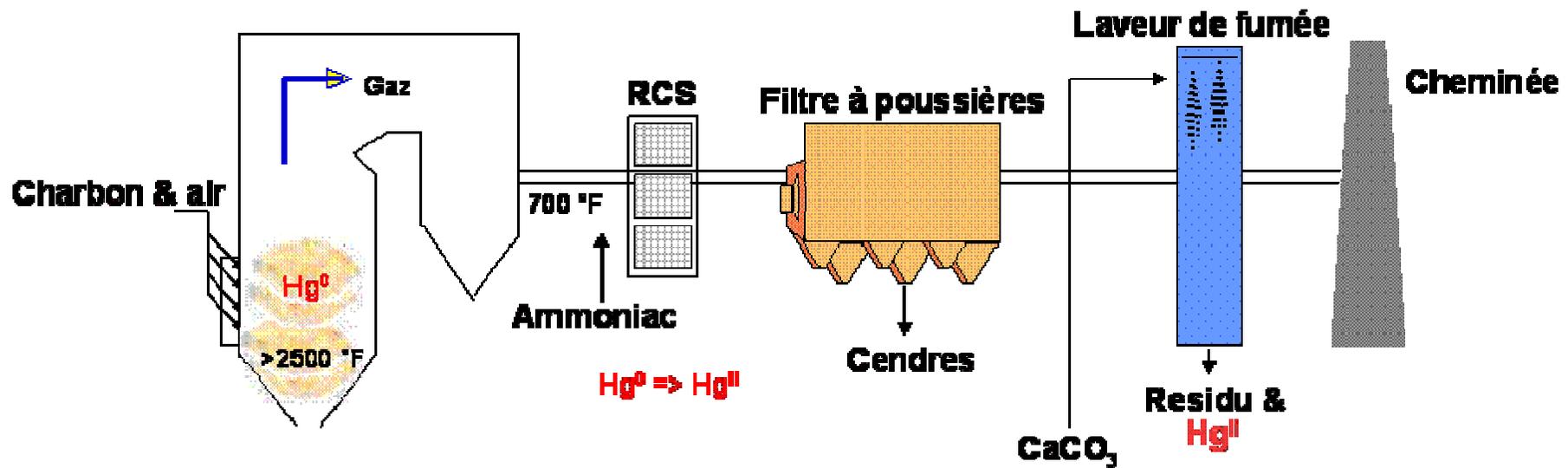
Vitesse de dépôt sur une surface

# Réduction des émissions de polluants particulaires : Efficacités

Appareil	Diamètre minimum des particules collectées	Efficacité
Chambre de sédimentation	> 50 microns	< 50 %
Cyclone	5 à 25 microns	50 à 90 %
Laveur venturi	> 0,5 micron	< 99 %
Précipitateur électrostatique	< 1 micron	95 à 99 %
Filtre	< 1 micron	> 99 %

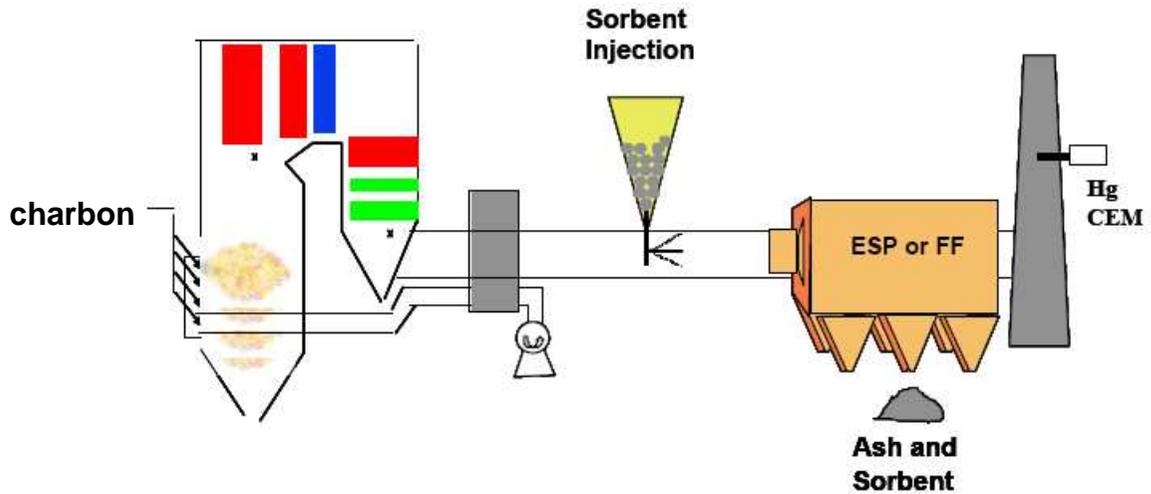
# Réduction des émissions de mercure par transformation chimique et absorption

Réduction de façon indirecte à travers les réductions de  $\text{NO}_x$  et de  $\text{SO}_2$



Les systèmes de réduction des émissions de  $\text{NO}_x$  (réduction catalytique sélective) et de  $\text{SO}_2$  (laveur de fumées) diminuent les émissions de mercure

# Réduction des émissions de mercure par adsorption et capture des particules



Réduction de façon directe :  
Injection de charbon actif

