
Cours SGE

« Pollution et aérocontamination Atmosphère et air intérieur »

Dépôts atmosphériques et impacts sur les écosystèmes

Christian Seigneur

Cerea

Plan

- Dépôts humides
- Dépôts secs
- Ré-émissions
- Modélisation multi-milieux
- Exemples d'impacts des dépôts de polluants atmosphériques
 - Ozone
 - Pluies acides
 - Euthrophisation
 - POPs
 - Métaux lourds : le mercure

Dépôts humides

- Les dépôts humides peuvent être définis comme le transfert de matière de l'atmosphère à des surfaces dû aux précipitations
 - Pluie
 - Neige
 - Grêle
 - Brouillard
 - Nuages de montagne

Transfert de l'atmosphère à la surface

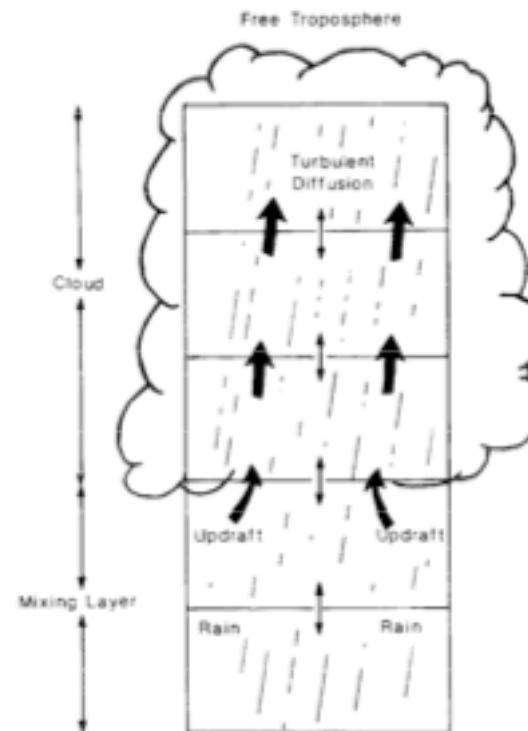
- Les deux phénomènes fondamentaux sont
 - La capture par les gouttes de pluie de polluants gazeux ou particulaires dans le nuage : « rainout »
 - La capture par les gouttes de pluie de polluants gazeux ou particulaires lors de la précipitation sous le nuage : « washout »

Flux de dépôt humide

- Les méthodologies pour calculer le flux de dépôt humide :
 - Calcul explicite des transferts de polluants dans les gouttes de pluie (dans le nuage et sous le nuage)
 - Paramétrisation empirique à l'aide d'un coefficient de lessivage qui dépend du polluant et de l'intensité de la pluie
 - Paramétrisations simplistes (« rapport de lessivage » et vitesse de dépôt humide) qui relie la concentration dans l'eau de pluie (ou le flux de dépôt) à la concentration dans l'air avant la pluie (ces paramétrisations ne sont pas recommandées car trop simplistes)

Flux de dépôt humide : représentation explicite

- Une représentation explicite dans un modèle nécessite une discrétisation dans l'espace et le temps des phénomènes de transport



Représentation schématique d'un nuage précipitant dans un modèle

Flux de dépôt humide : représentation explicite

- Transfert de masse entre la phase interstitielle et les gouttes
 - Gaz : transfert du polluant de la phase gazeuse vers la goutte, puis dissolution dans la goutte de nuage ou de pluie ; adsorption sur les flocons de neige ou les grêlons
 - Particules : nucléation de gouttelettes (nucléation d'Aitken) ; collision entre particules et gouttes

Flux de dépôt humide : représentation empirique

- Le coefficient de lessivage, Λ (s^{-1}), représente une perte de polluant avec une cinétique du premier ordre :

$$dC/dt = - \Lambda C$$

$$C_g = C_{g,0} \exp(- \Lambda t)$$

où $C_{g,0}$ est la concentration du polluant au début de l'épisode de précipitation (g/m^3) et t est le temps (s)

- Le flux de dépôt humide ($g m^{-2} s^{-1}$) peut être calculé en utilisant la hauteur de la masse d'air, h (m), qui est lessivée

$$F(t) = C_g(t) \Lambda h$$

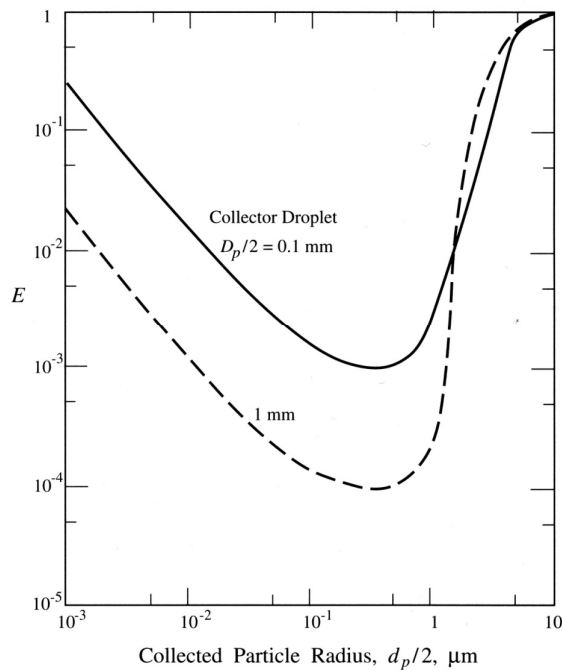
Note : le coefficient de lessivage peut être calculé à partir d'une représentation explicite (dérivation théorique) ou estimé à partir de mesures (dérivation empirique)

Flux de dépôt humide : coefficients de lessivage

Intensité de la pluie	1 mm/h	5 mm/h	10 mm/h	20 mm/h
Acide nitrique	$5 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$	$1,5 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$	$2 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$	$3,5 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$
Particule fine (2,5 μm)	$3 \times 10^{-7} \text{ s}^{-1}$	$8 \times 10^{-7} \text{ s}^{-1}$	$1 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$	$2 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$

Flux de dépôt humide : coefficient de lessivage

Efficacité des collisions gouttes / particules



La diffusion brownienne domine
pour les particules de diamètre
< 0,1 micron

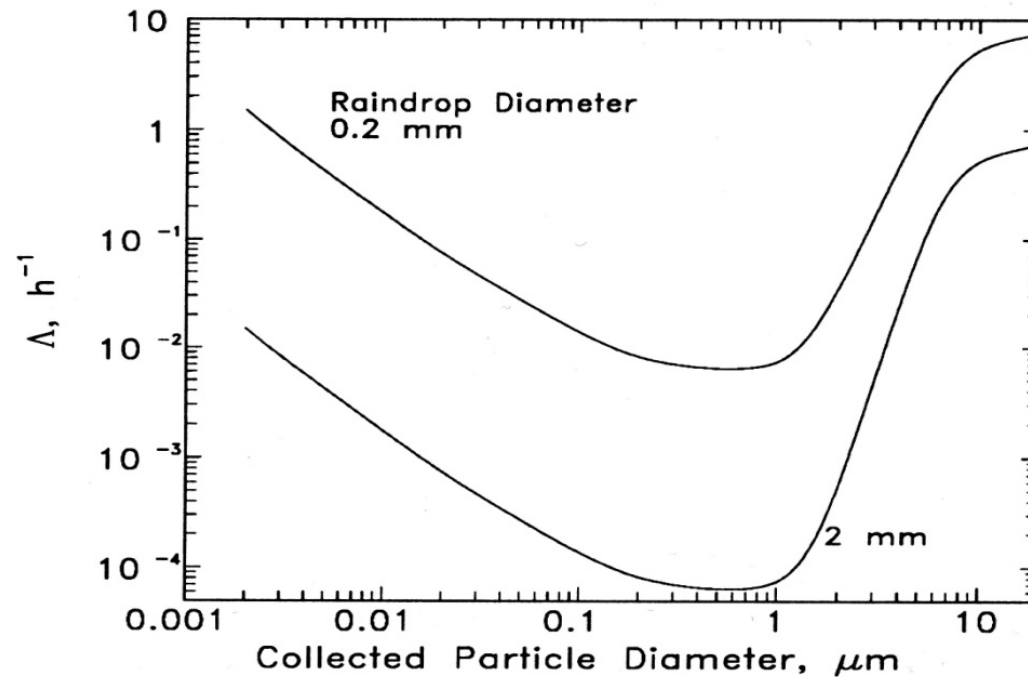
L'interception devient importante
pour les particules de diamètre entre
0,1 et 1 micron

L'inertie domine pour les particules
de diamètre > 1 micron

L'efficacité approche 1 pour les
particules de diamètre > 10 microns

Flux de dépôt humide : coefficient de lessivage

- Exemple de coefficients de lessivage pour les polluants particulaires



Dépôts secs

- Les dépôts secs peuvent être définis comme le transfert de matière de l'atmosphère à des surfaces autre que par précipitation
 - Sédimentation
 - Adsorption
 - Absorption (y compris dissolution)
 - Réaction chimique

Dépôts secs

- Ces dépôts secs sont principalement fonctions des caractéristiques suivantes :
 - Turbulence atmosphérique : elle détermine le flux atmosphérique qui transfère le polluant près de la surface
 - Les caractéristiques du polluant : solubilité et réactivité pour les gaz ; taille, masse volumique et forme pour les particules
 - Les caractéristiques de la surface : surfaces non-réactives (Téflon...), lisses, naturelles (végétation...)

Transfert de l'atmosphère vers la surface

- Les deux phénomènes fondamentaux sont
 - La gravité : sédimentation des grosses particules
 - La diffusion et les processus d'impact : combinaison de diffusion turbulente et de diffusion moléculaire (pour les gaz), brownienne (pour les particules très fines) ou impact par inertie (pour les autres particules)

Sédimentation

- La loi de Stokes représente la force exercée par un fluide sur une particule en mouvement dans ce fluide ($d_p < 10 \mu\text{m}$)
- Quand la résistance de l'air compense la gravité, on a la vitesse de chute finale de la particule, v_p^f :

$$v_p^f = (\rho_p d_p^2 c_c g) / (18 \mu_{\text{air}})$$

ρ_p : masse volumique de la particule (g cm^{-3})

μ_{air} : viscosité dynamique de l'air ($\text{g cm}^{-1} \text{s}^{-1}$)

d_p : diamètre de la particule (cm)

v_p : vitesse de la particule dans le fluide (cm s^{-1})

c_c : facteur de correction (fonction de la taille de la particule)

g : gravité (cm s^{-2})

Dépôt à la surface

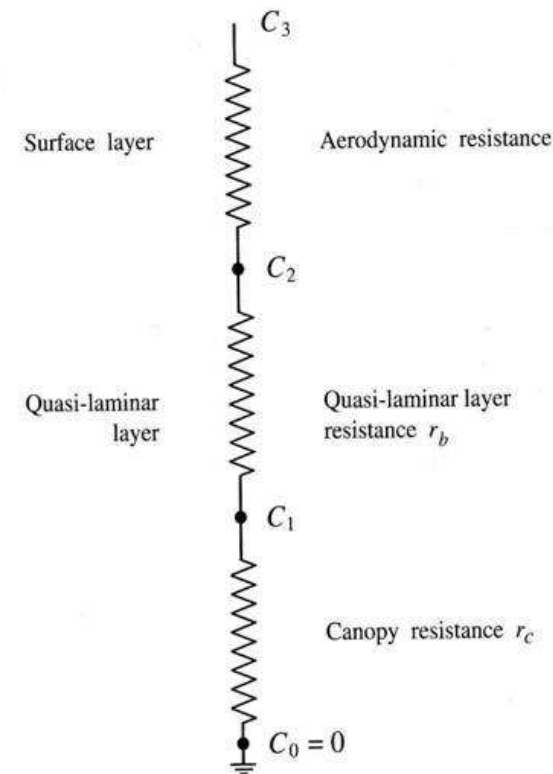
- Particules : On considère que la particule se dépose une fois en contact avec la surface, mais un coefficient de rebondissement peut être invoqué
- Gaz : La molécule de gaz se dépose soit par adsorption, absorption (par exemple dissolution dans un fluide) ou réaction avec la surface

Méthodologie des résistances

Cette méthodologie est fondée sur l'analogie du processus de dépôt sec avec des résistances électriques en série

Chaque étape est représentée par une résistance au dépôt

Les résistances ont comme unité « s/cm »
et l'inverse de la résistance totale est la vitesse de dépôt.



Méthodologie des résistances

Le flux de dépôt sec ($\text{g m}^{-2} \text{s}^{-1}$) est représenté comme le produit d'une vitesse de dépôt sec (m s^{-1}) par la concentration du polluant (g m^{-3})

$$F = -v_d C$$

Polluants gazeux

$$v_d^{-1} = r_t = r_a + r_b + r_c$$

Particules fines

$$v_d^{-1} = r_t = r_a + r_b$$

Dans ce cas, la vitesse de sédimentation des particules est négligée et la résistance à la surface est considérée comme nulle

Méthodologie des résistances

Particules avec vitesse de sédimentation :

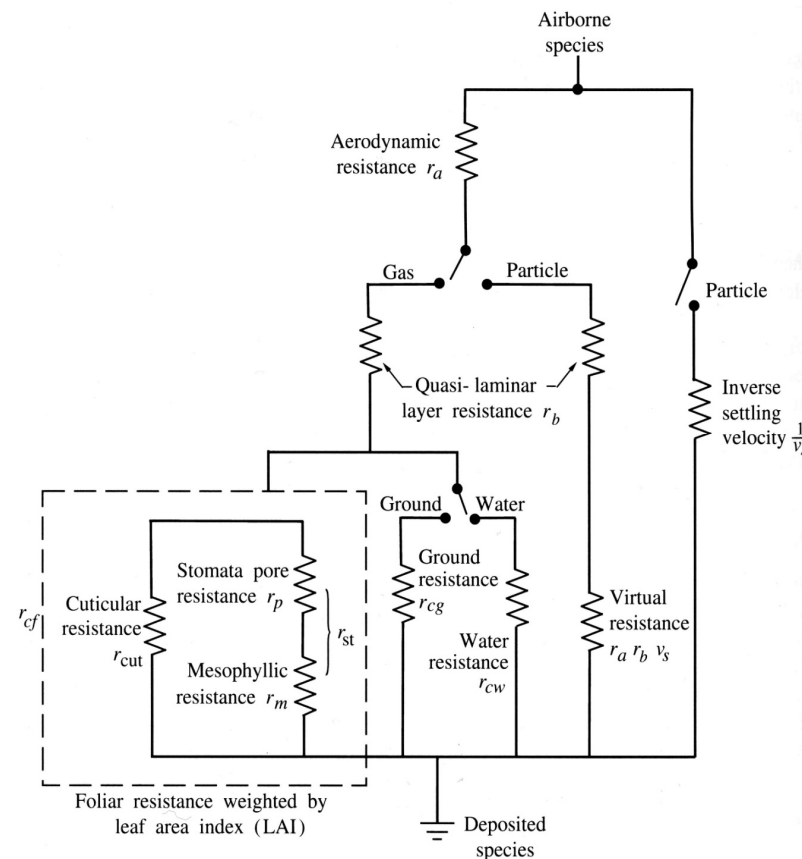
$$v_d = v_s / (1 - \exp(-r_t v_s))$$

Pour une grosse particule, $v_s \gg 1/r_t \Rightarrow v_d = v_s$

Pour une particule fine, $v_s \ll 1/r_t \Rightarrow v_d = 1/r_t$

Méthodologie des résistances

Modèle général de résistance pour les gaz et les particules incorporant différents types de surfaces (végétation, sol, eau)

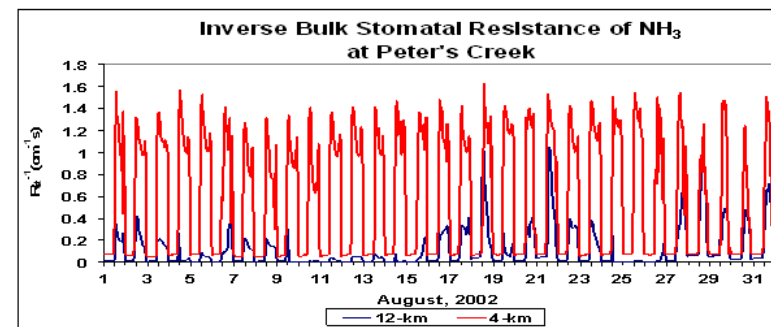
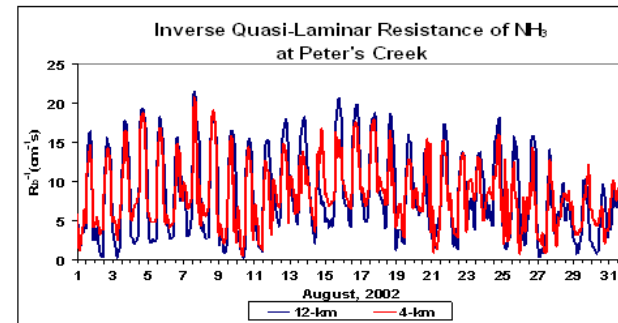
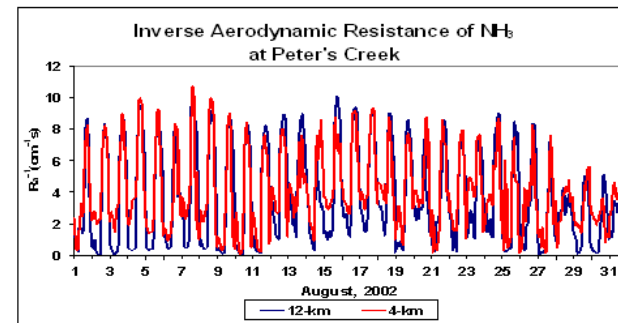


Exemple de résistances

Exemple de résistances (présentées sous forme de l'inverse de la résistance en cm s^{-1}) pour le dépôt de l'ammoniac gazeux sur un couvert végétal (simulation pour la Caroline du Nord, Etats-Unis) :

Elles varient avec le cycle diurne et au cours du mois

La résistance stomatale limite généralement le dépôt



Méthodologie des résistances

Vitesses de dépôts typiques pour différents gaz

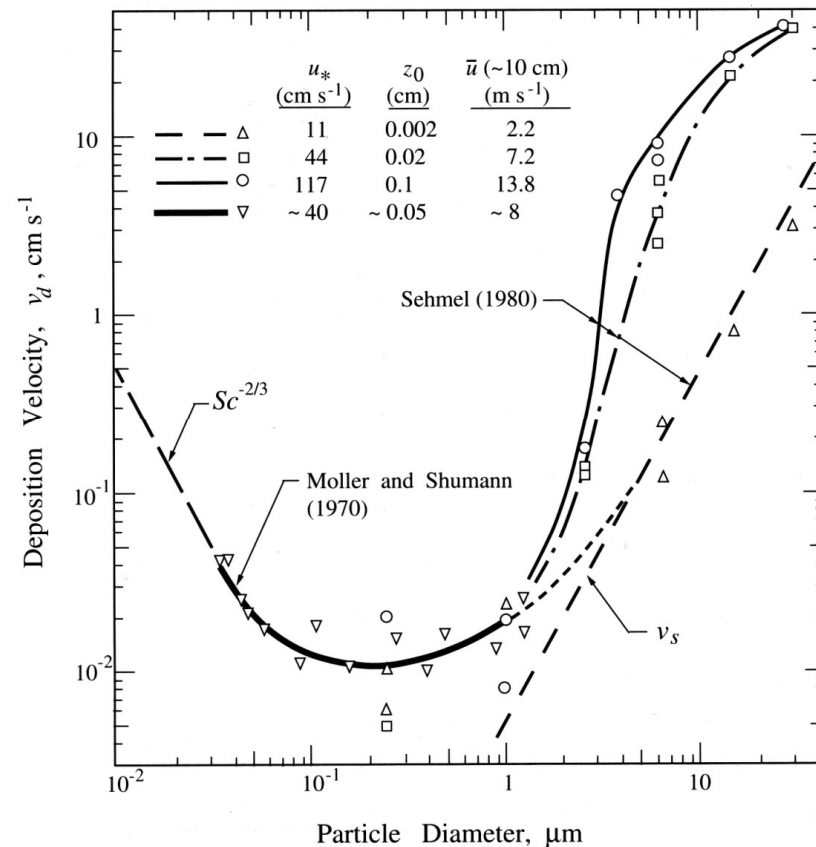
Species	v_d (cm s ⁻¹) Over		
	Continent	Ocean	Ice/Snow
CO	0.03	0	0
N ₂ O	0	0	0
NO	0.016	0.003	0.002
NO ₂	0.1	0.02	0.01
HNO ₃	4	1	0.5
O ₃	0.4	0.07	0.07
H ₂ O ₂	0.5	1	0.32

Dépôts secs de particules

Les vitesses de dépôt des particules dépendent des conditions météorologiques et de la rugosité de la surface d'une part et de la taille des particules d'autre part

Les particules fines comprises entre 0,1 et 1 micron de diamètre environ ont les vitesses de dépôt les plus faibles

La vitesse de sédimentation n'est importante que pour les très grosses particules



Ré-émission

Ré-émission de gaz

Composés azotés : processus de dénitrification

POPs : « effet sauterelle » dû à la semi-volatilité des POPs

Mercure : réduction du mercure oxydé en mercure élémentaire plus volatil

Ré-émission

Ré-émission de particules

Poussières éoliennes : pour les surfaces sujettes à l'érosion
(déserts...)

Mise en suspension due à des activités agricoles

Mise en suspension due au trafic routier

Modélisation multi-milieu

Deux grandes catégories de modèles

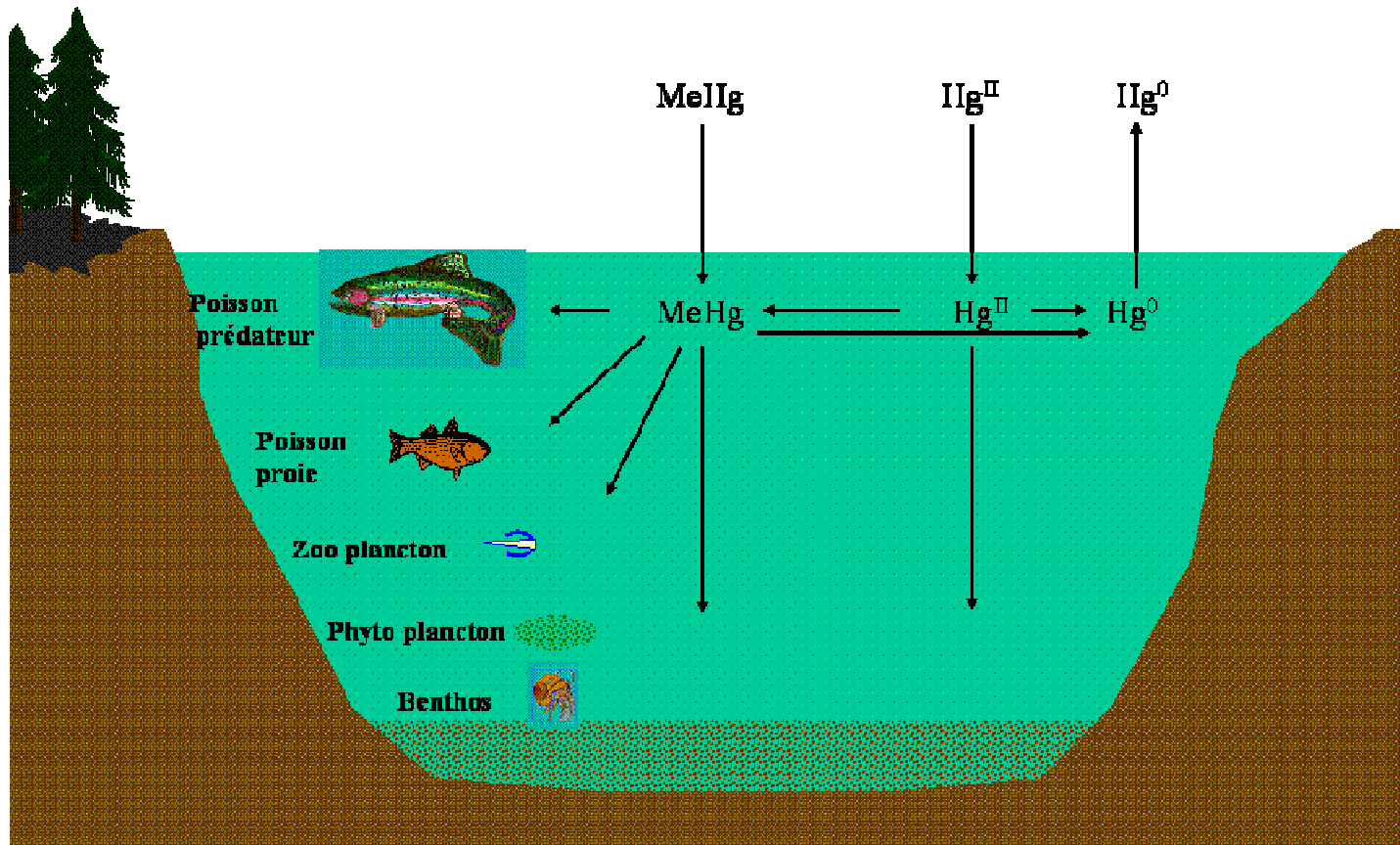
Modèles de chimie-transport dans chaque milieu
(appelés aussi « fate and transport models »
ou modèles de destin et de transport)

Modèles paramétrisés simples

Modélisation multi-milieu

Exemple du mercure :

Modèle de chimie-transport « Regional Mercury Cycling Model » (R-MCM)



Modélisation multi-milieux

Exemple du mercure : Modèle paramétrisé simple

$$F_1 = F_a * (1 + \alpha * (W - 1))$$

où F_1 est le flux de mercure dans le lac ($\text{g m}^{-2} \text{an}^{-1}$), F_a est le flux de dépôt atmosphérique, W est le rapport des surfaces du bassin versant et du lac et α est un facteur qui représente la fraction du mercure déposé dans le bassin versant qui est transporté vers le lac ($\alpha = 1$ si tout le mercure déposé dans le bassin versant est transporté dans le lac par ruissellement)

$$C_1 = F_1 * A * X / T$$

où C_1 est la concentration de mercure dans le lac (g m^{-3}), A est la surface du lac (m^2), T est le taux de renouvellement de l'eau dans le lac (m^3/an ; hydrologie) et X est un paramètre qui représente l'effet de la chimie aquatique (sans unité).

Modélisation multi-milieux

Exemple du mercure : Modèle paramétrisé simple

$$C_p = \text{BAF} * C_1$$

où C_p est la concentration de mercure dans les poissons (pour un niveau trophique donné) et BAF est le coefficient de bioaccumulation ou biomagnification ($\text{m}^3 \text{ eau/g poisson}$).

$$D_j = C_p * \text{CR} / \text{BW}$$

où D_j est la dose journalière de mercure pour la personne ou l'animal consommant du poisson ($\text{g}/(\text{kg jour})$), CR est le taux de consommation de poisson (g/jour) et BW est le poids de la personne ou de l'animal (kg).

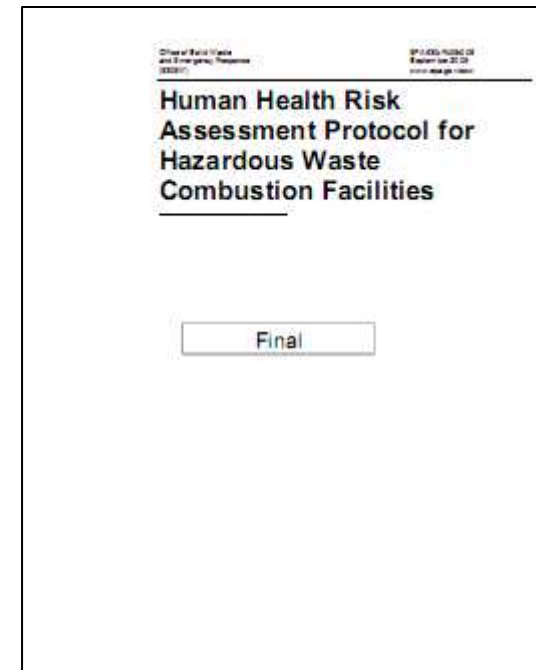
Modélisation multi-milieux

Référence pour des modèles simples de transport de polluants multi-milieux :

Méthodologie de l'agence fédérale des Etats-Unis
(U.S. Environmental Protection Agency)

<http://www.epa.gov/waste/hazard/tsd/td/combust/risk.htm#hhrad>

(chapitres 5 et 6)



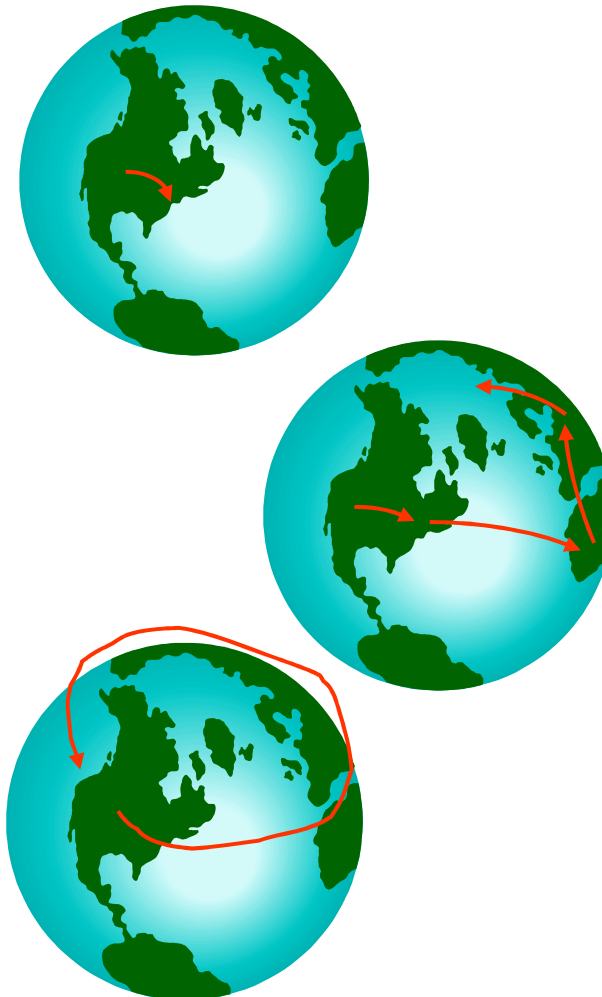
Impacts des dépôts atmosphériques

- Ozone
- Pluies acides (acides sulfurique et nitrique)
- Dépôts azotés (composés azotés)
- Polluants organiques persistants (POPs)
- Métaux lourds (mercure, plomb, cadmium, etc.)

- Points communs :
 - Elles résultent de pollution dues aux activités humaines
 - Elles peuvent couvrir de large distances (>100 km)
 - Elles affectent l'environnement et dans certains cas la santé humaine à travers la chaîne alimentaire

Les dépôts atmosphériques : Différences

- Pollutions régionales :
 - Ozone
 - Pluies acides
 - Dépôts azotés
 - Certains métaux lourds
- Pollutions régionales avec « effet sauterelle » :
 - Polluants organiques persistants (POPs)
 - Mercure oxydé
- Pollutions globales :
 - Mercure élémentaire

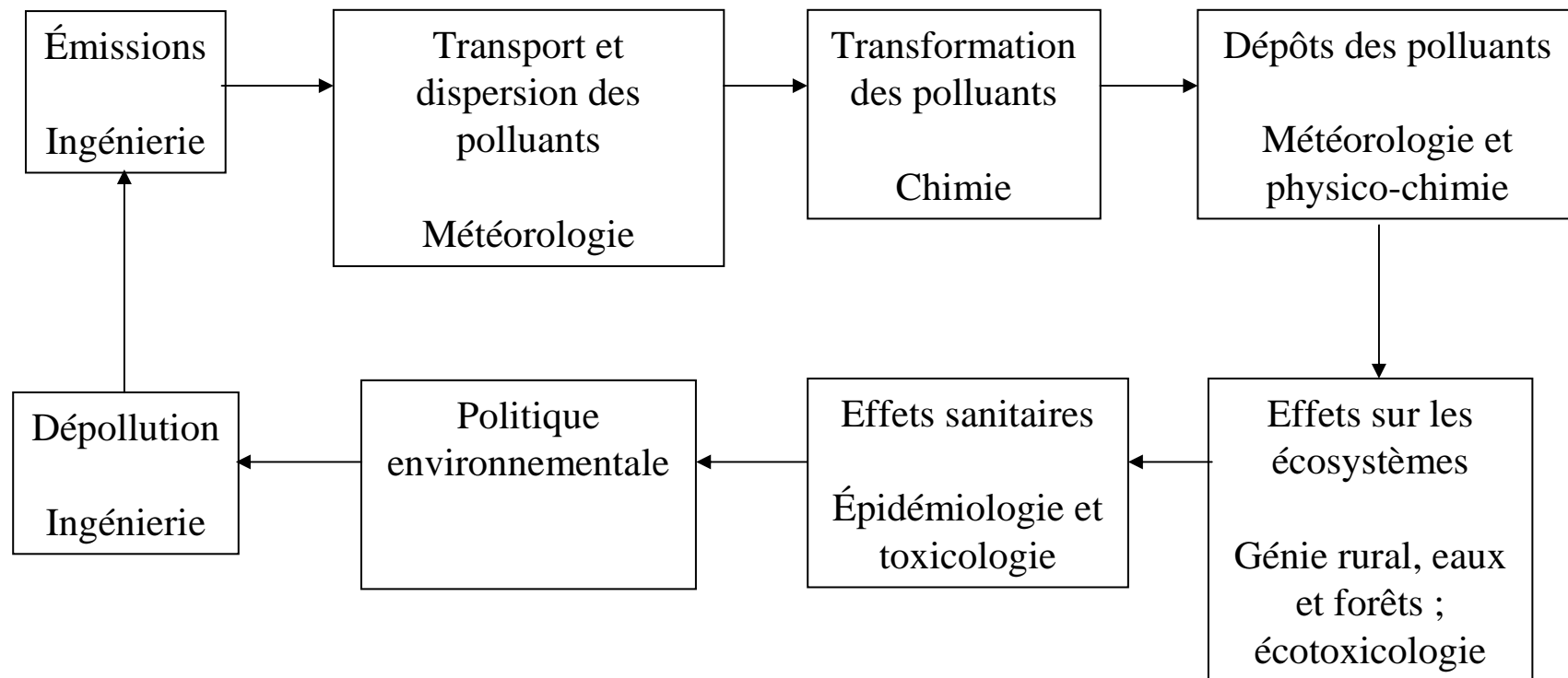


Les pollutions associées aux dépôts atmosphériques : Concentrations

- Les concentrations dans l'atmosphère sont très faibles
 - $\sim 10^{-7}$ atm pour l'ozone
 - $\sim 10^{-9}$ atm pour les acides
 - $\sim 10^{-12}$ atm pour les POPs
 - $\sim 10^{-13}$ atm pour le mercure

- Mais les effets sur les écosystèmes sont importants

Les dépôts atmosphériques : Un problème mutidisciplinaire



Dépôts d'ozone : impact sur la végétation

Les dépôts d'ozone affectent les plantes et les arbres :

- Absorption de l'ozone par les stomates
- Réaction de l'ozone avec l'isoprène et l'éthylène dans le fluide extra-cellulaire
- Formation d'oxydants organiques
- Détérioration des protéines de la membrane cellulaire du végétal (signes visibles sur la feuille ou l'aiguille)
- Perturbation de la photosynthèse
- Vieillesse précoce des feuilles et aiguilles
- Diminution du rapport graines/biomasse

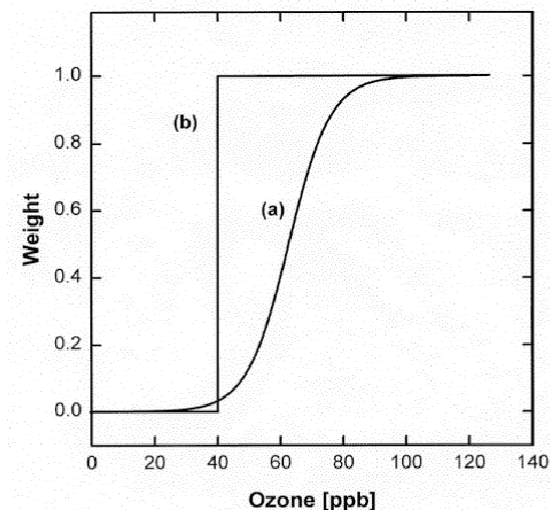
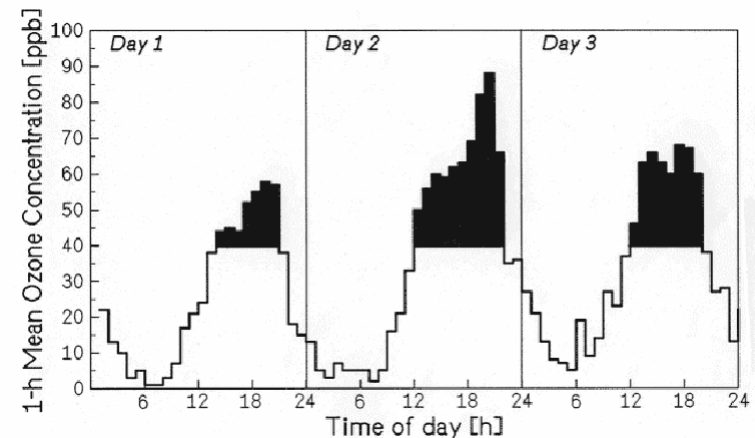


Dépôts d'ozone : impact sur la végétation

L'effet de l'ozone sur la végétation est calculé pour des concentrations d'ozone qui dépassent 40 ppb et de façon cumulative au moyen de la fonction AOT40 (« Accumulated ozone exposure with a threshold of 40 ppb »).

Les concentrations peuvent être pondérées par une fonction qui met davantage de poids sur les concentrations élevées.

L'exposition est ensuite calculée sur une période de 3 mois pour les cultures (mai à juillet) et une période de 6 mois pour les forêts (avril à septembre)



Les pluies acides : Définition

- Dépôts acides
 - Lessivage des acides par les précipitations
 - Dépôts secs de gaz et de particules acides
 - Dépôts de brouillards acides
- La mesure permet de caractériser plus facilement les précipitations (pluie, neige), donc : « pluies acides »

Les pluies acides : Découverte

- M. Ducros. « Observation d'une pluie acide », *J. Pharmacie Chimie Série 3*, **7**, 273-277, 1845.
- R.A. Smith. « On the air and rain of Manchester » *Memoirs Literary Phil. Soc. Manchester, Series 2*, **10**, 207-217, 1852.

Les pluies acides : Effets sur les forêts



Effet sur les feuilles et aiguilles des arbres



Dévastation de certaines forêts

Acidification des sols : perte d'éléments nutritifs (Mg, Ca) et mise en disponibilité de métaux toxiques pour la végétation (Al)

Les pluies acides : Effets sur les lacs



Effet sur la reproduction de certains oiseaux

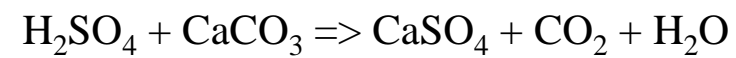


Acidification des lacs : perte de plancton, de certaines plantes et d'espèces de poissons

Les pluies acides : Effets sur le bâti



Effet d'érosion sur des pierres calcaires, du tuffeau et de certains marbres



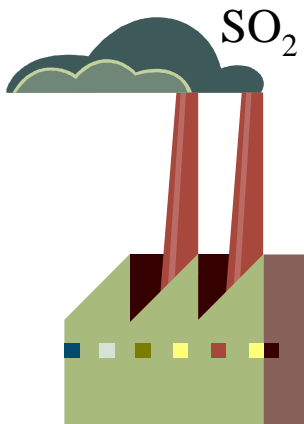
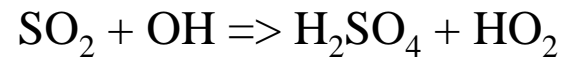
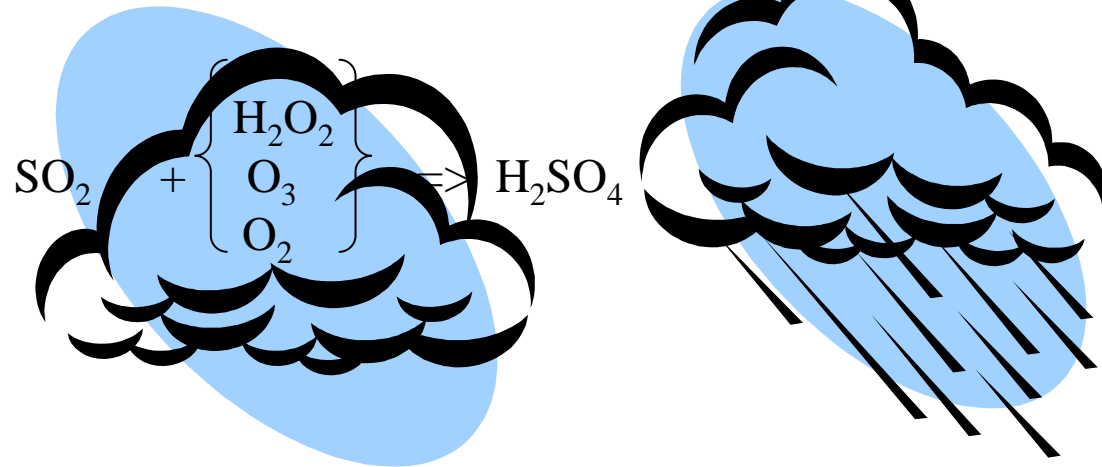
Les pluies acides : Sources

- Tous les procédés de combustion produisent des oxydes d'azote (réaction de l'oxygène et de l'azote de l'air à haute température) : NO et NO₂
- Les charbons et fiouls contiennent du soufre, qui après combustion est émis en tant que dioxyde de soufre : SO₂



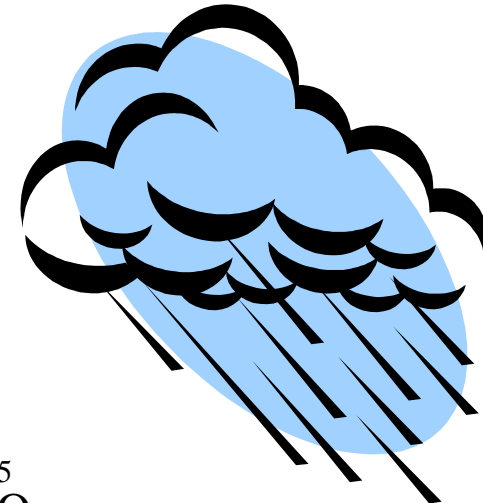
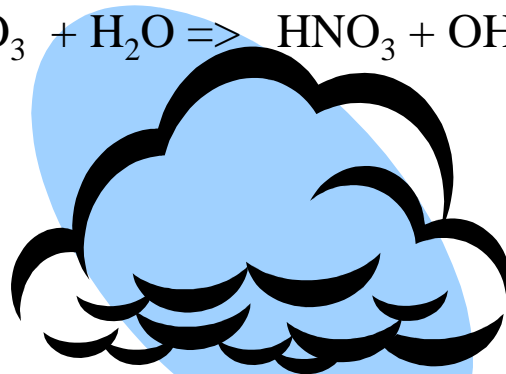
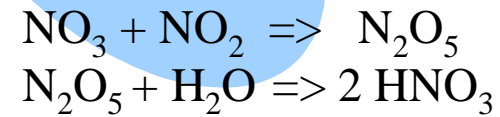
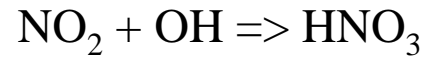
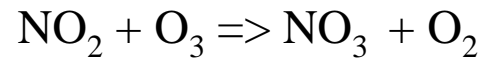
Les pluies acides : Formation de l'acide sulfurique

Système de réactions non-linéaires

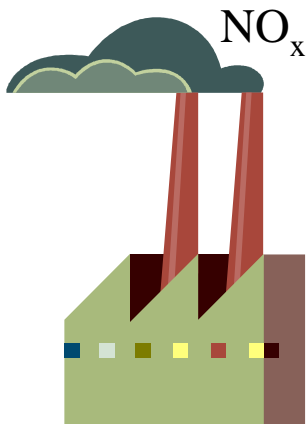


Les pluies acides : Formation de l'acide nitrique

Système de réactions hétérogènes



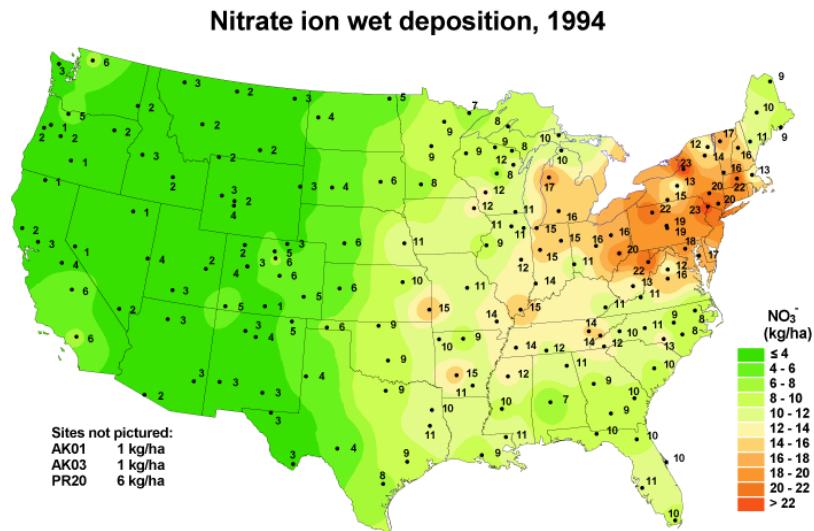
HNO_3



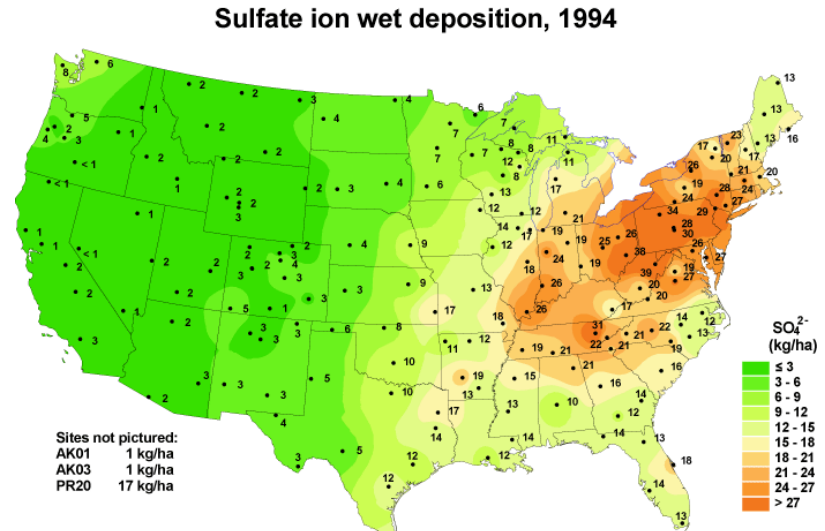
Les pluies acides : Incertitudes

- La chimie de formation des acides H_2SO_4 et HNO_3 est bien connue mais il y a encore quelques incertitudes pour
 - Les réactions de formation d' HNO_3 sur les particules
 - La présence exacte des nuages et des précipitations (problème de prévision météorologique)

Les pluies acides aux Etats-Unis : 1994



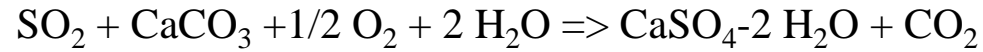
National Atmospheric Deposition Program/National Trends Network
<http://nadp.sws.uiuc.edu>



National Atmospheric Deposition Program/National Trends Network
<http://nadp.sws.uiuc.edu>

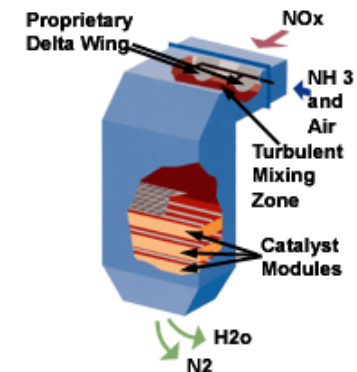
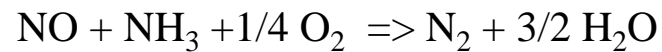
Les pluies acides : Dépollution

Laveur de fumées (FGD) pour abattre les émissions de SO₂

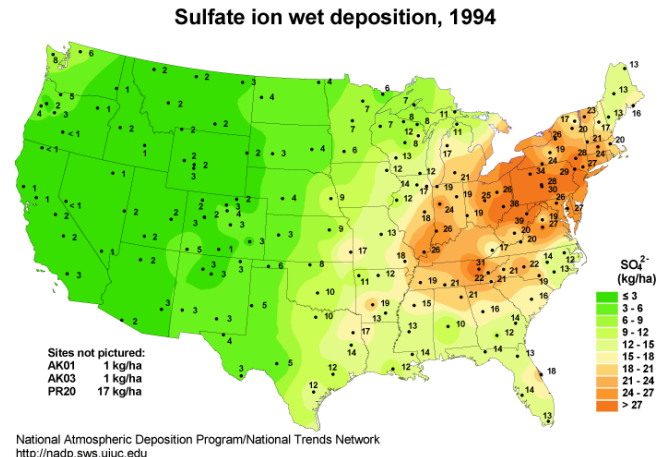
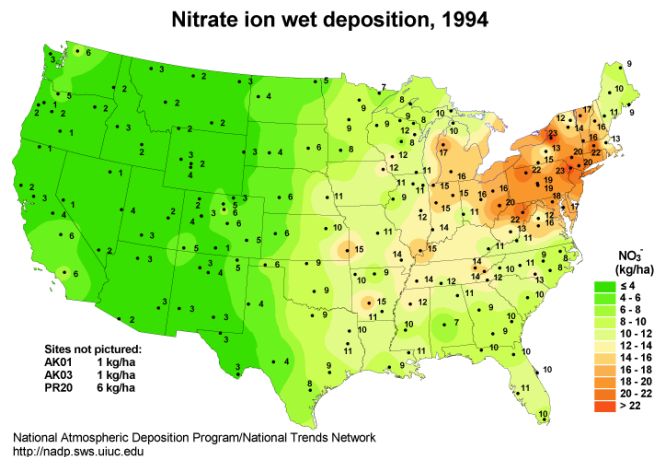


Courtesy of The Babcock & Wilcox Company

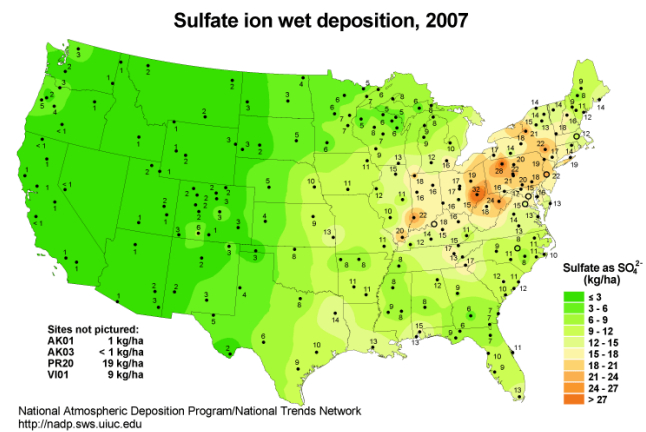
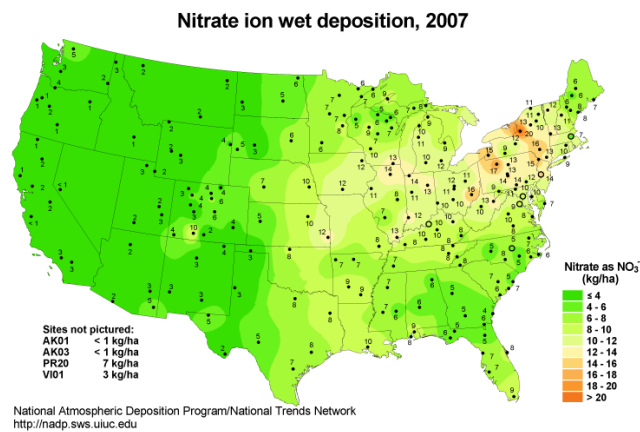
Réduction catalytique sélective (RCS ou « SCR ») pour abattre les émissions de NO_x



Les pluies acides aux États-Unis : 1994 => 2007

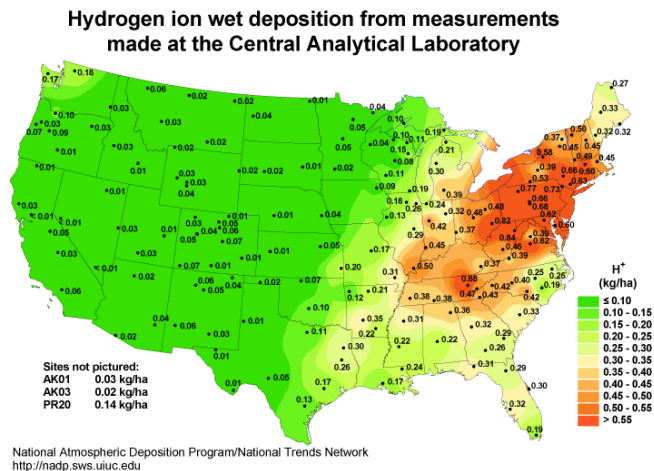


1994



2007

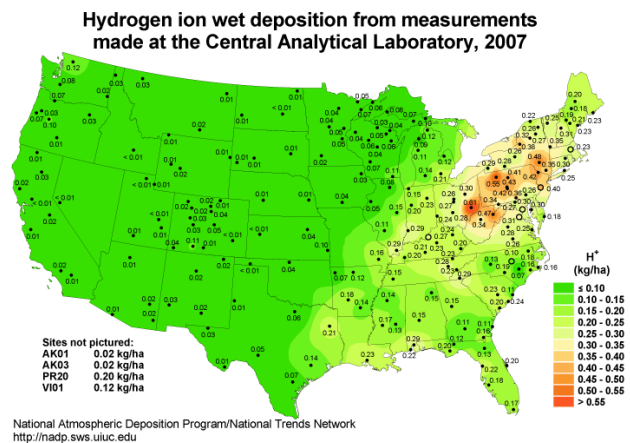
Les pluies acides aux États-Unis: 1994 => 2007



1994

Effet des politiques de réduction des émissions de SO_x et NO_x des centrales électriques au charbon :

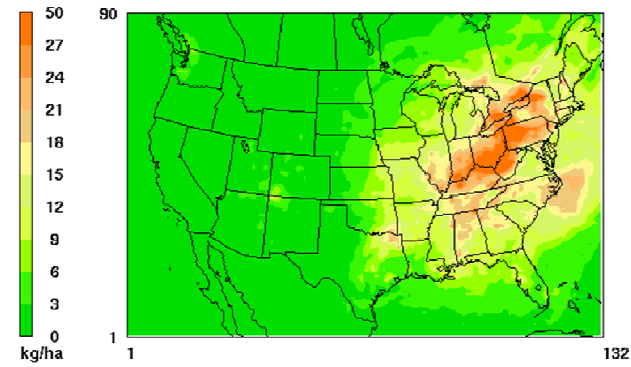
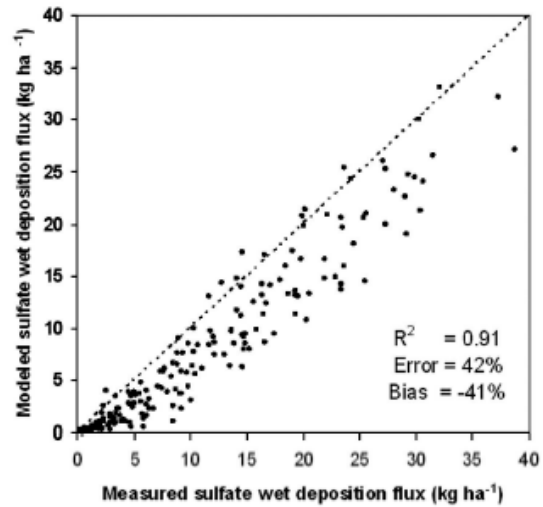
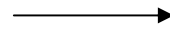
Réduction significative des dépôts acides dans le nord-est des Etats-Unis



2007

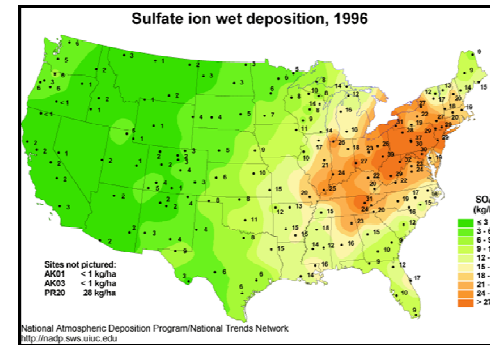
Les pluies acides : Modélisation

Modèle de chimie-transport

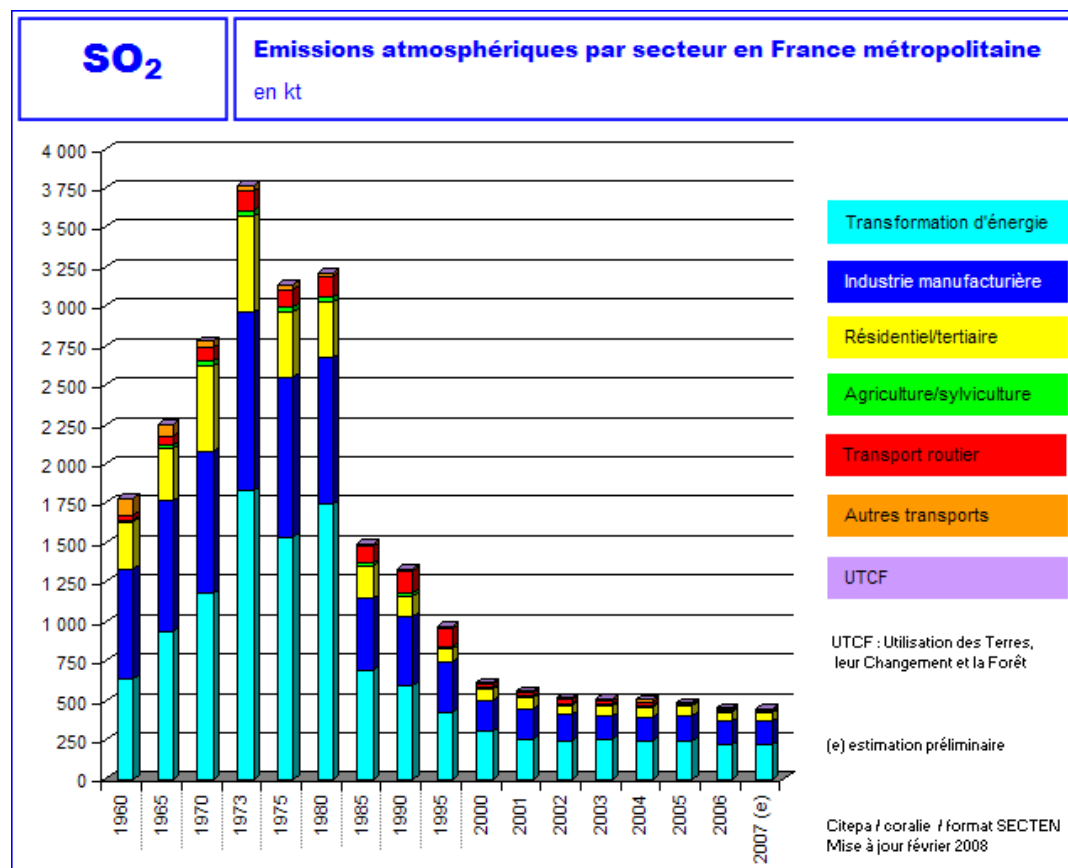


January 1, 1996 0:00:00
Min= 0 at (17,11), Max= 50 at (103,49)

Mesures

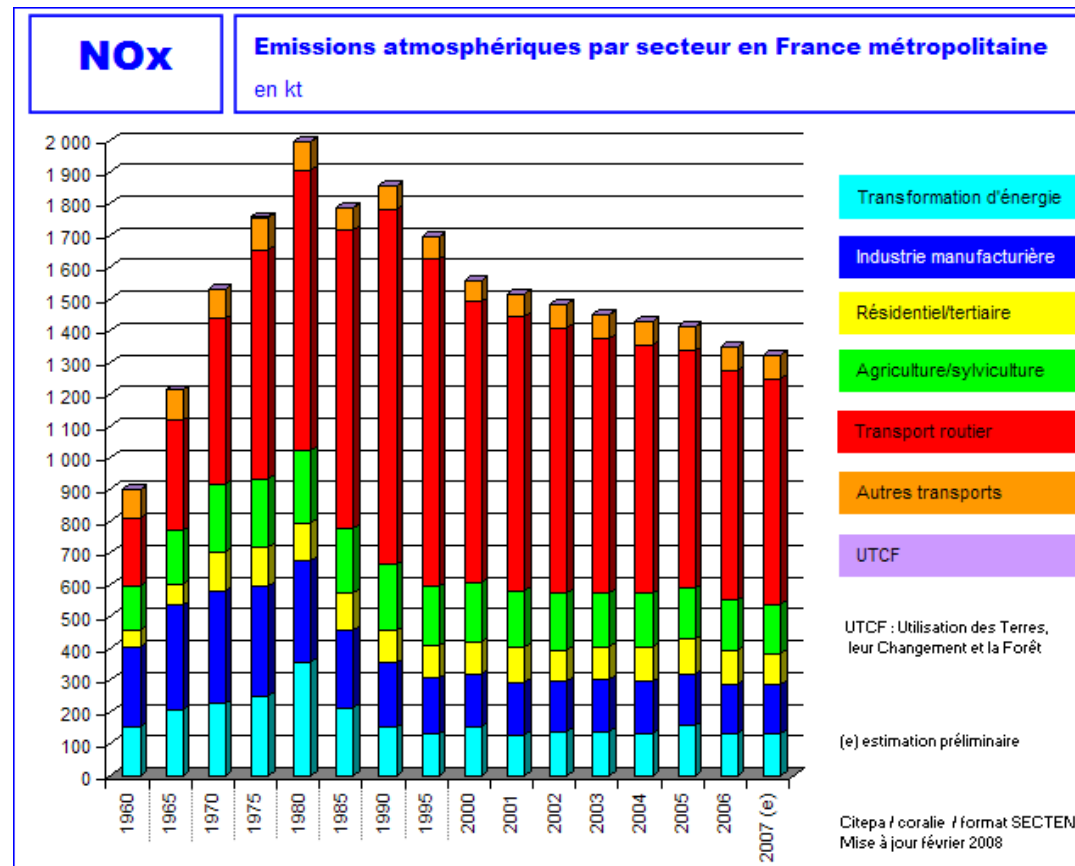


Les émissions de dioxyde de soufre en France



Source : CITEPA

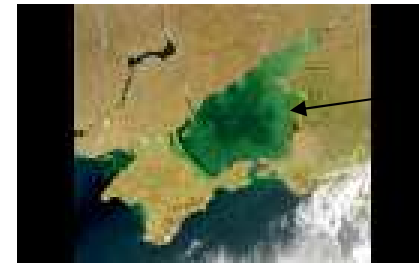
Les émissions d'oxydes d'azote en France



Source : CITEPA

Eutrophisation

- Rejets directs ou dépôts atmosphériques d'espèces chimiques qui favorisent la croissance de la végétation aquatique : phosphates et espèces azotées
- L'abondance de végétation aquatique empêche la lumière de pénétrer profondément dans l'eau (diminution de la photosynthèse) et réduit la quantité d'oxygène disponible



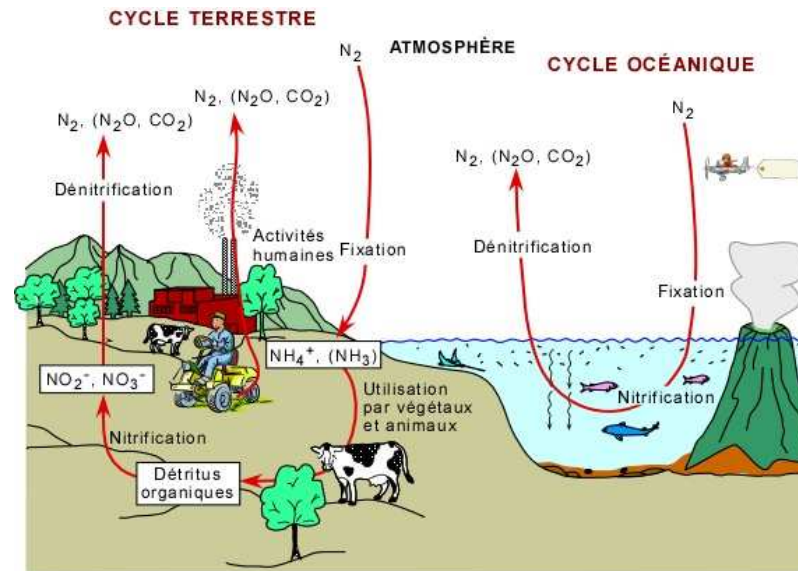
Mer d'Azov



Mer noire

Eutrophisation : Dépôts d'espèces azotées

- Les espèces azotées déposées de l'atmosphère incluent principalement
 - l'acide nitrique (HNO_3)
 - l'ammoniac (NH_3)
 - des nitrates organiques (PAN)
- Elles se comportent comme des engrais (par exemple, le nitrate d'ammonium ou ammonitrate est un engrais utilisé dans l'agriculture)

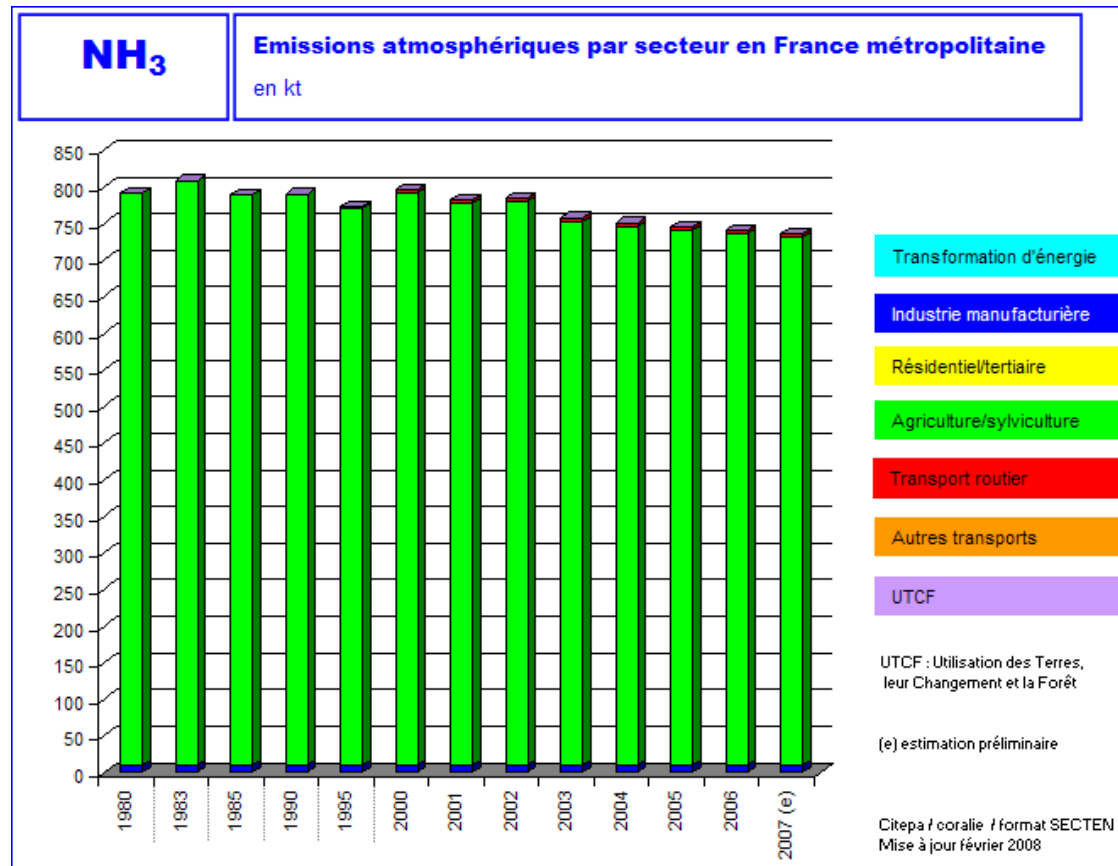


Eutrophisation : Réduction des émissions azotées

- La diminution des émissions d'oxydes d'azote est généralement motivée par les réglementations sur l'ozone et les pluies acides
- La diminution des émissions d'ammoniac nécessite une réduction des émissions liées à l'agriculture



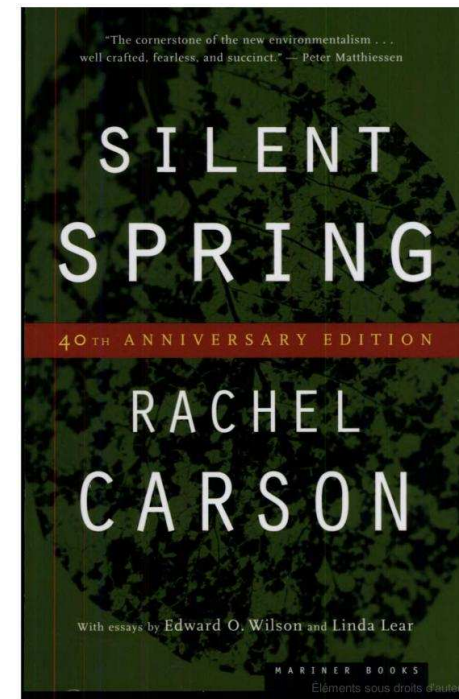
Les émissions d'ammoniac en France



Source : CITEPA

Les polluants organiques persistants (POPs)

- Rachel Carson publie « Silent Spring » en 1962
- Plusieurs articles scientifiques documentent l'effet des POPs sur les oiseaux
 - Radcliffe, *Nature*, **215**, 208-210, 1967
 - Prest, Jefferies & Moore, *Environ. Pollut.*, **1**, 3-26, 1970
 - Etc.

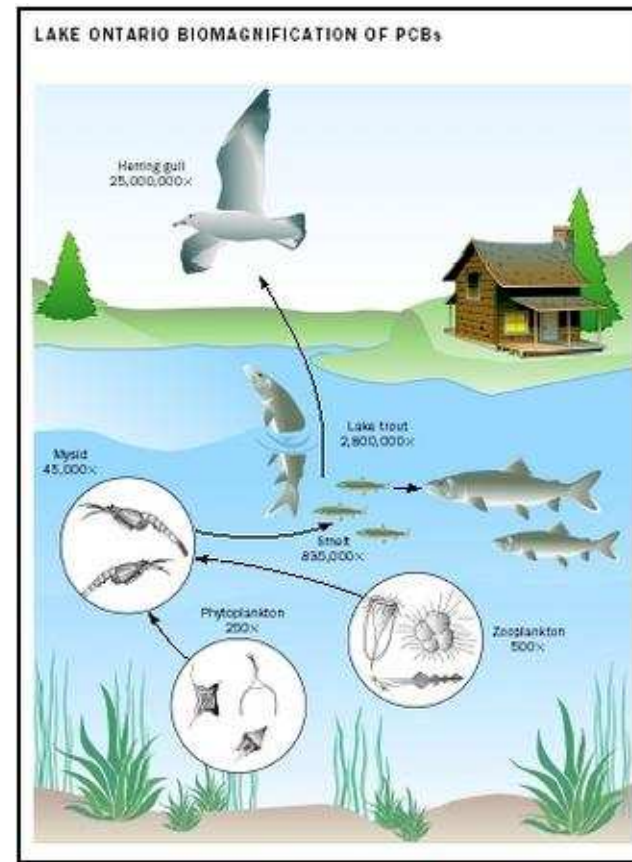


Les polluants organiques persistants (POPs)

- Effets environnementaux
 - Fragilité des œufs des oiseaux
 - Perturbation du système endocrinien
 - Affaiblissement du système immunitaire
- Effets sanitaires
 - Certains POPs causent des effets néfastes
 - Certains POPs peuvent être cancérigènes

Les *polluants* organiques persistants (POPs)

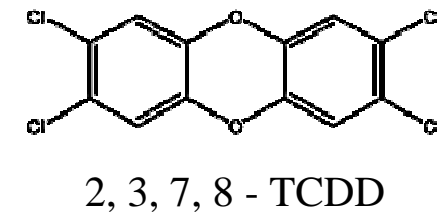
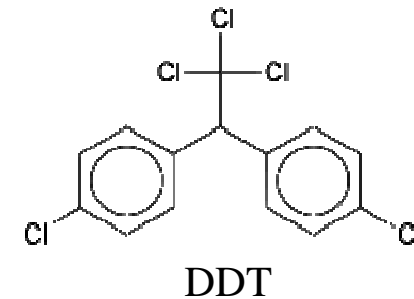
- Groupe de polluants organiques qui sont pour la plupart des composés cycliques (parfois aromatiques), contenant des atomes de chlore
- Ils ont tendance à s'accumuler dans la chaîne alimentaire, c'est-à-dire que leur concentration dans un organisme vivant augmente de plusieurs ordres de grandeur par rapport à leur concentration dans l'environnement



Les polluants *organiques* persistants (POPs)

La convention de Stockholm a identifié douze POPs qui doivent être éliminés ou réduits de façon significative

- Insecticides
 - Aldrin
 - Chlordane
 - DDT
 - Dieldrin
 - Endrin
 - Heptachlor
 - Mirex
 - Toxaphene
- Fongicide
 - Hexachlorobenzène
- Produits diélectriques
 - PCBs
- Produits de combustion
 - Dioxines
 - Furannes

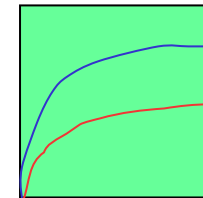


Autres POPs : Hexachlorocyclohexanes (e.g., lindane), hexabromobiphenyl, chlordecone, hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAPs), etc.

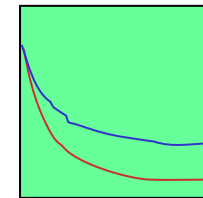
Les polluants organiques *persistants* (POPs)

- Durée de vie
 - Plusieurs jours dans l'atmosphère
 - Plusieurs années dans les sols et le milieu aquatique

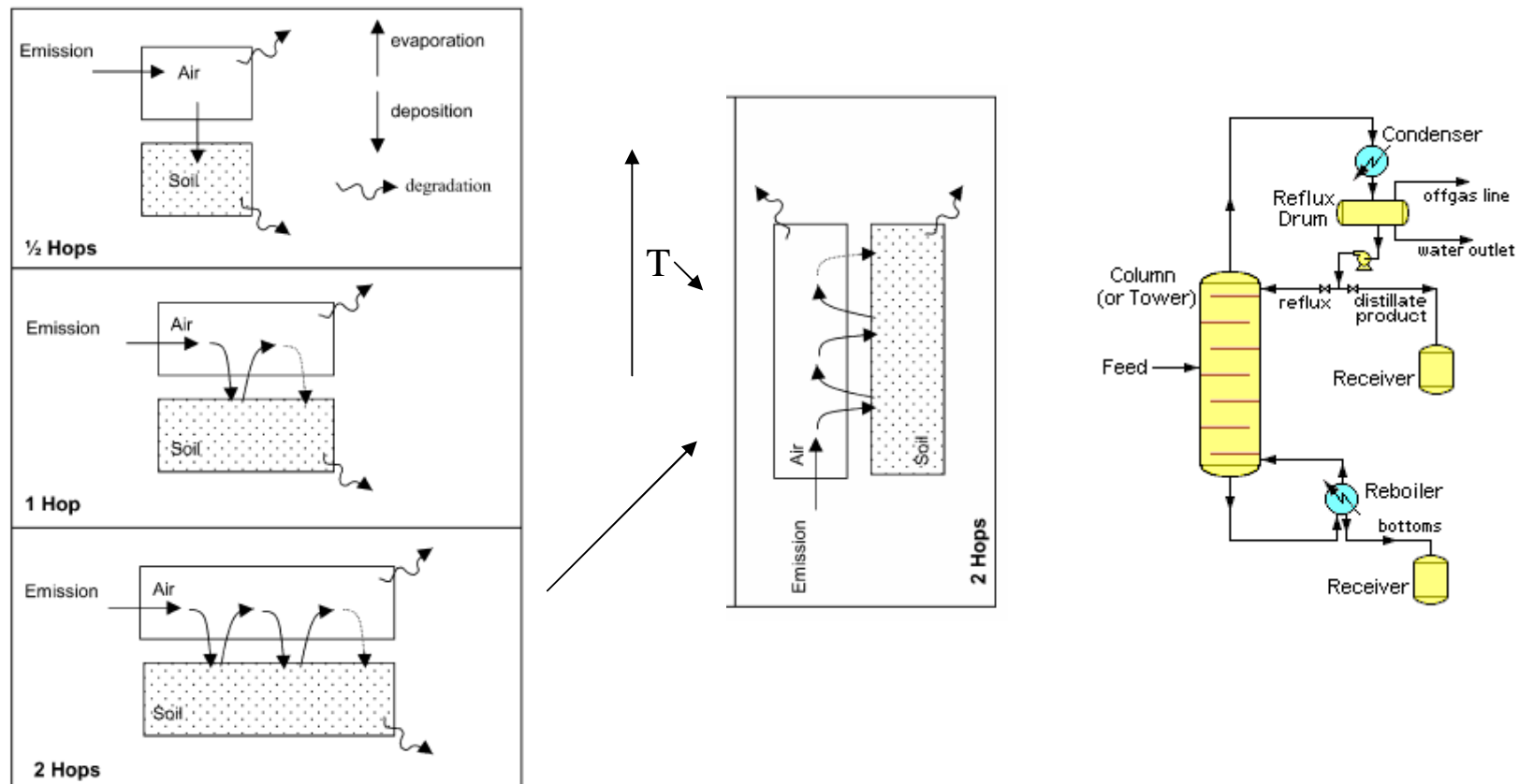
- Pour une valeur d'émission donnée, la concentration environnementale augmente avec la durée de vie



- Pour une concentration environnementale initiale donnée, la période d'élimination augmente avec la durée de vie

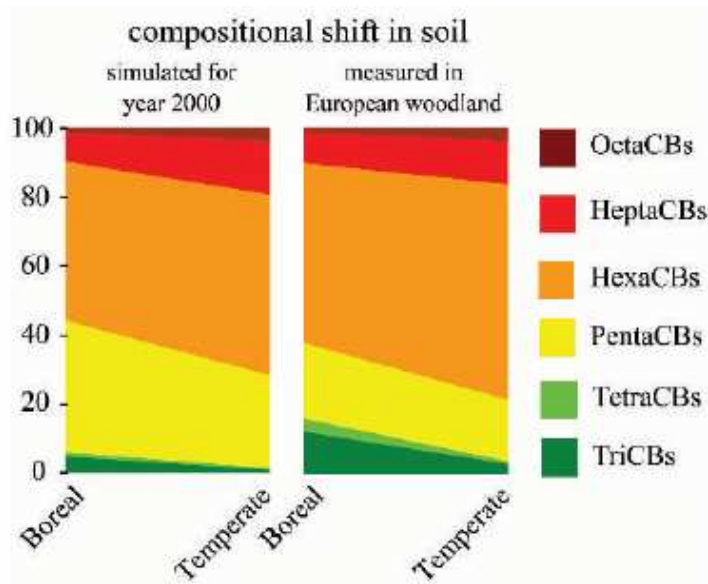


Les POPs : L'effet sauterelle

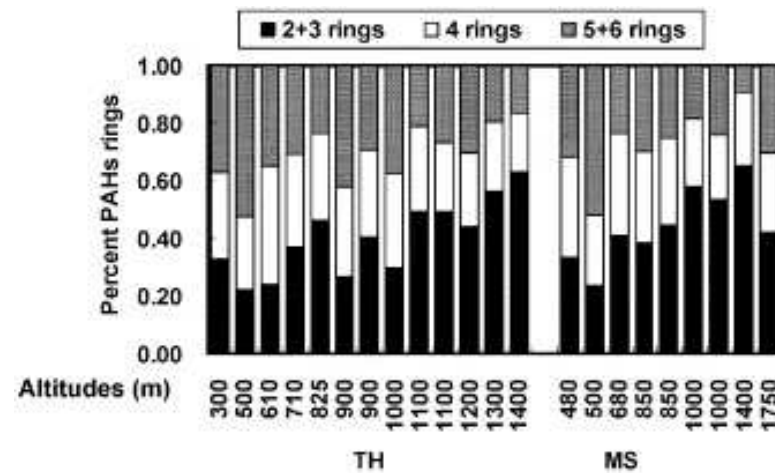


L'effet "sauterelle" est semblable à celui d'une colonne à distiller

Les POPs : L'effet sauterelle

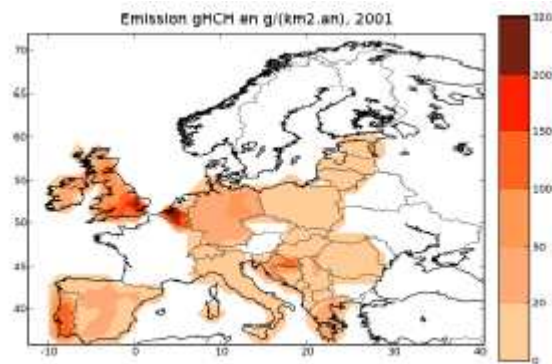


Distillation en fonction de la latitude de PCB au Royaume Uni et en Norvège (Source : Wania et Su, Ambio, 2004)

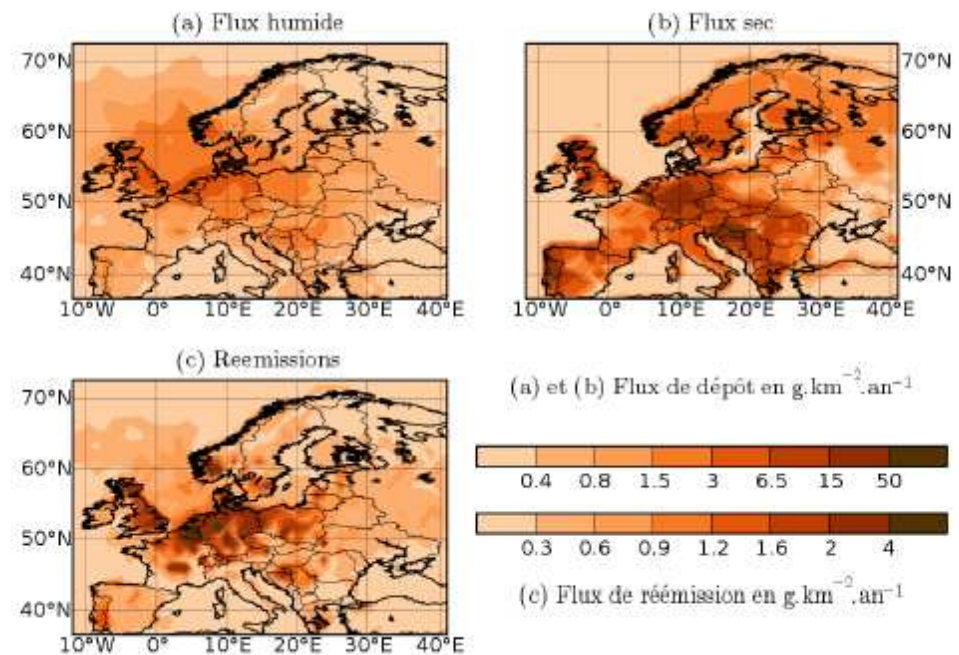


Distillation en fonction de l'altitude d'HAP dans les montagnes de Nanjin en Chine (Source : Liu et al., AE, 2005)

Émissions, dépôts et ré-émissions du lindane



Émissions du lindane en Europe



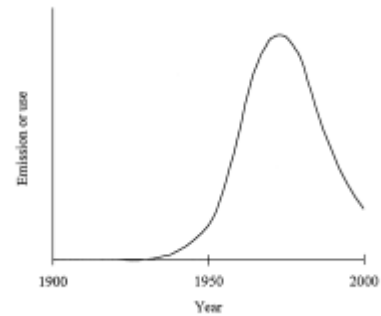
Dépôts et ré-émissions du lindane en Europe

(Source : Solen Queguiner, Thèse, CEREAs, 2008)

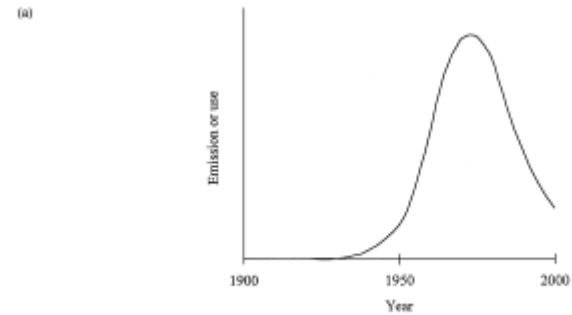
Les POPs : Évolution temporelle

Émissions dans l'atmosphère

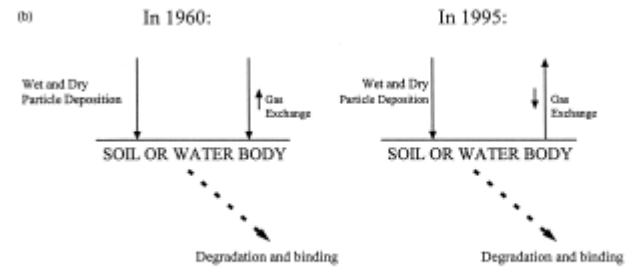
(a)



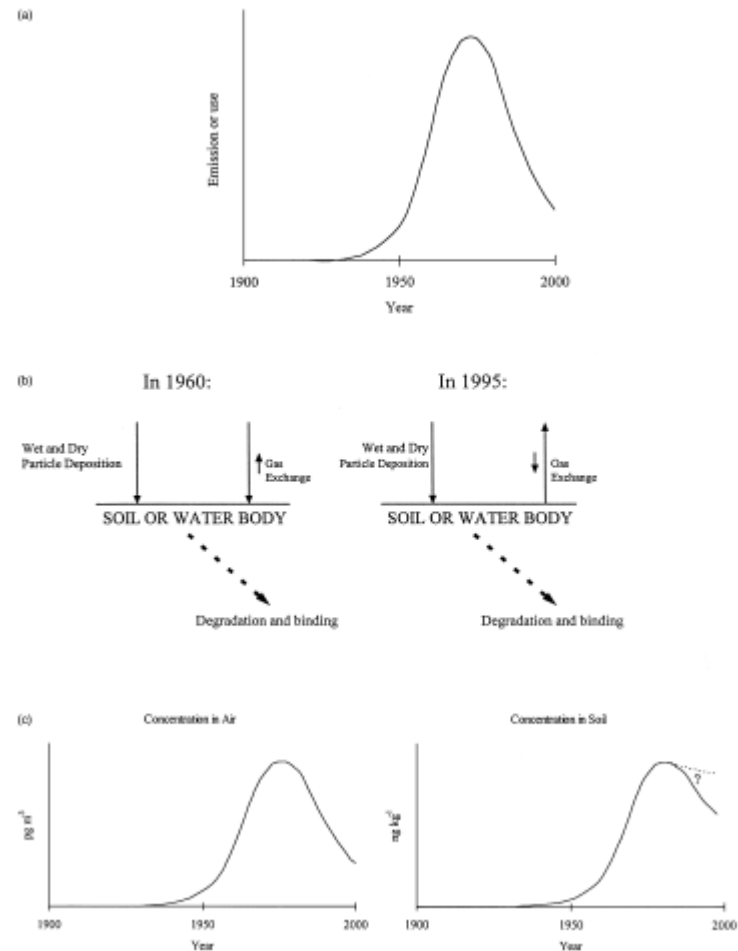
Les POPs : Évolution temporelle



Dépôts et évaporation

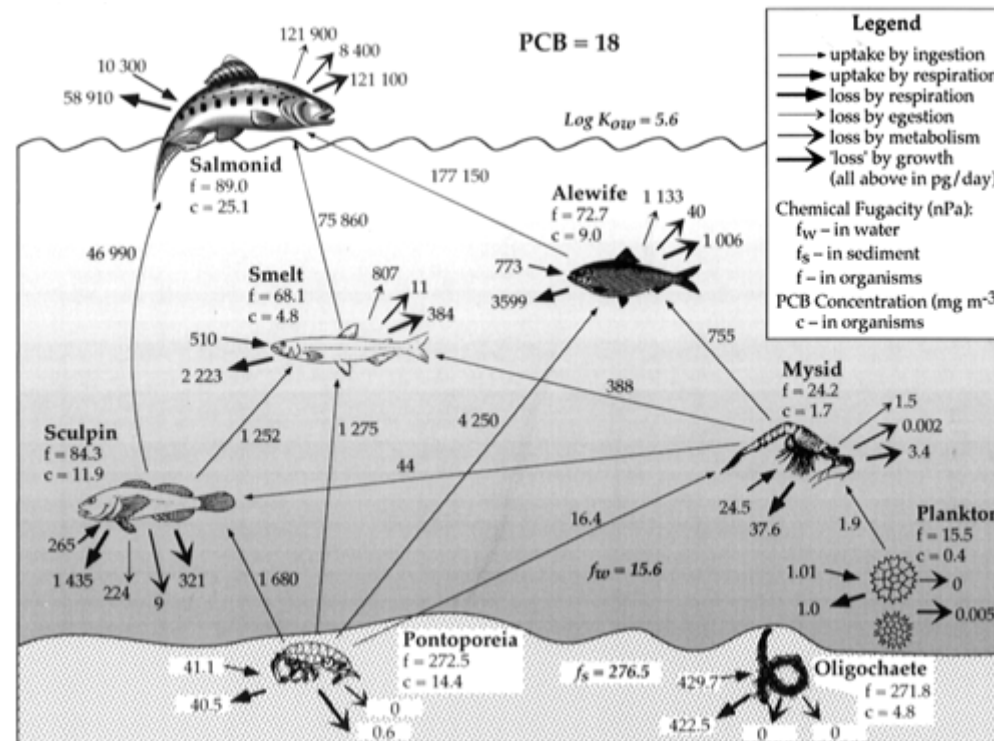


Les POPs : Évolution temporelle dans l'environnement



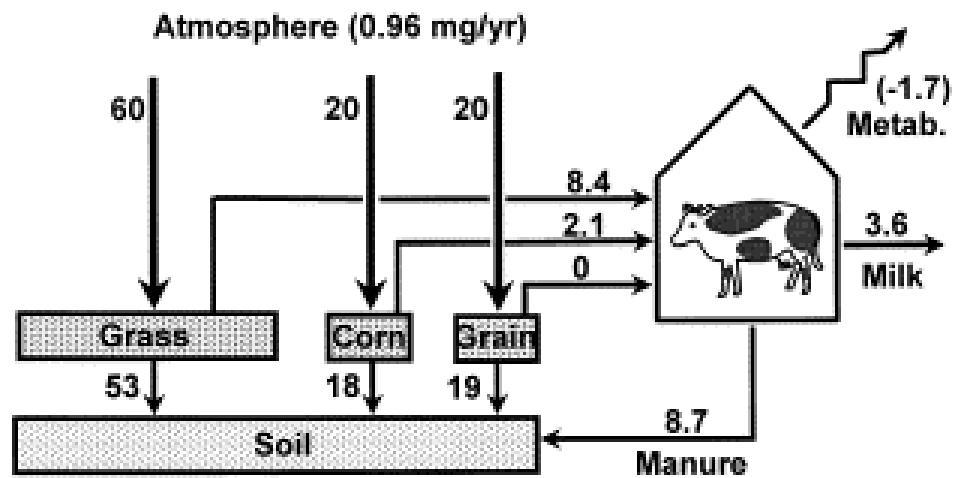
Concentrations dans l'air et les sols

Les POPs : Modèles de la chaîne alimentaire aquatique



Source : Campfens and McKay, *Environ. Sci. Technol.*, **31**, 577 (1997)

Les POPs : Modèles de la chaîne alimentaire terrestre



TCDD

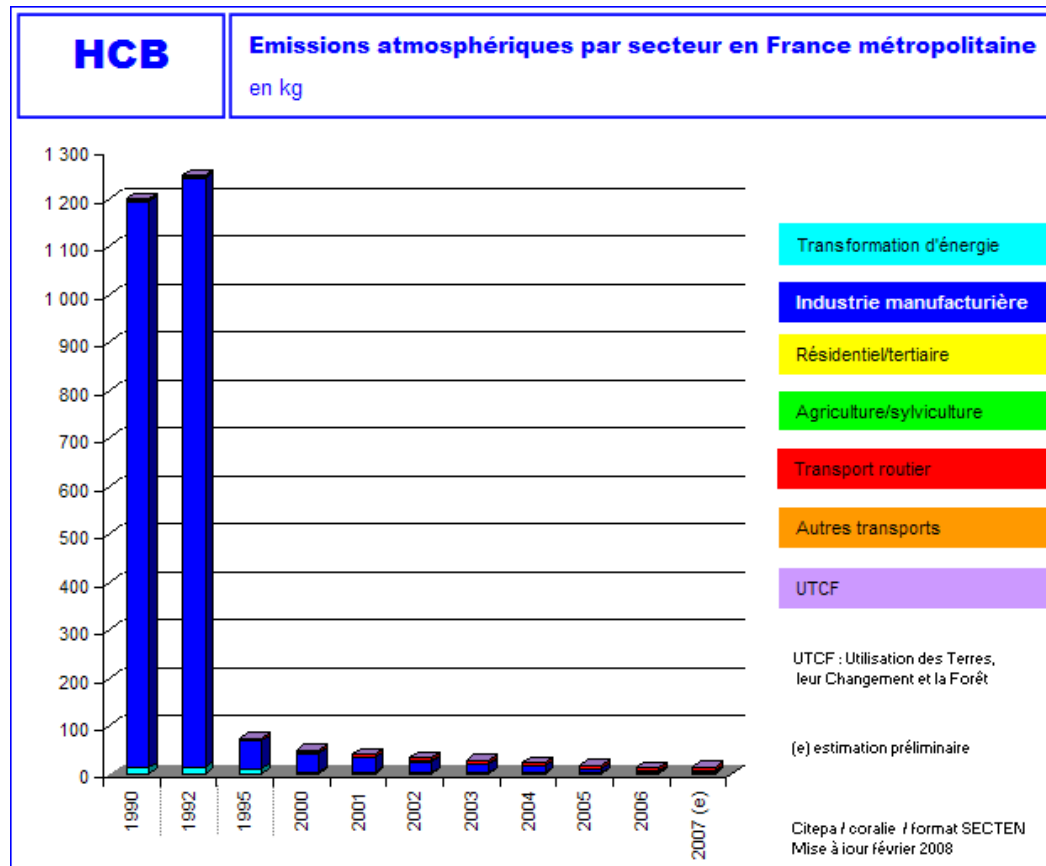
Source : Welsch-Pausch and McLachlan, *Environ. Pollut.*, **102**, 129 (1998)

Les POPs : Réduction des émissions

- Interdiction du composé :
pesticides
- Technologie de dépollution :
dioxines et furannes des
incinérateurs (chauffage des gaz
à très haute température)

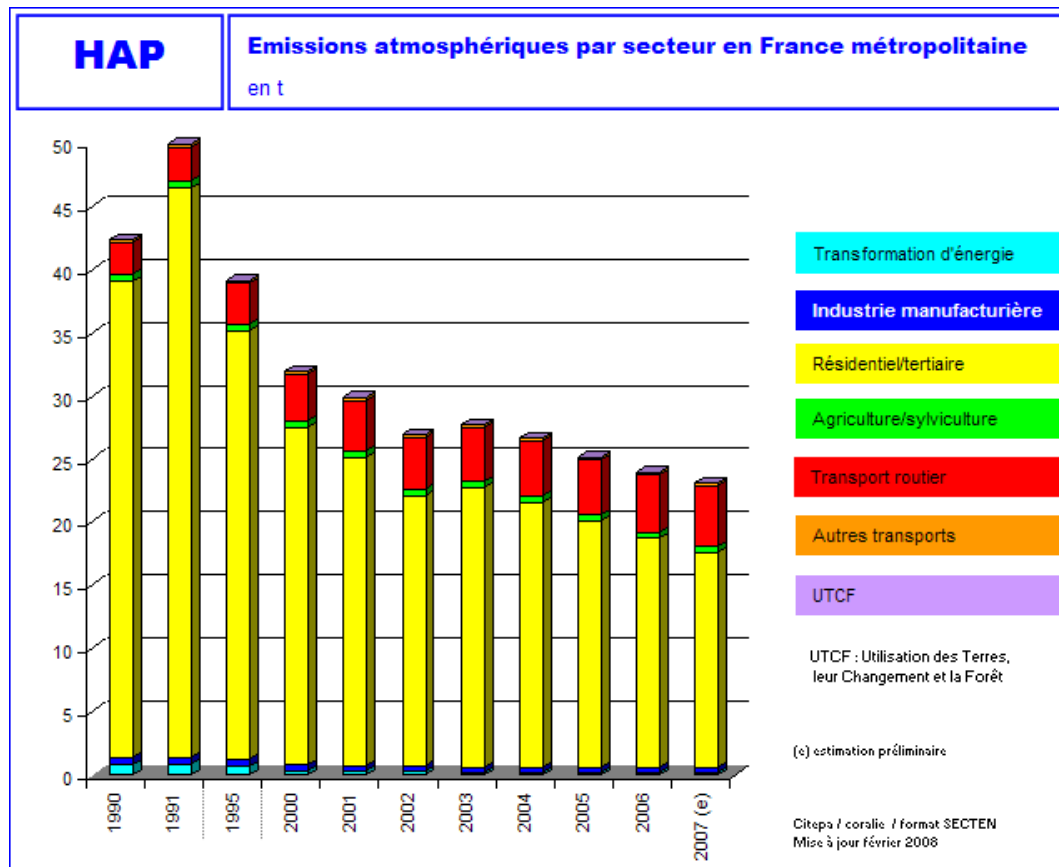


Les émissions d'hexachlorobenzène en France



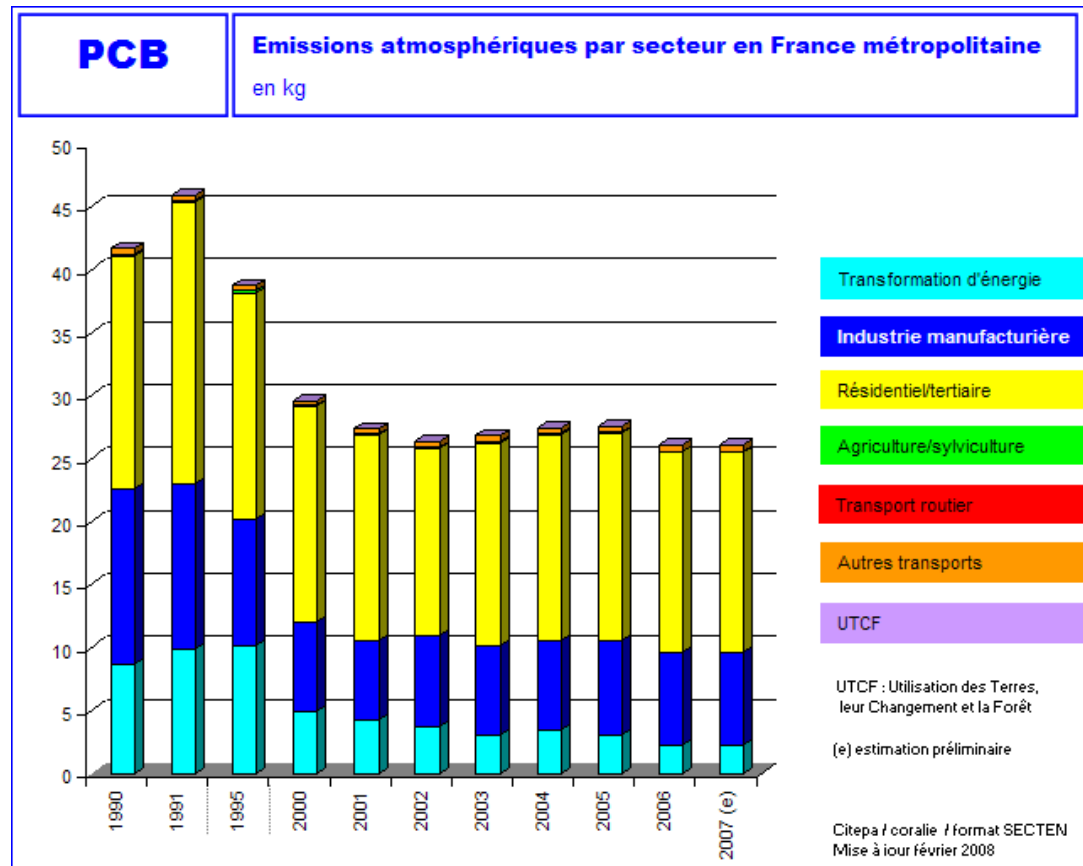
Source : CITEPA

Les émissions d'hydrocarbures aromatiques polycycliques en France



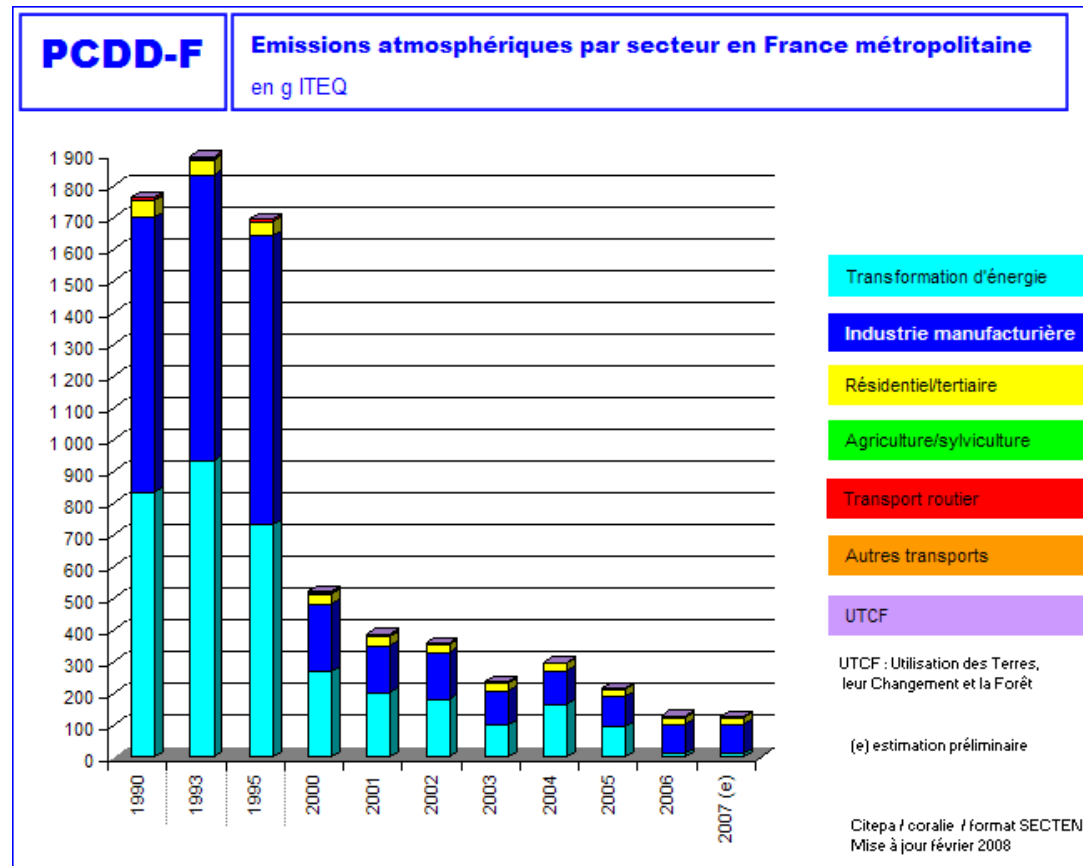
Source : CITEPA

Les émissions de PCB en France



Source : CITEPA

Les émissions de dioxines et furannes en France



Source : CITEPA

Les métaux lourds

TABLEAU PÉRIODIQUE DES ÉLÉMENTS

<http://www.kj-splu.fr/periodu/fr/>

PERIODE

1

2

3

4

5

6

7

GROUPE

1 IA

2 IIA

3 IIIB

4 IVB

5 VB

6 VIIB

7 VIIB

8

9

10

11 IB

12 IIB

13 IIIA

14 IVA

15 VA

16 VIA

17 VIIA

18 VIIIA

MASSE ATOMIQUE RELATIVE (1)

GROUPE IUPAC

GROUPE CAS

NOMBRE ATOMIQUE

SYMBOLE

NOM DE L'ÉLÉMENT

Métaux	Métalloïdes	Non-métaux
I	II	III
IV	V	VI
VII	VIII	IX
X	XI	XII
XIII	XIV	XV
XVI	XVII	XVIII

ÉTAT PHYSIQUE (25 °C, 101 kPa)

Ne - gaz Fe - solide

Ge - liquide Ti - synthétique

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
H 1,0079 HYDROGÈNE	He 4,0026 Hélium	Li 6,941 LITHIUM	Be 9,0122 Béryllium	B 10,811 Bore	C 12,011 CARBONE	N 14,007 AZOTE	O 15,999 OXYGÈNE	F 18,998 FLUOR	Ne 20,180 Néon	Na 22,990 SODIUM	Mg 24,305 MAGNÉSium	Al 26,982 ALUMINIUM	Si 28,086 SILICIUM	P 30,974 PHOSPHORE	S 32,065 SOUFRE	Cl 35,453 CHLORÈ	Ar 39,948 ARGON
K 39,098 POTASSIUM	Ca 40,078 CALCIUM	Sc 44,956 SCANDIUM	Ti 47,867 TITANE	V 50,942 VANADIUM	Cr 51,996 CHROME	Mn 54,938 MANGANESE	Fe 55,845 FER	Co 58,933 COBALT	Ni 58,693 NICKEL	Cu 63,546 CUIVRE	Zn 65,39 ZINC	Ga 69,723 GALLIUM	Ge 72,64 GERMANIUM	As 74,922 ARSENIC	Se 78,96 SÉLÉNIUM	Br 79,904 BROME	Kr 83,80 KRYPTON
Rb 85,468 RUBIDIUM	Sr 87,62 STRONTIUM	Y 88,906 YTRIUM	Zr 91,224 ZIRCONIUM	Nb 92,906 NIOBIUM	Mo 95,94 MOLYBDÈNE	Tc (98) TECHNETIUM	Ru 101,07 RUTHÈNIUM	Rh 102,91 RHODIUM	Pd 106,42 PALLADIUM	Ag 107,87 ARGENT	Cd 112,41 CADMIUM	In 114,82 INDIUM	Sn 118,71 ÉTAIN	Sb 121,76 ANTIMOINE	Te 127,6 TELLURE	I 126,90 IODE	Xe 131,29 XÉNON
Cs 132,91 CÉSBIUM	Ba 137,33 BARYUM	La-Lu 57-71 Lanthanides	Hf 178,49 HAFNIUM	Ta 180,95 TANTALE	W 183,84 TUNGSTÈNE	Re 186,21 RHÉNIUM	Os 190,23 OSMIUM	Ir 192,22 IRIDIUM	Pt 195,08 PLATINE	Au 196,97 OR	Hg 200,59 MERCURE	Tl 204,38 THALLIUM	Pb 207,2 PLOMB	Bi 208,98 BISMUTH	Po (209) POLONIUM	At (210) ASTATE	Rn (222) RADON
Fr (223) FRANCIUM	Ra (226) RADIUM	Ac-Lr 89-103 Actinides	Rf (261) RÉFÉRIUM	Db (262) DUBNIUM	Sg (266) SEABORGIUM	Ib (264) BOHRIUM	Hs (277) HASSIUM	Mt (268) MEITNERIUM	Uun (281) UNUNBIUM	Uub (272) UNUNBIUM	Uul (285) UNUNBIUM	Uuq (289) UNUNBIUM	Uuq (289) UNUNBIUM	Uuq (289) UNUNBIUM	Uuq (289) UNUNBIUM	Uuq (289) UNUNBIUM	Uuq (289) UNUNBIUM

LANTHANIDES

57 138,91 La LANTHANE	58 140,12 Ce CÉRIUM	59 140,91 Pr PRASEODYME	60 144,24 Nd NÉODYME	61 (145) Pm PRIMUMIUM	62 150,36 Sm SAMARIUM	63 151,96 Eu EUROPDIUM	64 157,25 Gd GADOLINIUM	65 162,50 Tb TERBIUM	66 162,50 Dy DYSPROSIUM	67 164,93 Ho HOLMIUM	68 167,26 Er ERBIUM	69 168,93 Tm THULIUM	70 173,04 Yb YTBREBIUM	71 174,97 Lu LUTETIUM
-----------------------------	---------------------------	-------------------------------	----------------------------	-----------------------------	-----------------------------	------------------------------	-------------------------------	----------------------------	-------------------------------	----------------------------	---------------------------	----------------------------	------------------------------	-----------------------------

ACTINIDES

89 (227) Ac ACTINIUM	90 232,04 Th THORIUM	91 231,04 Pa PROTACTINIUM	92 238,03 U URANIUM	93 (237) Np NEPTUNIUM	94 (244) Pu PLUTONIUM	95 (243) Am AMÉRICIUM	96 (247) Cm CURIUM	97 (247) Bk BERKÉLIUM	98 (251) Cf CALIFORNIUM	99 (252) Es EINSTEINIUM	100 (257) Fm FERMIUM	101 (258) Md MÉDALÉVIUM	102 (259) No NOBELIUM	103 (262) Lr LAWRENCIUM
----------------------------	----------------------------	---------------------------------	---------------------------	-----------------------------	-----------------------------	-----------------------------	--------------------------	-----------------------------	-------------------------------	-------------------------------	----------------------------	-------------------------------	-----------------------------	-------------------------------

(1) Pure Appl. Chem., 73, No. 4, 697-693 (2001)
La masse atomique relative est donnée avec cinq chiffres significatifs. Pour les éléments qui n'ont pas de nucléides stables, la valeur entre parenthèses indique le nombre de masse de l'isotope de l'élément ayant la durée de vie la plus grande.
Tous les éléments, pour les trois éléments Th, Pa et U, qui ont une composition isotopique variable, sont donnés avec une masse atomique relative indiquée.

Editeur: Michel Orlin

Les « métaux lourds » nocifs pour la santé

TABLEAU PÉRIODIQUE DES ÉLÉMENTS

http://www.kj-splu.fr/periodu/fr/

PERIODE

1

2

3

4

5

6

7

GROUPE

1 IA

2 IIA

3 IIIB

4 IVB

5 VB

6 VIB

7 VIIB

8

9

10

11 IB

12 IIB

13 IIIA

14 IVA

15 VA

16 VIA

17 VIIA

18 VIIIA

MASSE ATOMIQUE RELATIVE (1)

GROUPE IUPAC

GROUPE CAS

NOMBRE ATOMIQUE

SYMBOLIE

NOM DE L'ÉLÉMENT

ÉTAT PHYSIQUE (25 °C, 101 kPa)

Ne - gaz Fe - solide

Ge - liquide Ti - synthétique

Classification

- Métaux
- Métalloïdes
- Non-métaux
- Métaux alcalins
- Chalcogènes
- Métaux alcalino-terreux
- Halogènes
- Métaux de transition
- Gaz nobles
- Lanthanides
- Actinides

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
H	He											B	C	N	O	F	Ne
Li	Be											Al	Si	P	S	Cl	Ar
Na	Mg											Al	Si	P	S	Cl	Ar
K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr
Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe
Cs	Ba	La-Lu	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn
Fr	Ra	Ac-Lr	Rf	Db	Sg	Bh	Hs	Mt	Uuu	Uuu	Uub						

LANTHANIDES

57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71
La	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
LANTHANE	CÉRIUM	PRASÉODYME	NÉODYME	PROMÉTHIUM	SAMARIUM	EUROPIUM	GADOLINIUM	TERBIUM	DYSPROSIUM	HOUMIUM	ERBIUM	THULIUM	YTERBIUM	LUTÉTIUM

ACTINIDES

89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102	103
Ac	Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr
ACTINIUM	THORIUM	PROTACTINIUM	URANIUM	NEPTUNIUM	PLUTONIUM	AMÉRICIUM	CURIUM	BÉRELIUM	CALIFORNIUM	BERKÉLIUM	FÉRMIUM	MÉNDÉLÉVUM	NOBELIUM	LAWRENCIUM

(1) Pure Appl. Chem., 73, No. 4, 697-693 (2001)
 La masse atomique relative est donnée avec cinq chiffres significatifs. Pour les éléments qui n'ont pas de nucléides stables, la valeur entre parenthèses indique le nombre de masse du nucléide de l'élément ayant la durée de vie la plus grande.
 Toutefois, pour les trois éléments Th, Pa et U, qui ont une composition isotopique terrestre connue, une masse atomique est indiquée.

Editeur: Michel Orlin

Les métaux lourds

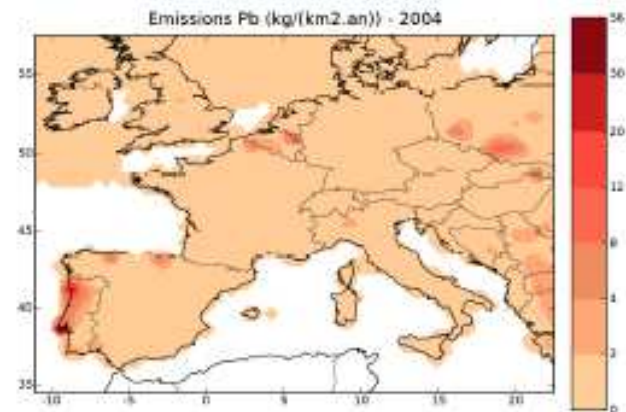
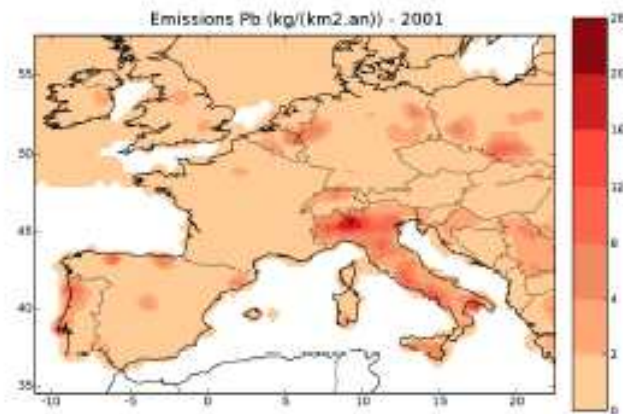
- Plomb : Effets néfastes sur l'hémoglobine (anémie), les reins et le système nerveux (saturnisme)
- Cadmium : Effets sur le système rénal, les os (fragilité) et le système digestif
- Mercure : Effets sur le système nerveux et le cerveau (hydrargyrisme : tremblements, pertes de mémoires) ; principal effet dû à l'exposition environnementale est le risque de retardement du développement des nouveaux-nés



Plomb : Émissions

Émissions atmosphériques principalement dues aux émissions automobiles ;
autres utilisations pour les peintures et batteries électriques

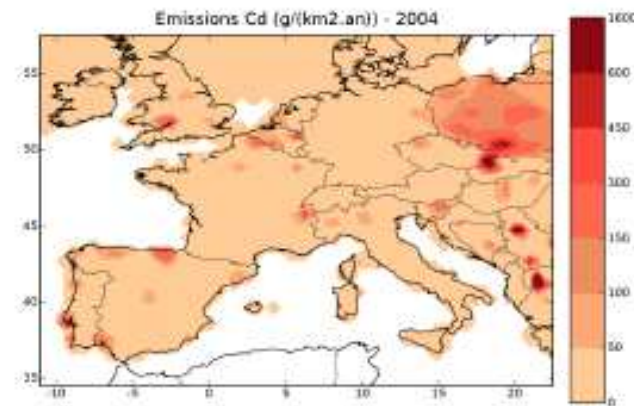
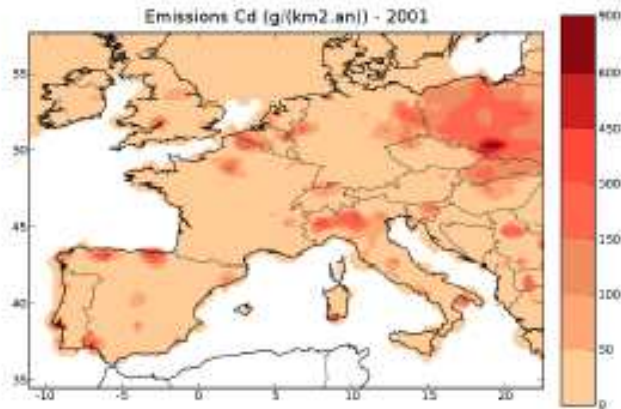
Émissions réduites dans les années 80



Évolution des émissions de plomb en Europe entre 2001 et 2004

Cadmium : Émissions

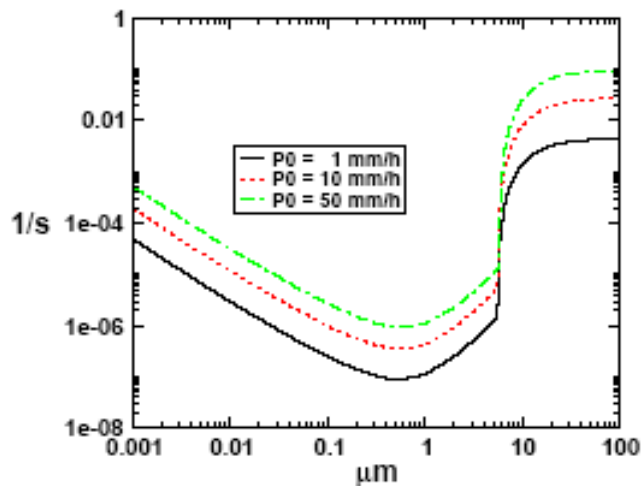
Émissions atmosphériques principalement dues aux sources industrielles : industrie sidérurgique (présent avec d'autres minerais), utilisation dans les batteries, revêtements anti-corrosion, peintures, alliages à bas point de fusion



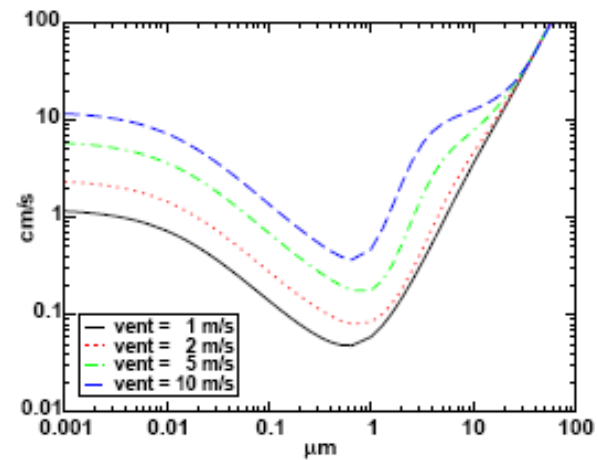
Évolution des émissions de cadmium en Europe entre 2001 et 2004

Le plomb et le cadmium dans l'atmosphère

Le plomb et le cadmium sont présents sous forme particulaire



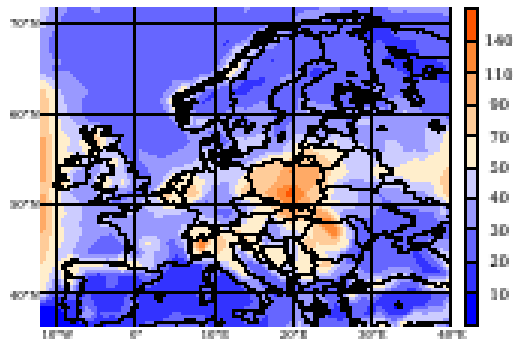
Lessivage par la pluie



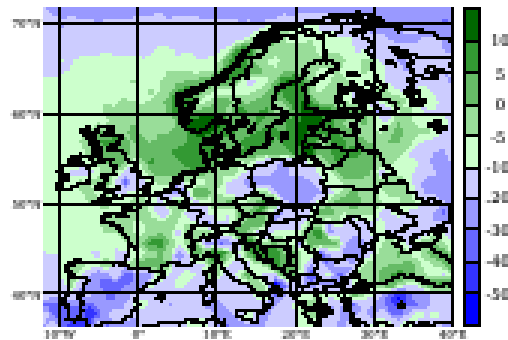
Dépôts secs

Influence de la taille des particules sur les dépôts atmosphériques

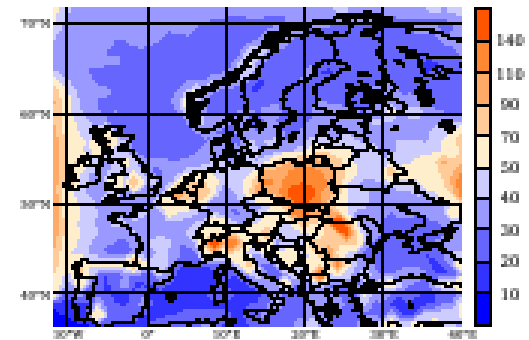
Dépôt du cadmium



Une seule taille de particules



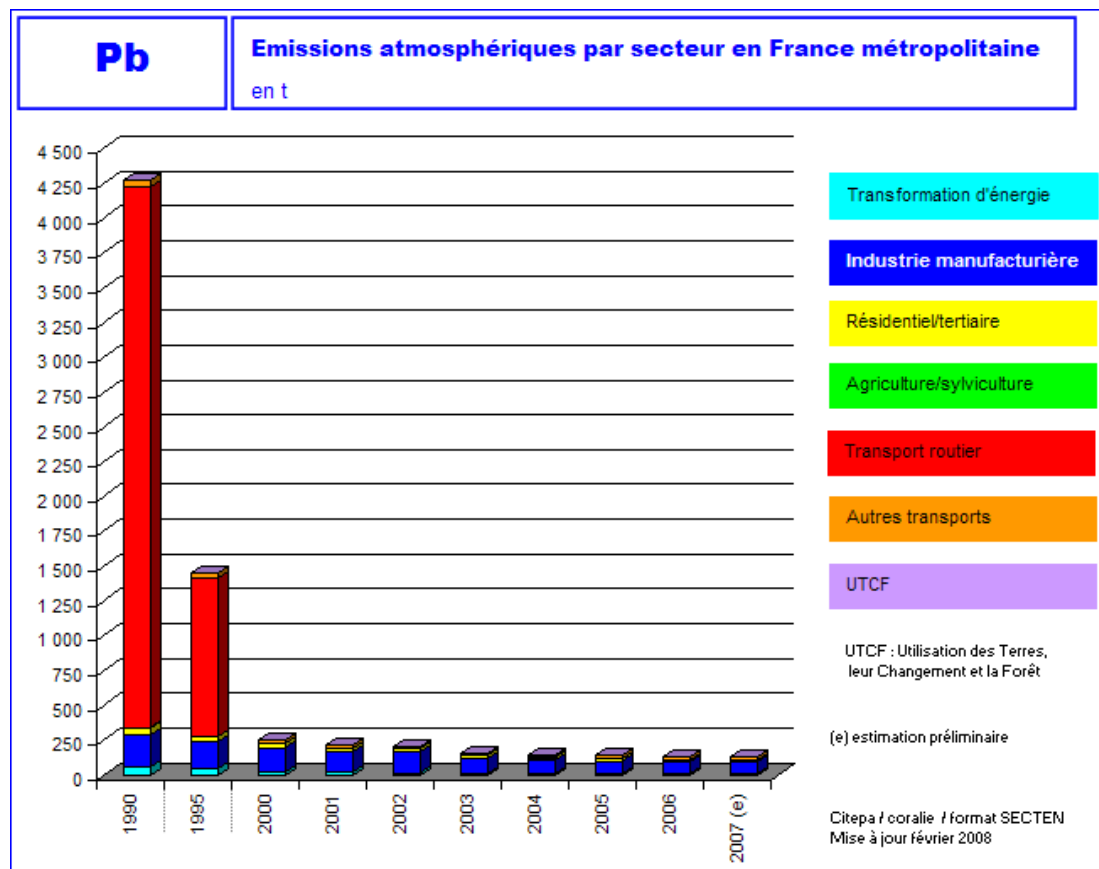
Différence (%)



Granulométrie de particules

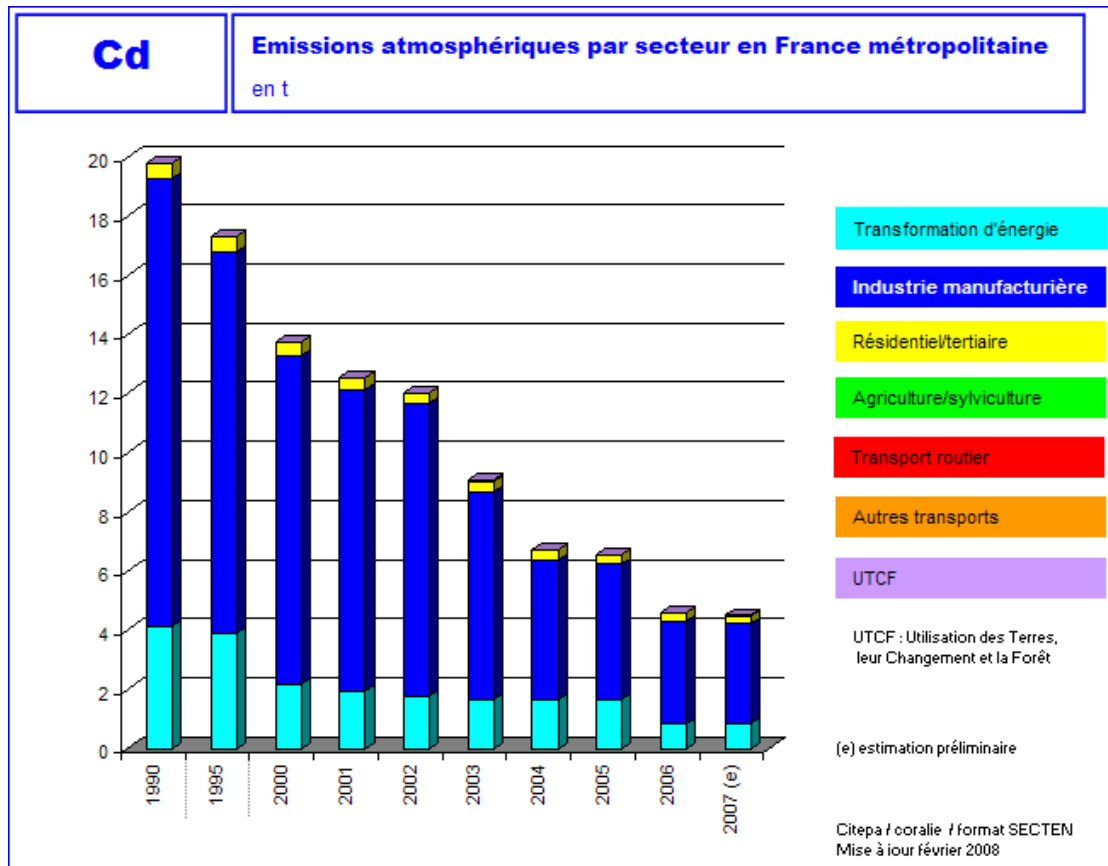
Source : Yelva Roustan, Thèse, CEREAs, 2005

Les émissions de plomb en France



Source : CITEPA

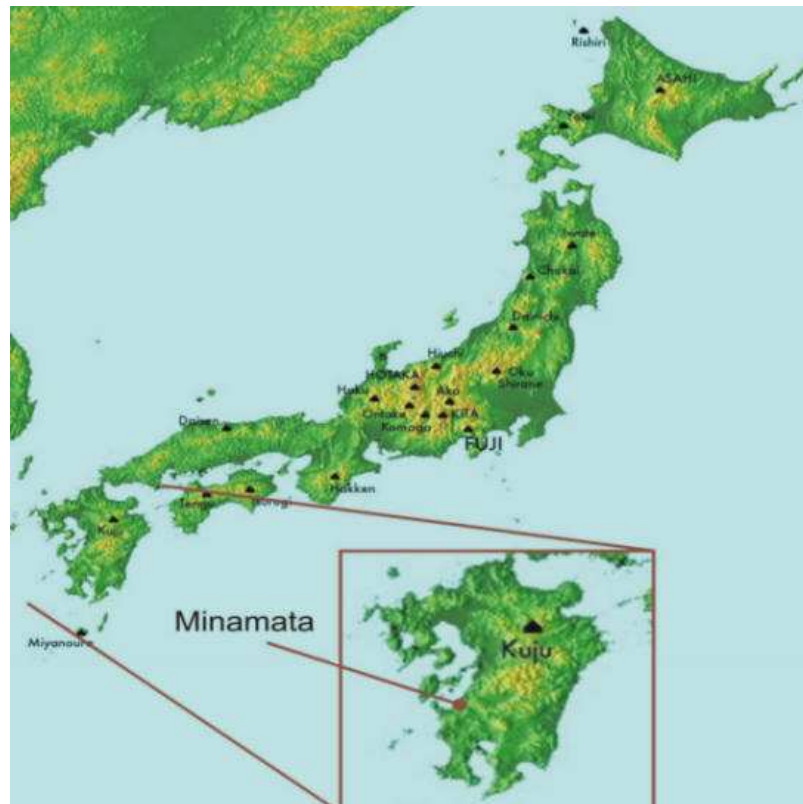
Les émissions de cadmium en France



Source : CITEPA

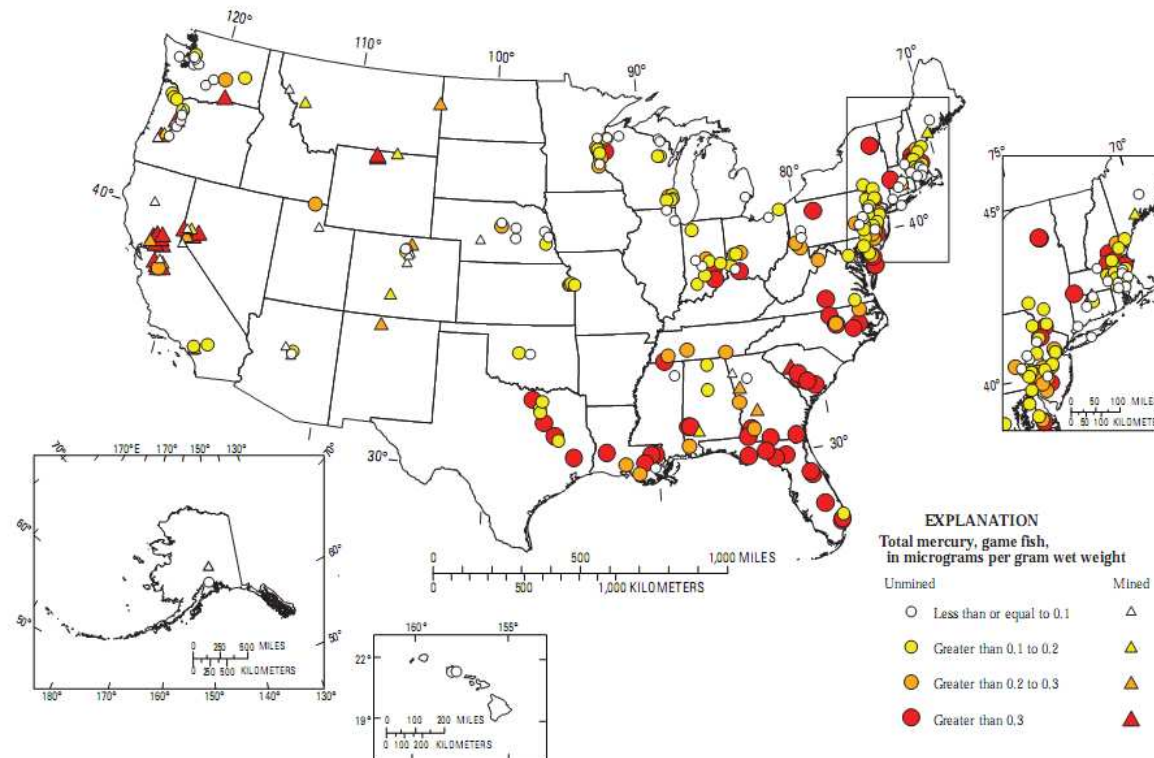
Le mercure

La catastrophe de Minamata



Source : W.E. Smith, 1971-1972

Contamination des eaux de surface par le mercure aux États Unis



Concentrations de mercure dans les poissons des rivières américaines
(le seuil réglementaire est de 0,3 ppm, soit 0,3 $\mu\text{g Hg/g}$ poisson)

Source : Scudder et al., USGS Report, 2009

Le mercure

- Le mercure est considéré comme neurotoxique par plusieurs organisations (OMS, U.S. EPA, etc.)
- Dans le milieu ambiant, le mercure présente des effets néfastes pour la santé surtout quand il est sous forme organique (méthylé)
- On trouve du méthyle-mercure dans des lacs éloignés de toutes sources de mercure; ce mercure provient donc de l'atmosphère
- Le mercure est émis dans l'atmosphère sous forme minérale; il est transformé en méthyle-mercure dans les lacs et les océans

Le mercure : Émissions

Émissions naturelles : océans, volcans, régions riches en mercure



Émissions dues aux activités humaines : combustion du charbon, incinération des déchets, production du chlore, orpaillage, fongicides et bactéricides

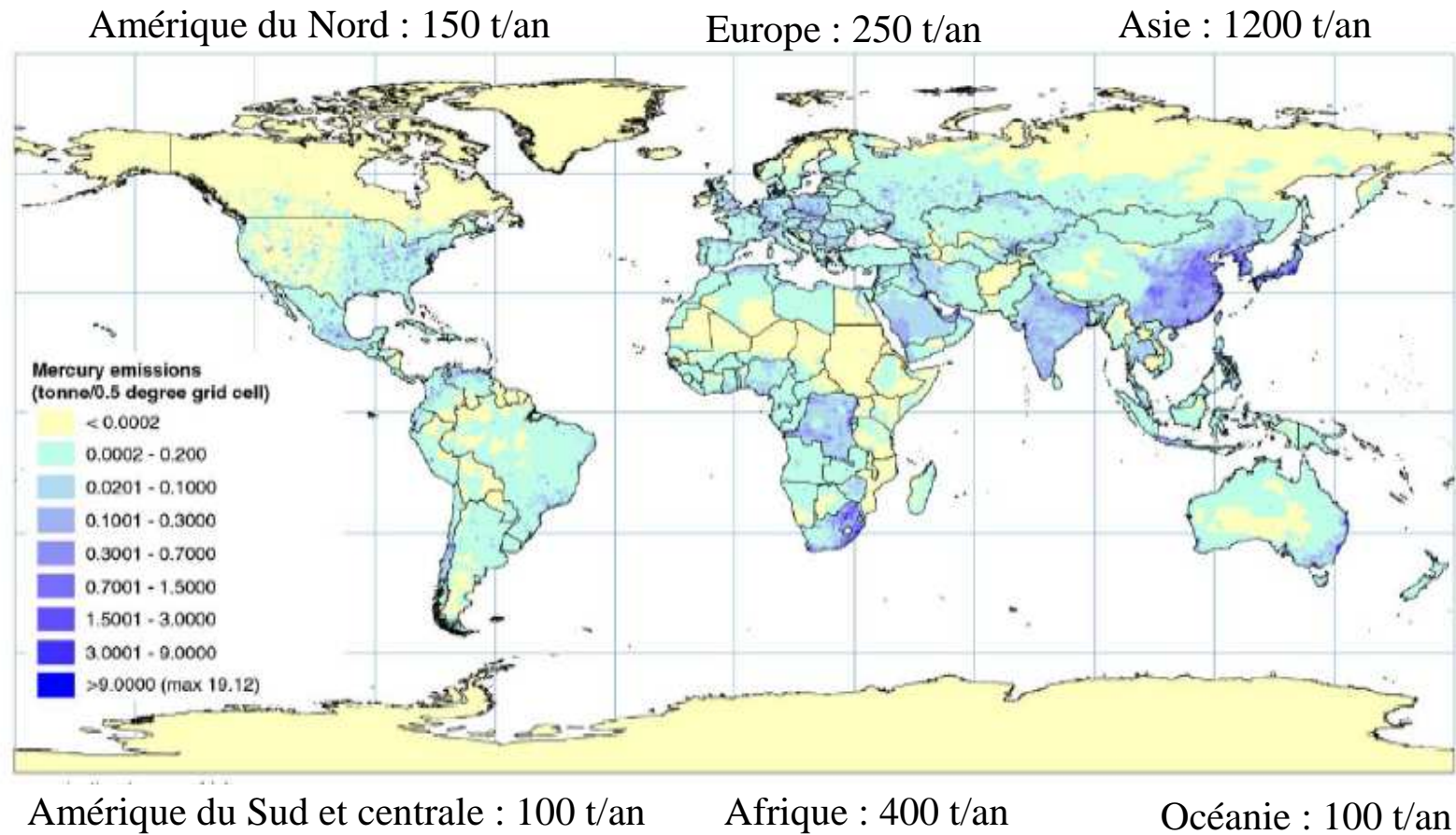


Émissions de mercure déposé de l'atmosphère : effet « sauterelle »

Émissions actuelles = 6000 à 7000 tonnes par an

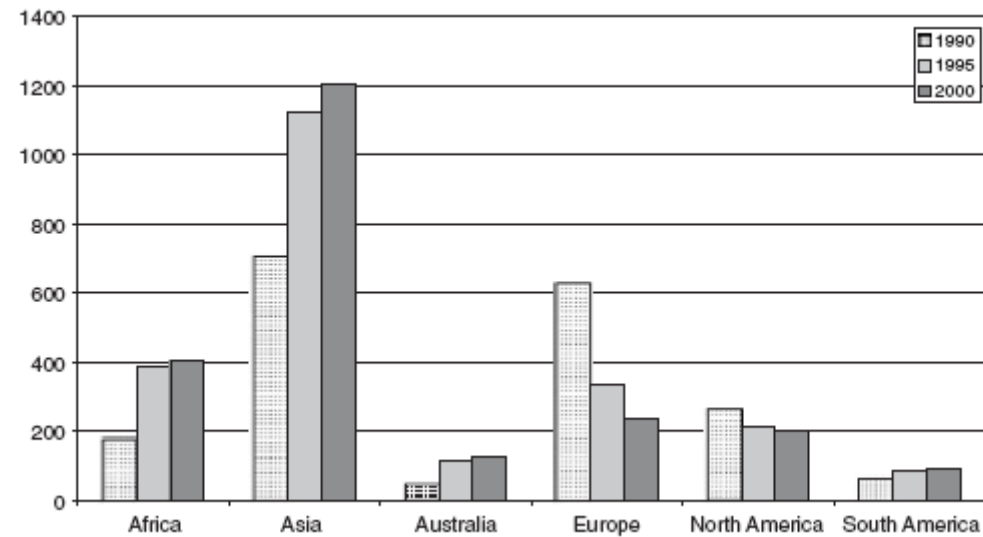
Émissions actuelles / émissions pré-industrielles = 3

Mercure : Émissions anthropiques en 2000



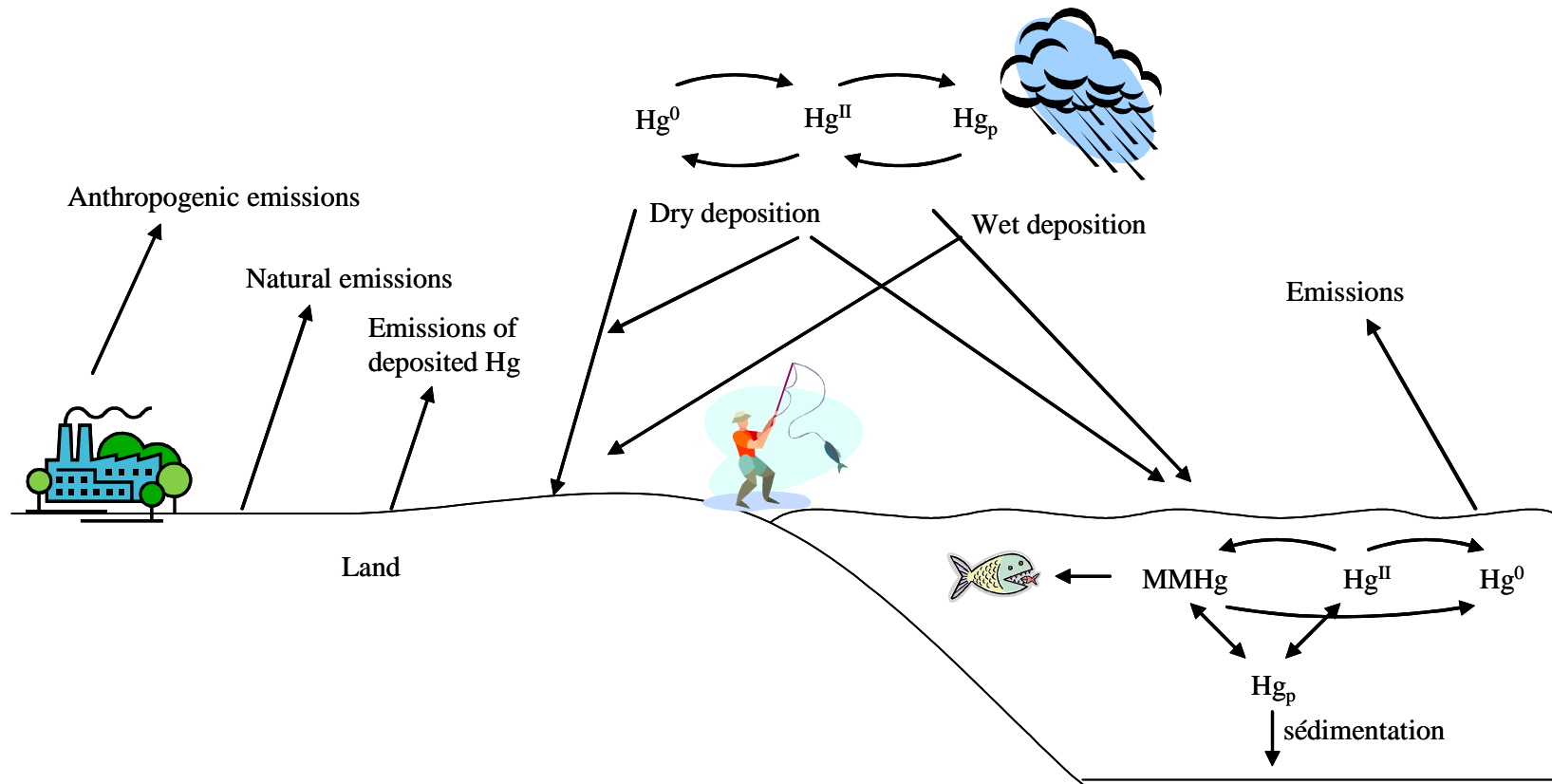
Source : Wilson et al., *Atmos. Environ.*, **40**, 4621 (2006)

Évolution des émissions de mercure dues aux activités humaines par continent

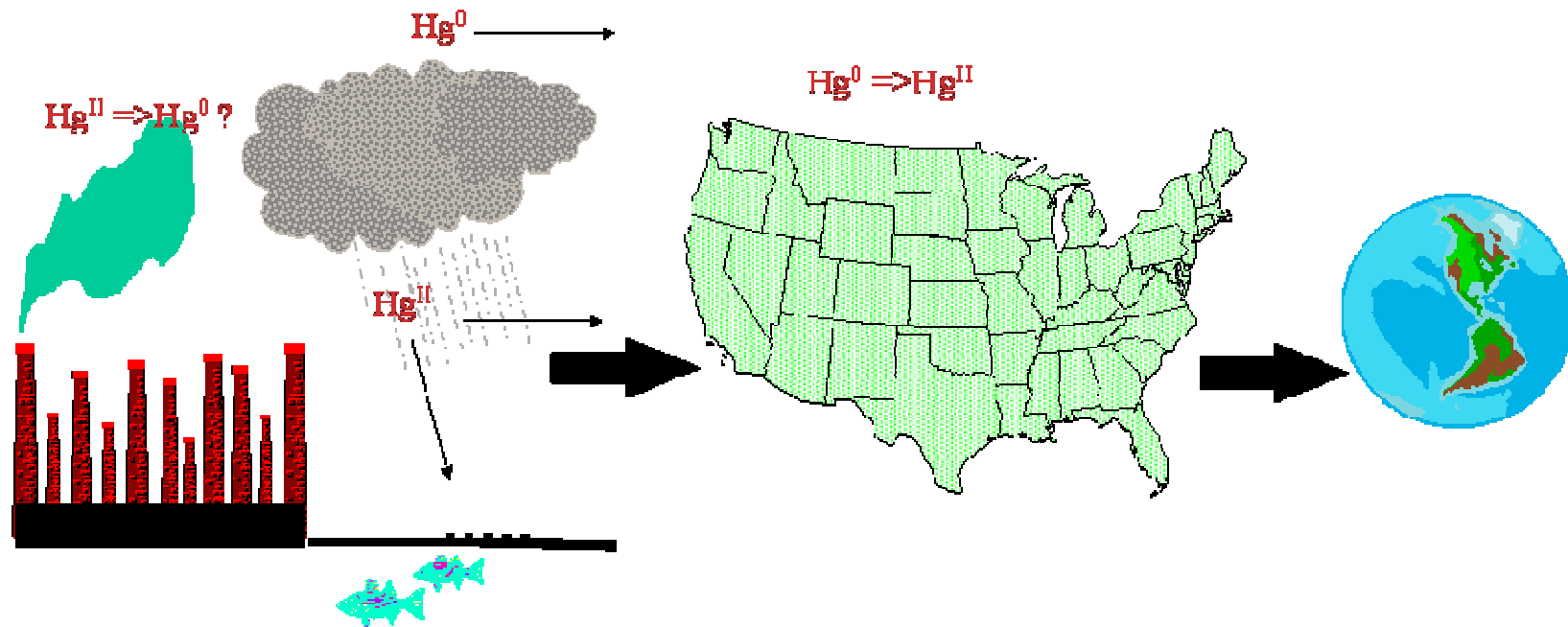


Source : Pacyna et al., *Atmos. Environ.*, **40**, 4048 (2006)

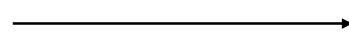
Cycle du mercure



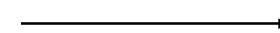
Le mercure dans l'atmosphère est un problème à la fois global et régional



Local

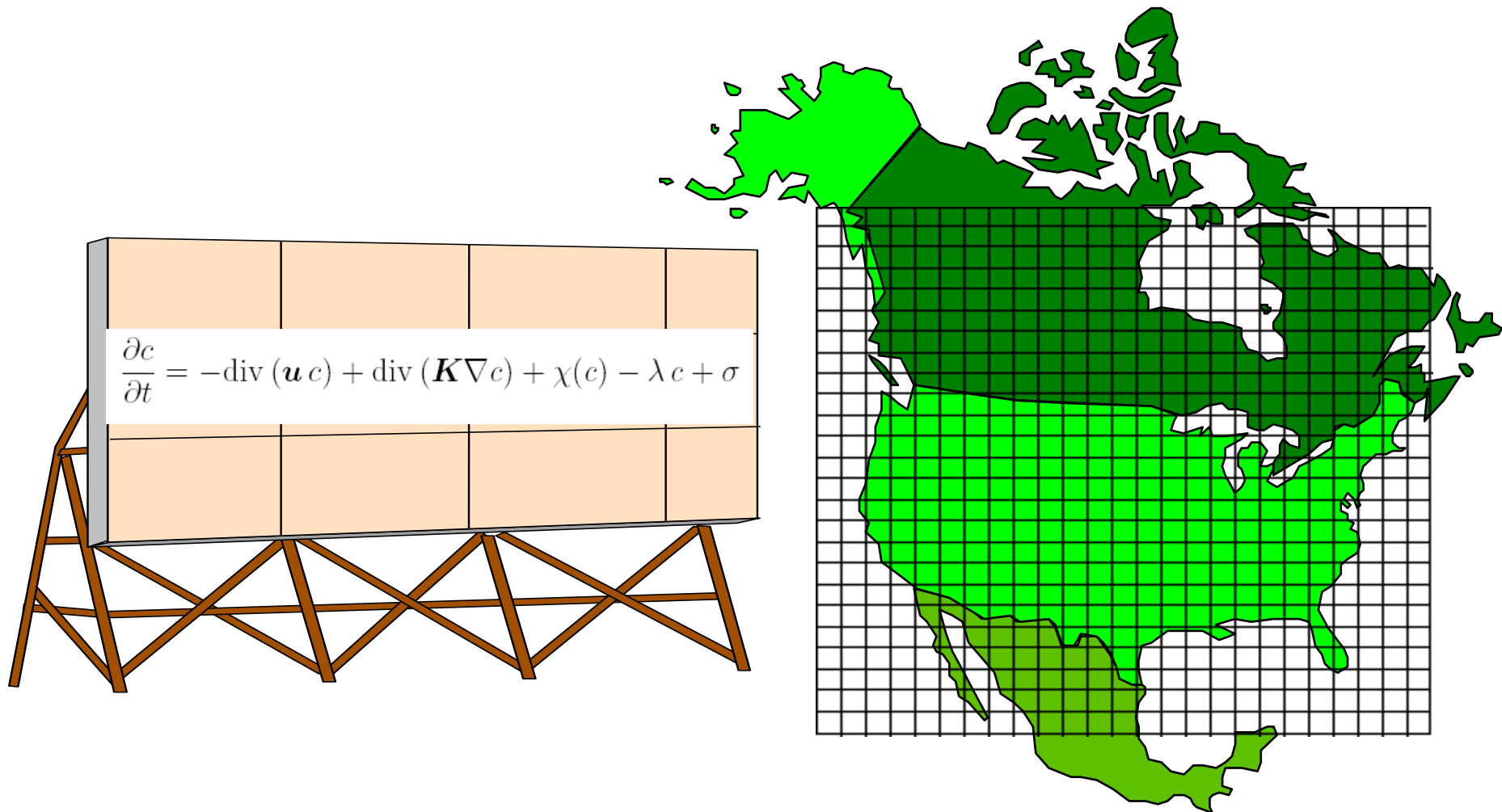


Régional

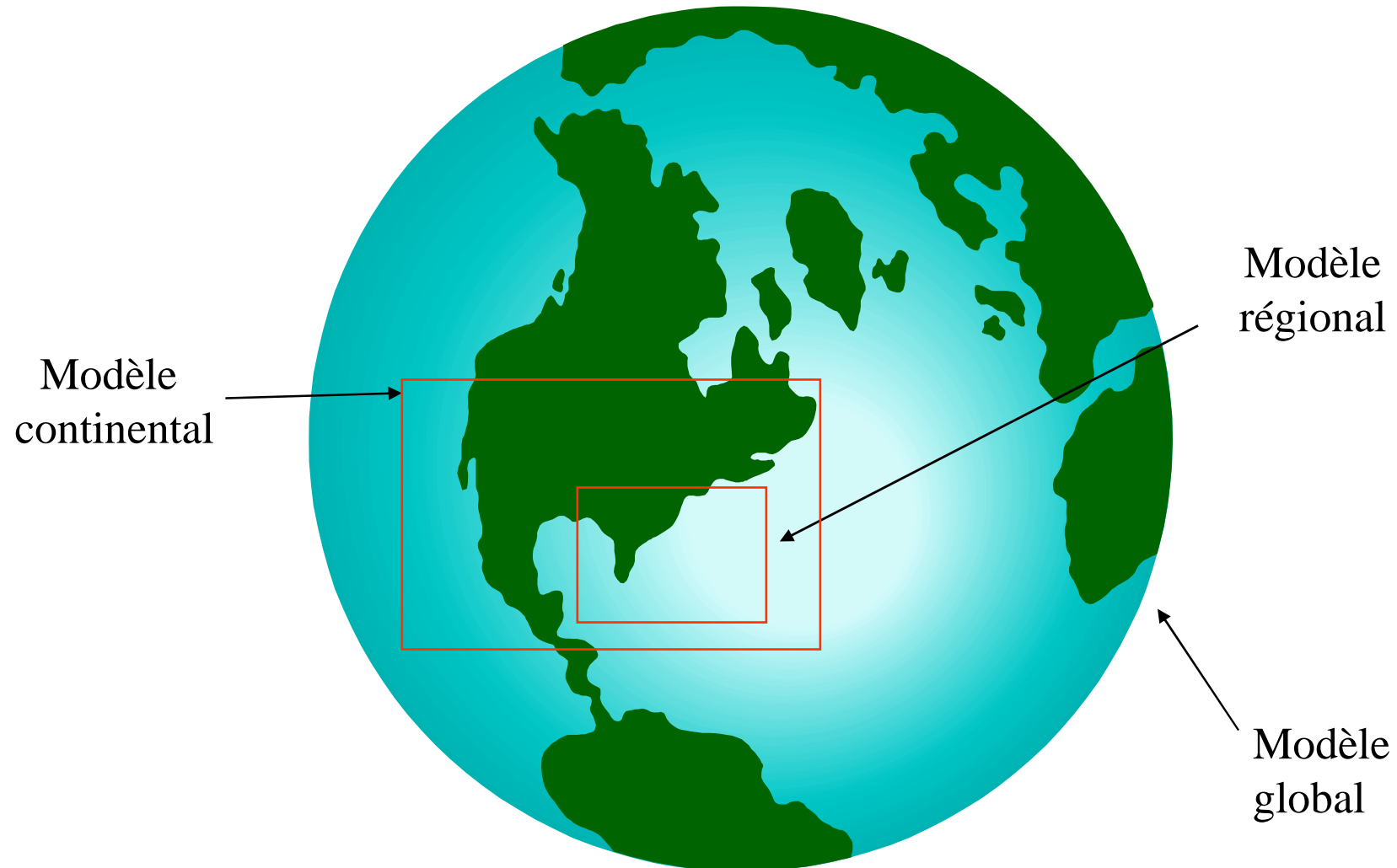


Global

Simulations des polluants atmosphériques

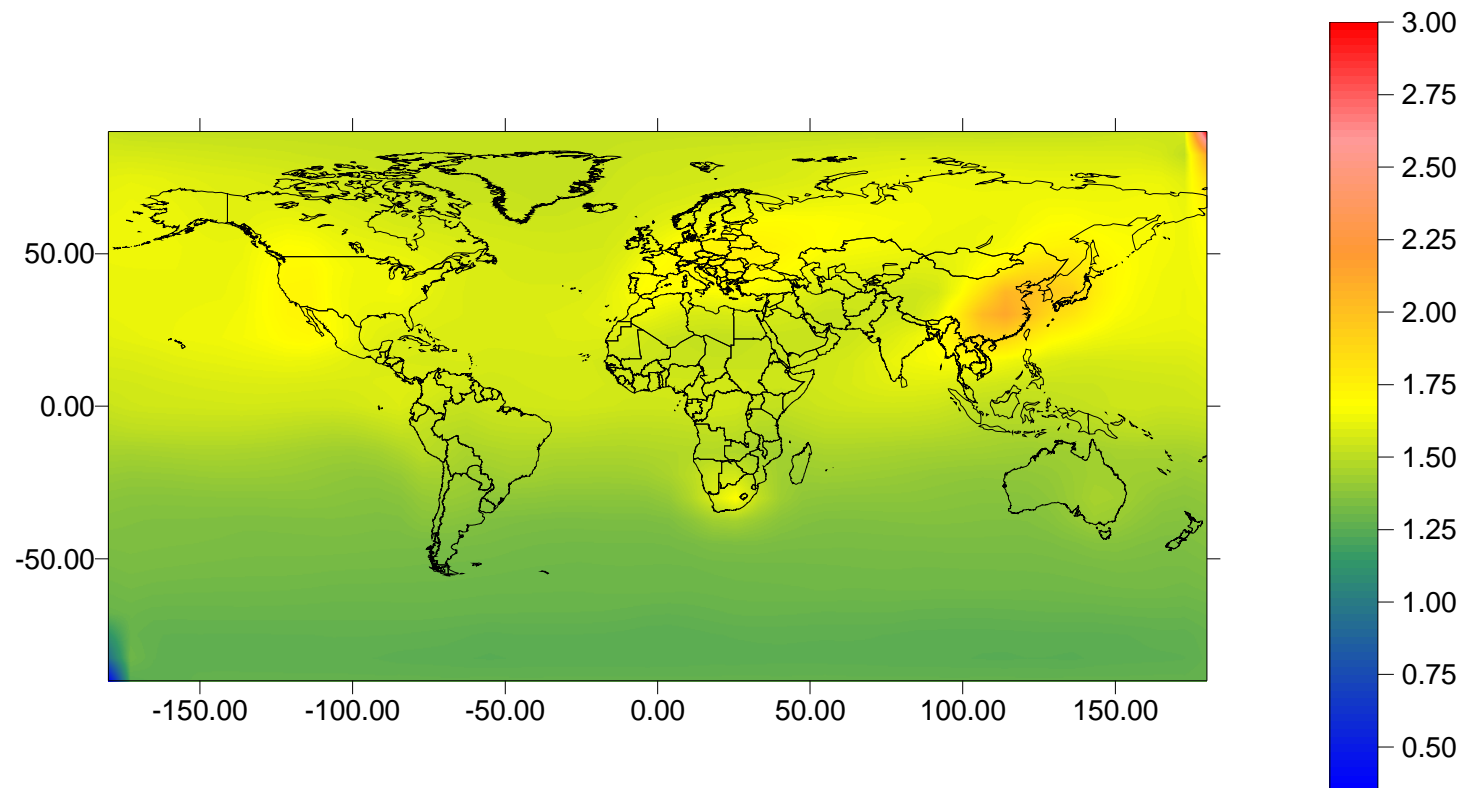


Modélisation du mercure dans l'atmosphère à plusieurs échelles spatiales

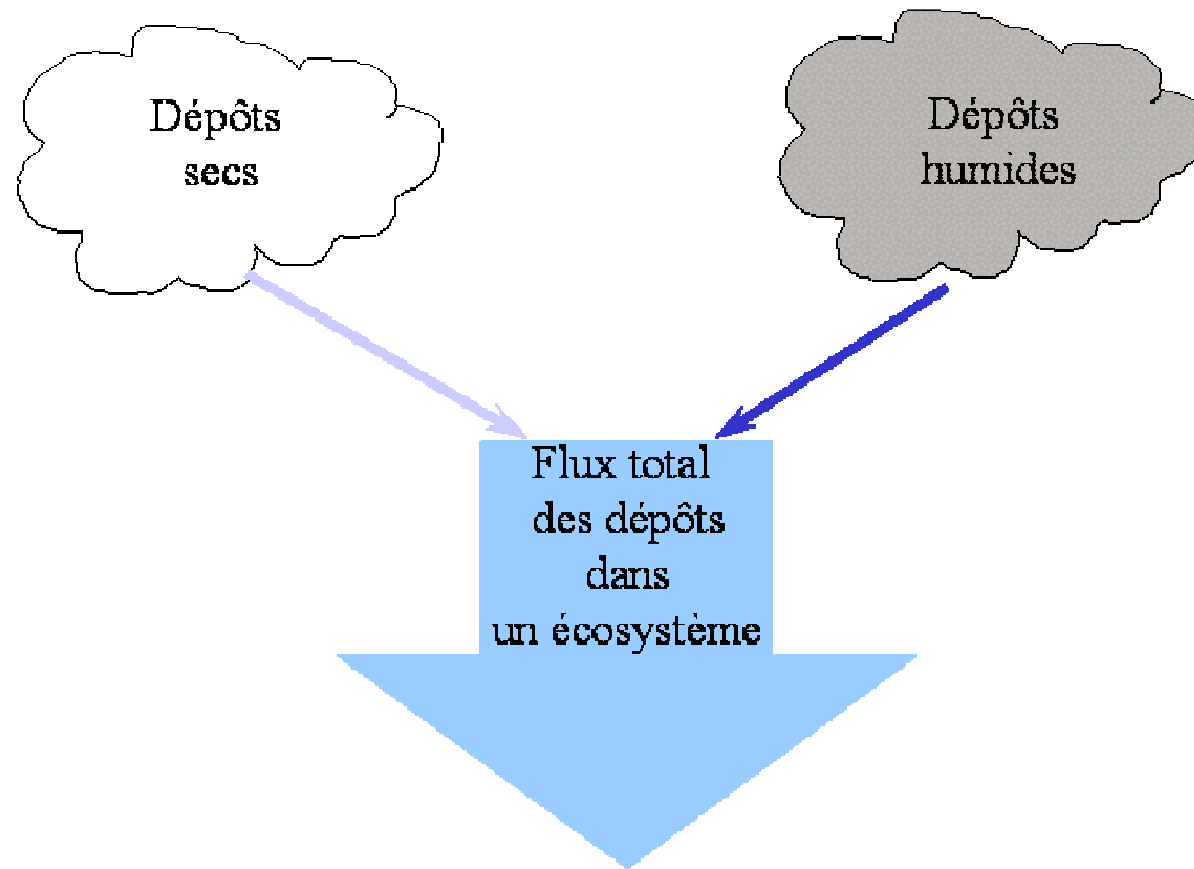


Modélisation globale du mercure

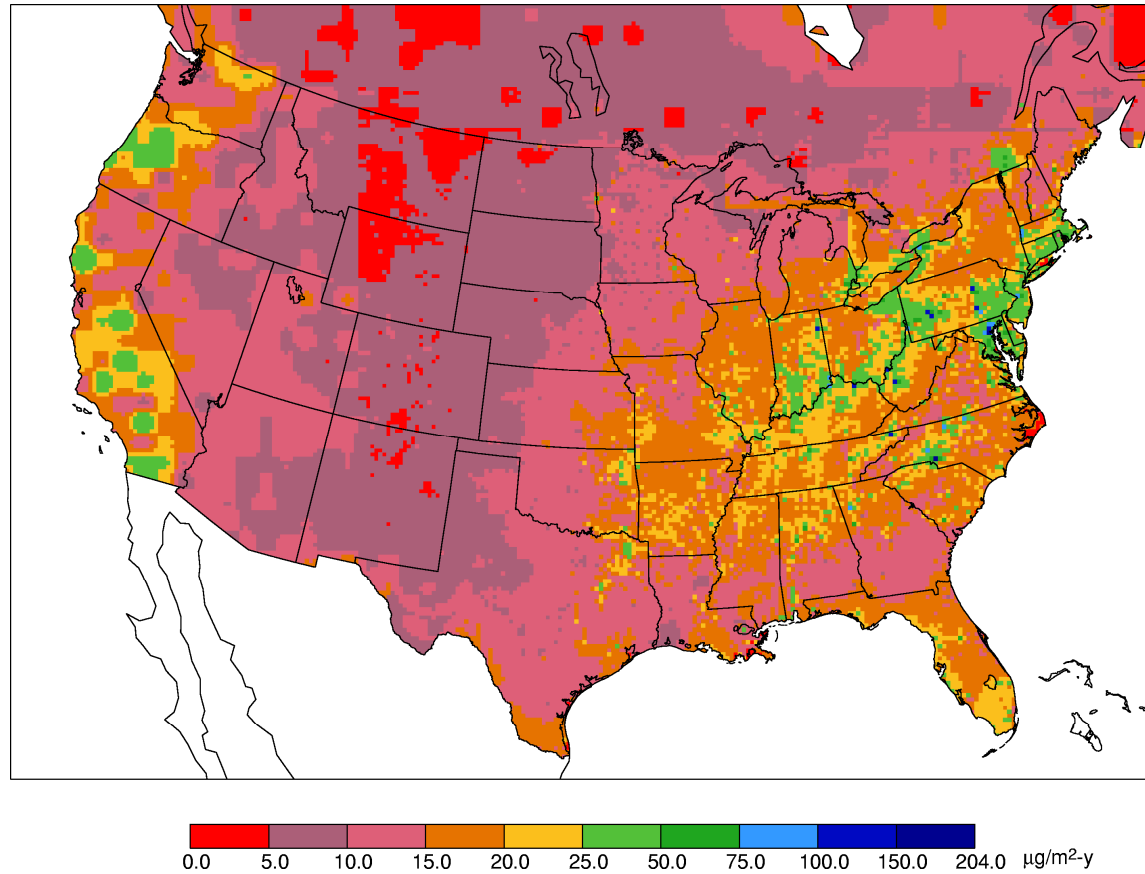
Concentration de Hg^0 (ng/m^3)



Dépôt du mercure dans un écosystème

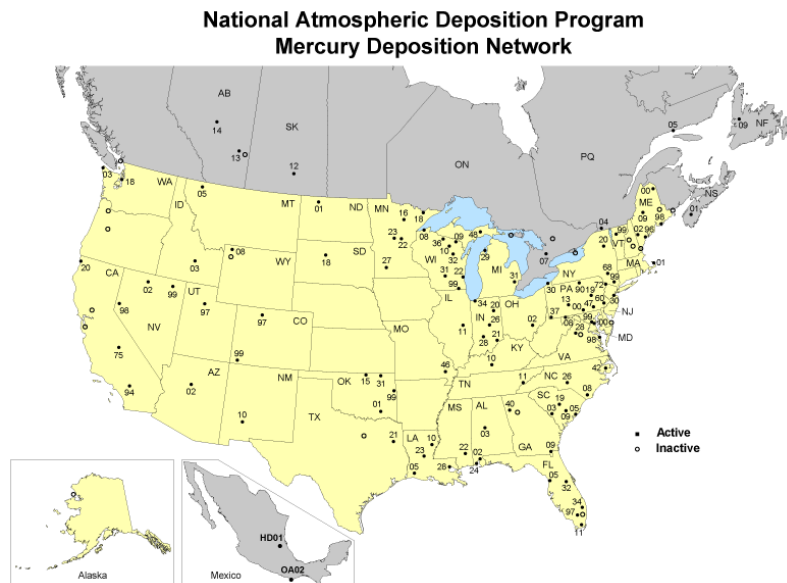


Modélisation continentale du mercure : Dépôts ($\mu\text{g}/\text{m}^2\text{-an}$)

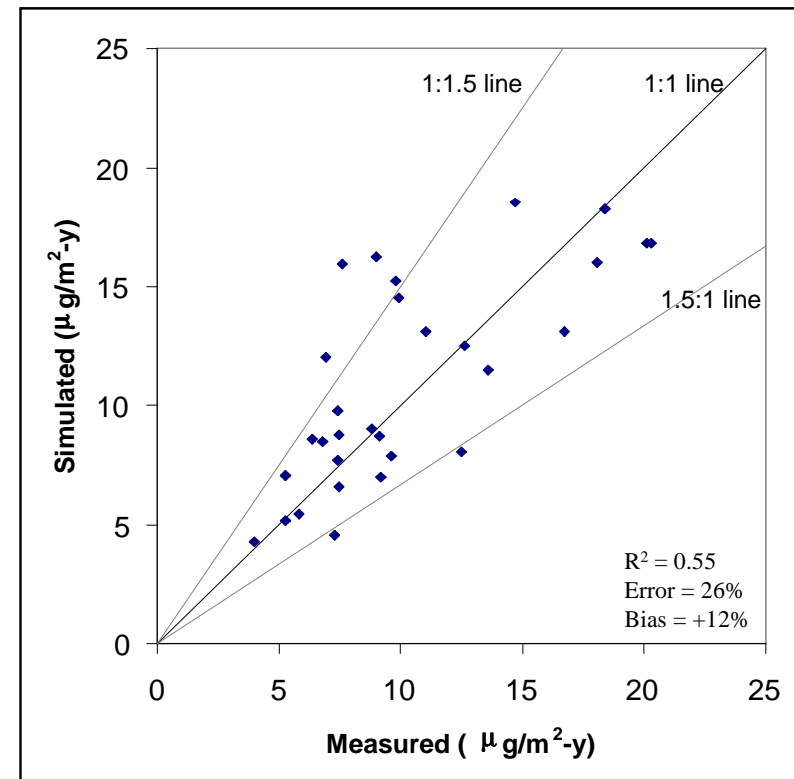


Modélisation du mercure

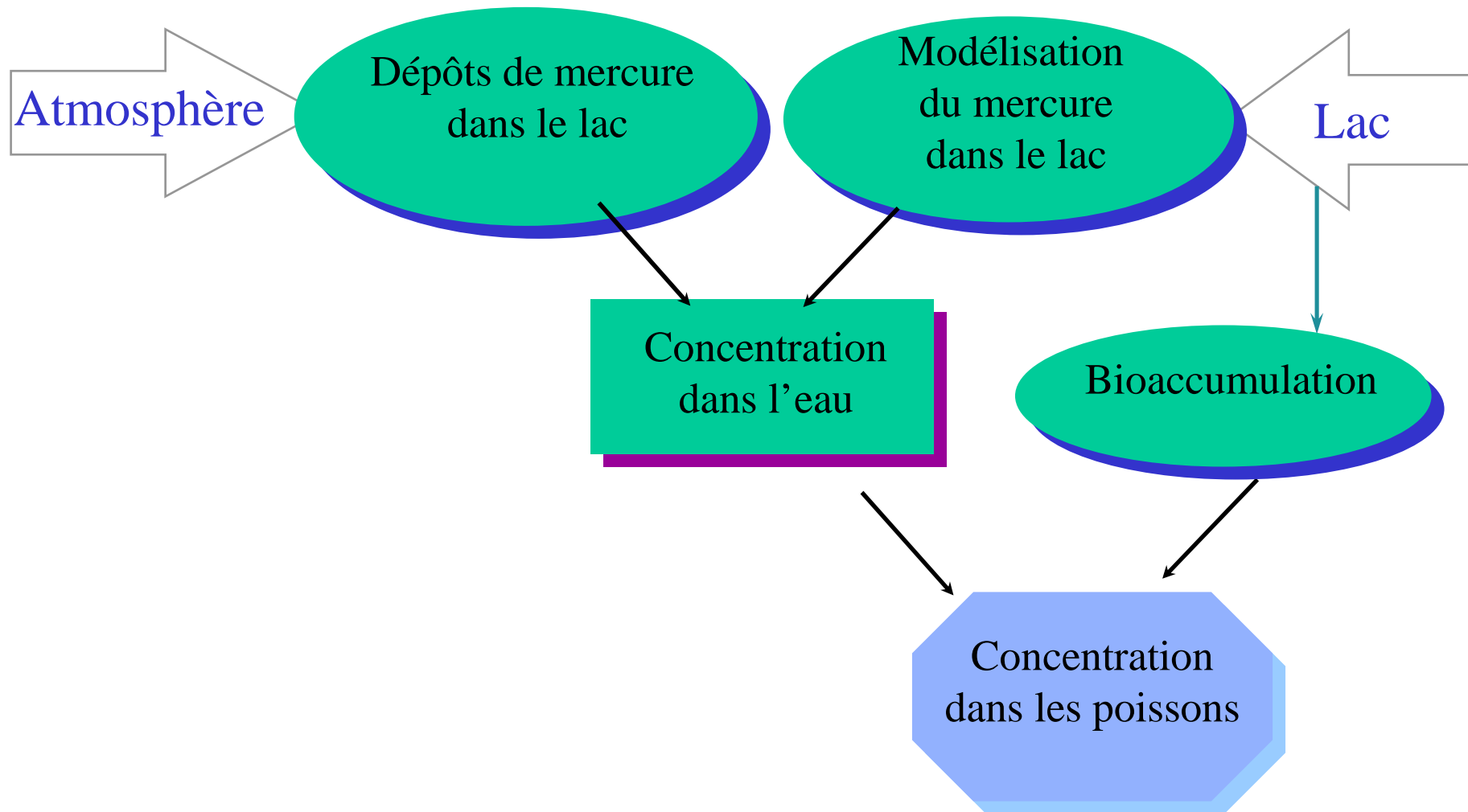
Comparaison avec des données de dépôts humides



Mesures de dépôts humides de mercure du réseau « Mercury deposition network » (MDN)

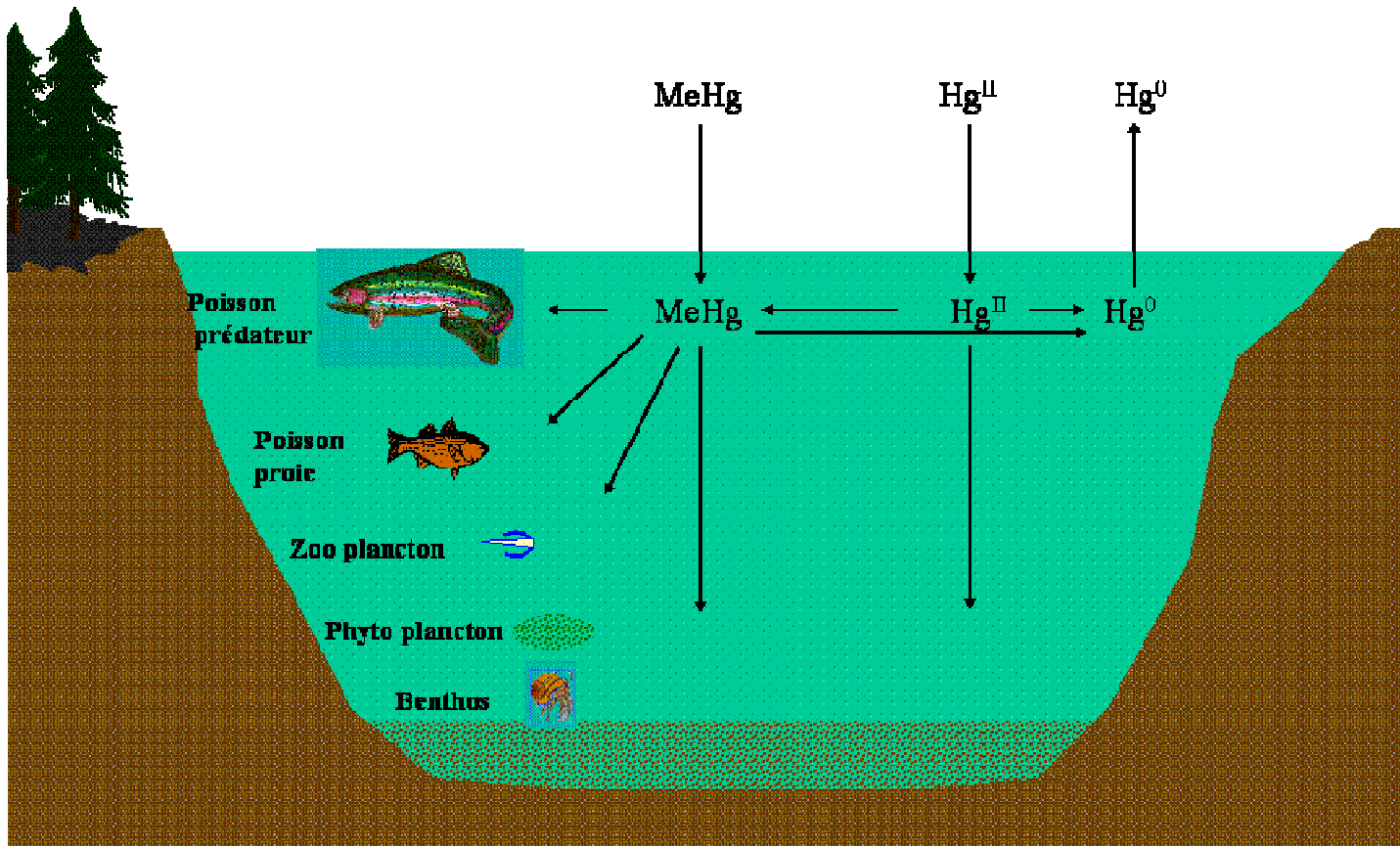


Calcul des concentrations de mercure dans un lac



Cycle du mercure dans les lacs

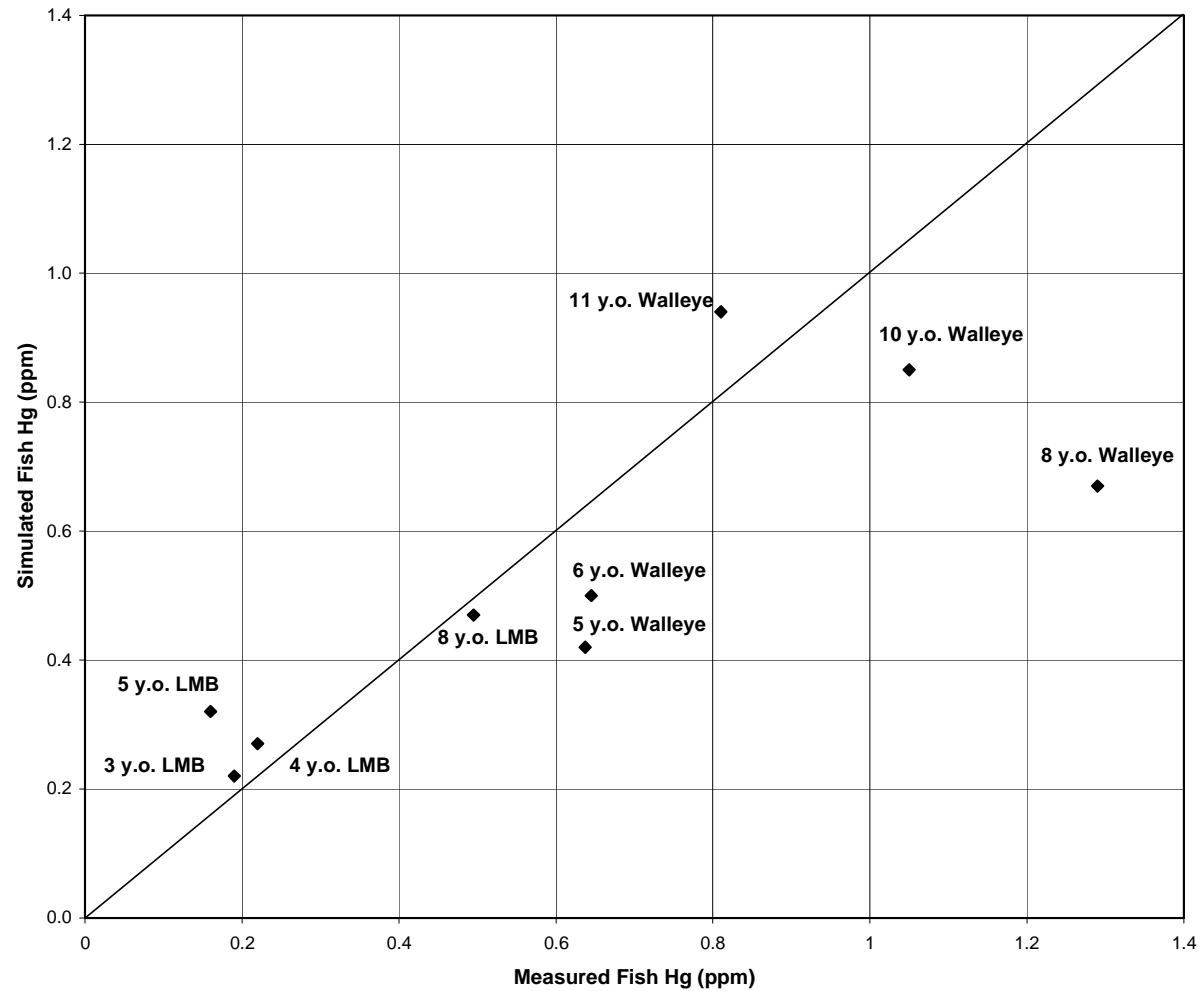
“Regional Mercury Cycling Model”



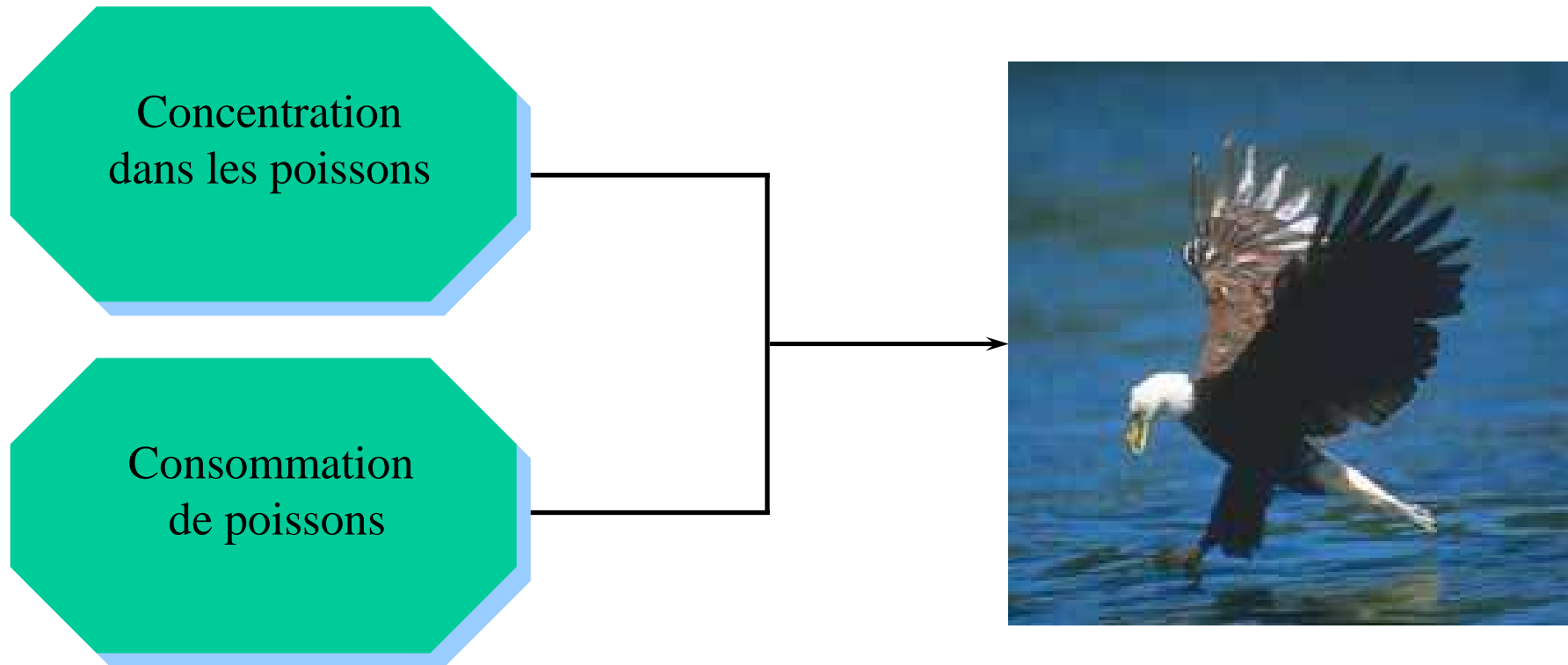
Simulation du mercure aquatique Lac Mitchell, Michigan, USA

$R^2 = 0.56$

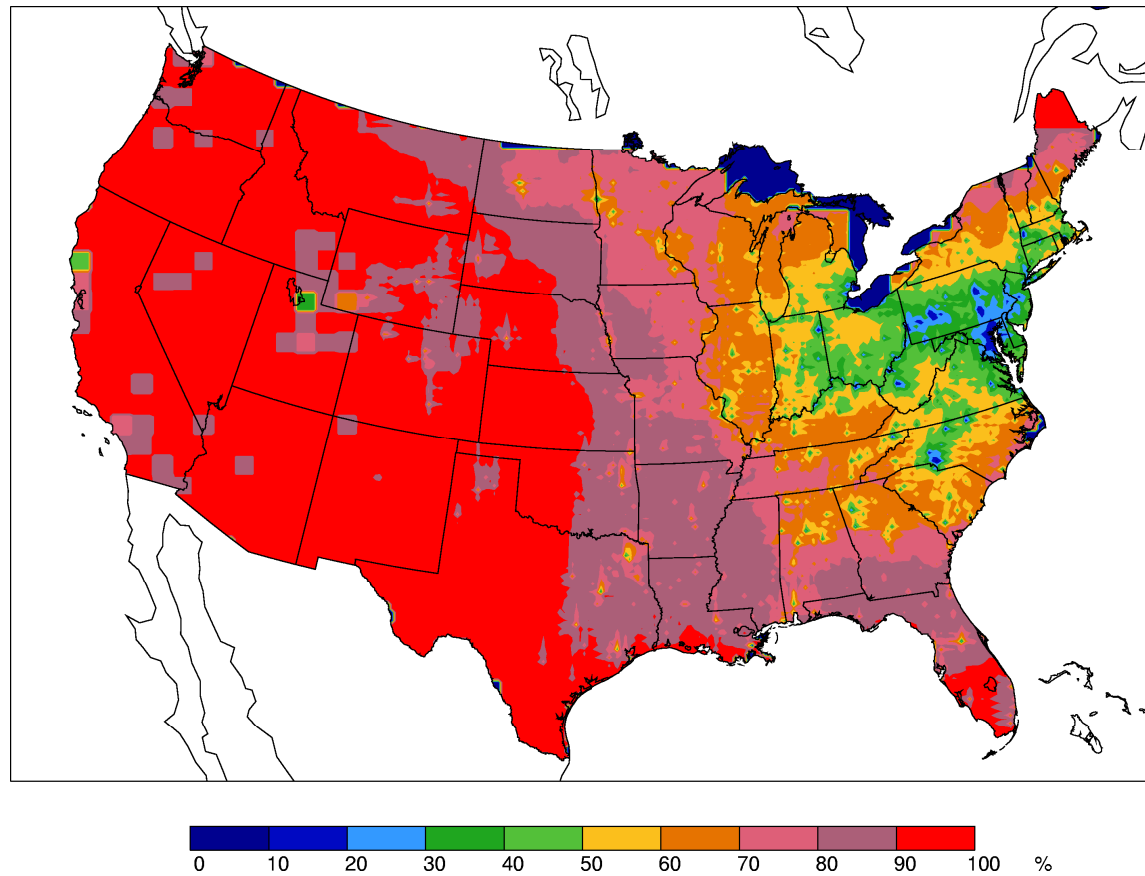
Erreur = 3%



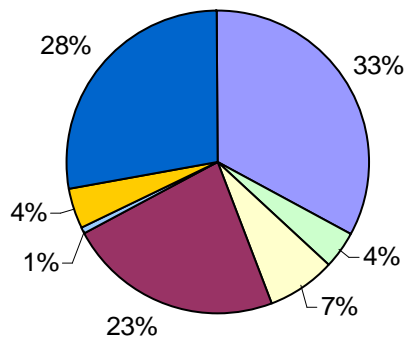
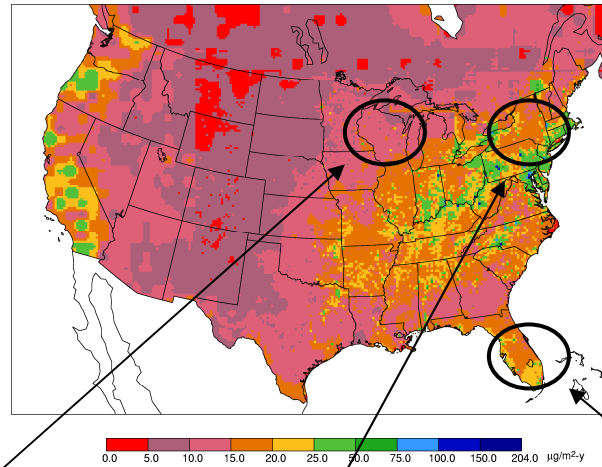
Calcul de la dose de mercure liée à la consommation de poissons



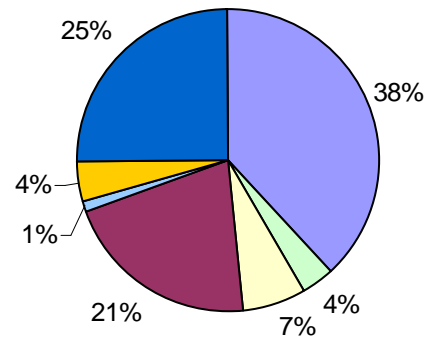
Contribution des sources naturelles et autres que celles d'Amérique du Nord aux dépôts de mercure aux États-Unis



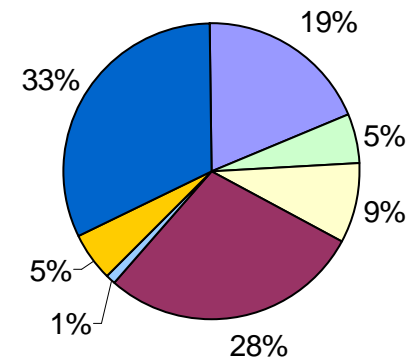
Contributions aux dépôts de mercure aux États-Unis



Wisconsin



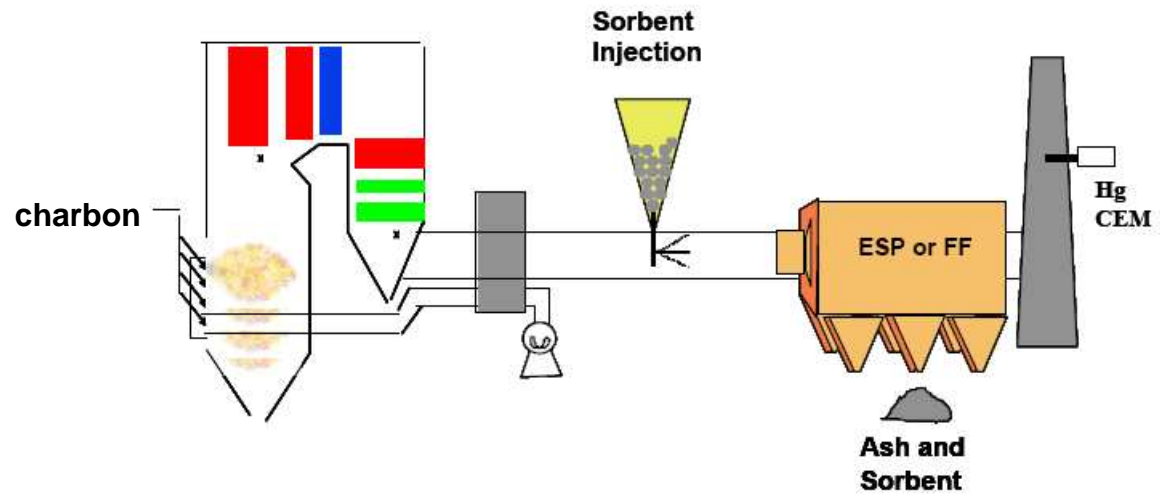
New York



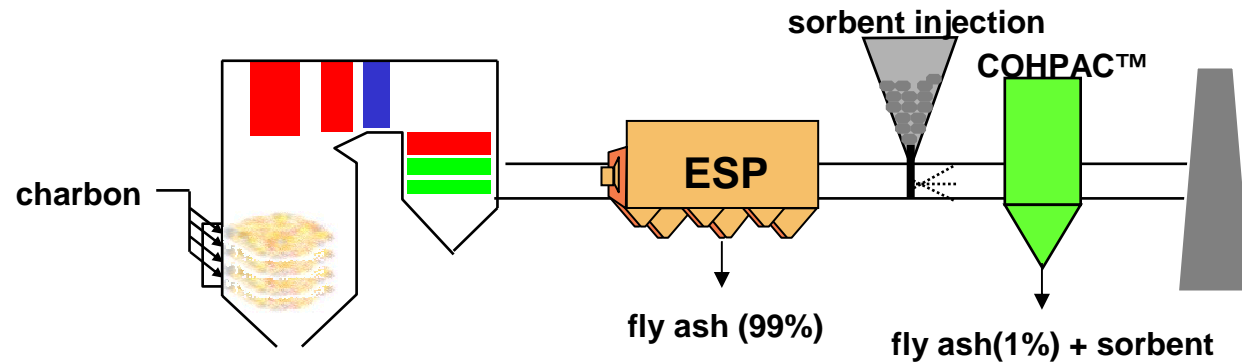
Floride



Réduction des émissions de mercure

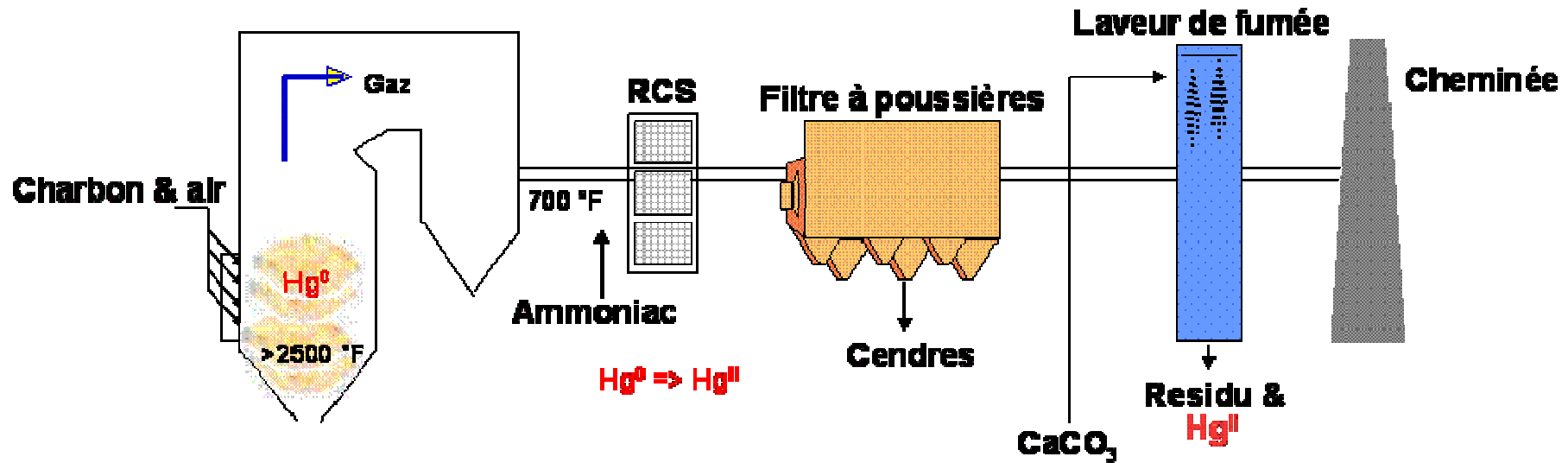


Réduction de façon directe :
Injection de charbon actif



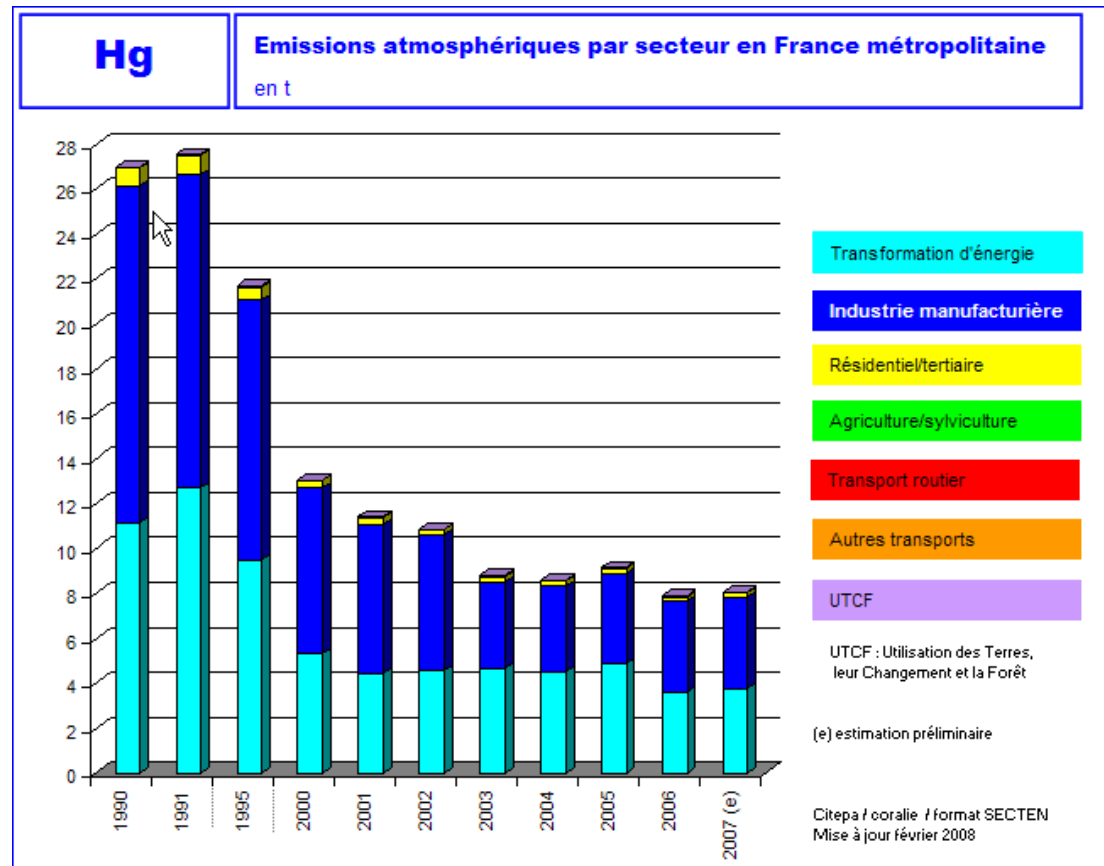
Réduction des émissions de mercure

Réduction de façon indirecte à travers les réductions de NO_x et de SO_2



Les systèmes d'abattement des émissions de NO_x (réduction catalytique sélective) et de SO_2 (laveur de fumées) diminuent les émissions de mercure

Les émissions de mercure en France



Source : CITEPA

Comparaison entre les pluies acides et le mercure

“Sulfur dioxide is light, and travels long distances: power plants in the Midwest can cause acid rain in Maine. So a cap on total national emissions makes sense. Mercury is heavy: much of it precipitates to the ground near the source.”

Editorial du New York Times (6 avril 2004) de Paul Krugman (Prix Nobel d'économie 2008)

Comparaison entre les pluies acides et le mercure

“Sulfur dioxide is light, and travels long distances: power plants in the Midwest can cause acid rain in Maine. So a cap on total national emissions makes sense. Mercury is heavy: much of it precipitates to the ground near the source.”

Editorial du New York Times (6 avril 2004) de Paul Krugman (Prix Nobel d'économie 2008)

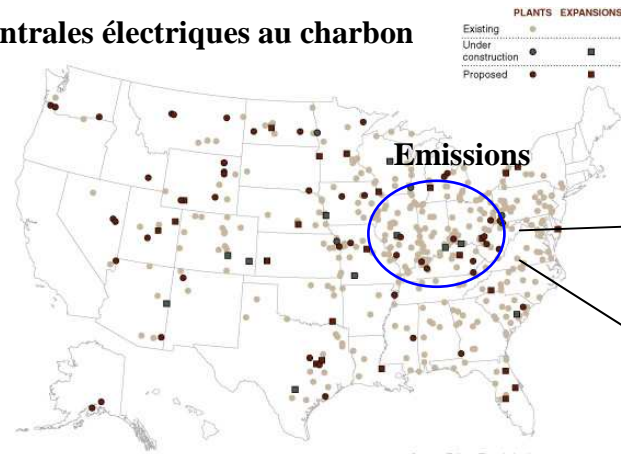
Cet argument est faux. Les dépôts des polluants traces atmosphériques ne dépendent pas de leur masse volumique mais de leurs propriétés physico-chimiques (solubilité, réactivité). Dans le cas du sulfate et du mercure, les vitesses de dépôt décroissent ainsi :

Dépôts secs : Mercure oxydé > Dioxyde de soufre > Sulfate > Mercure élémentaire
(HgCl₂) (SO₂) (H₂SO₄) (Hg⁰)

Dépôts humides : Mercure oxydé et sulfate > Dioxyde de soufre >> Mercure élémentaire
(HgCl₂) (H₂SO₄) (SO₂) (Hg⁰)

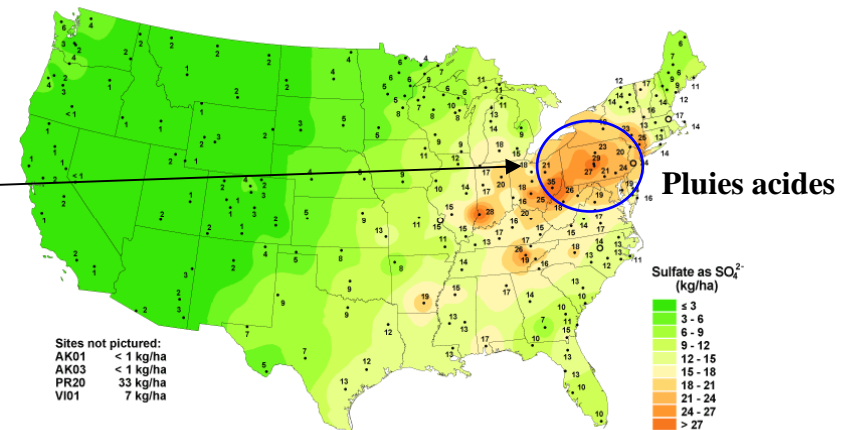
Comparaison entre les pluies acides et le mercure

Centrales électriques au charbon



Source: Edison Electric Institute, company reports

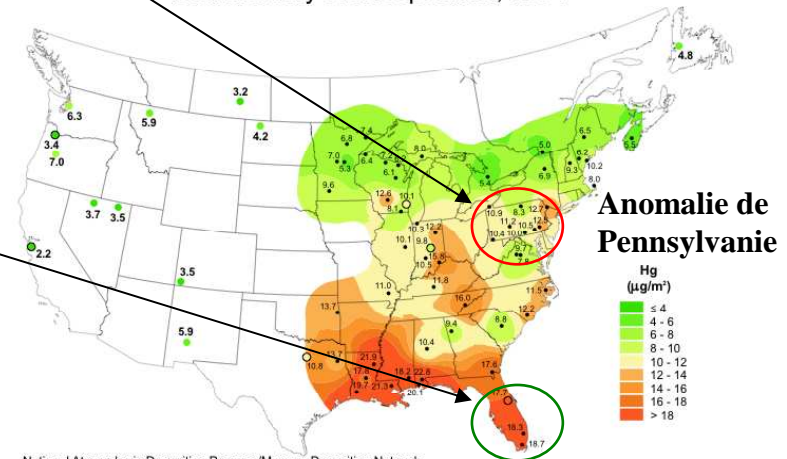
Sulfate ion wet deposition, 2004



Sites not pictured:
AK01 < 1 kg/ha
AK03 < 1 kg/ha
PR20 33 kg/ha
VI01 7 kg/ha

National Atmospheric Deposition Program/National Trends Network
<http://nadp.sws.uiuc.edu>

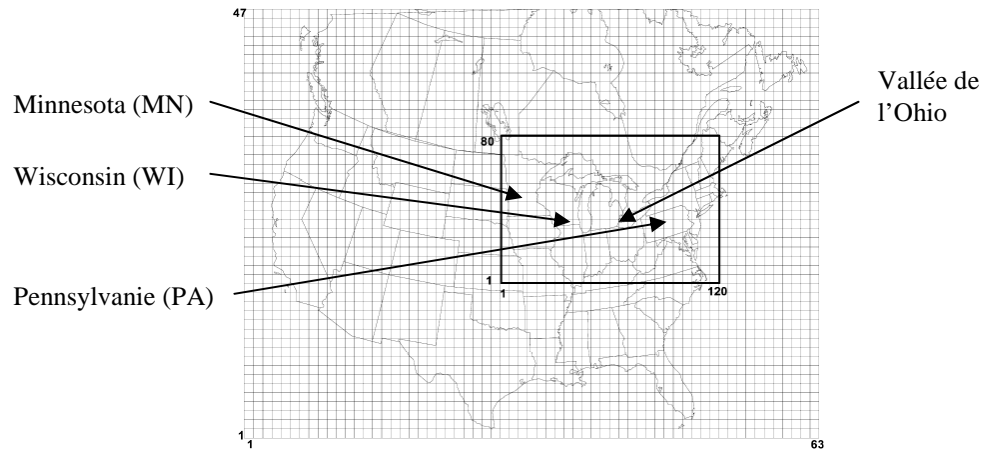
Total Mercury Wet Deposition, 2004



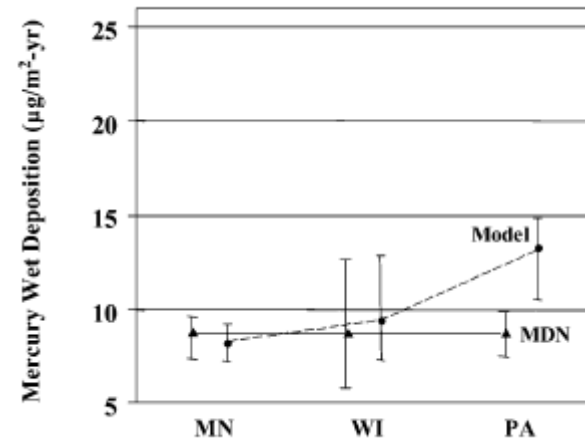
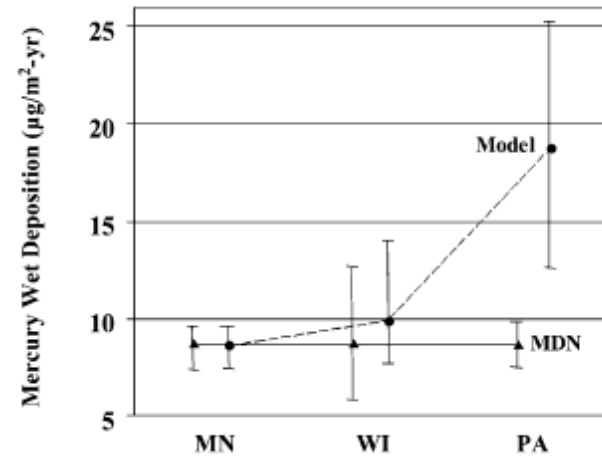
National Atmospheric Deposition Program/Mercury Deposition Network

Les dépôts de mercure les plus importants ont lieu en Floride

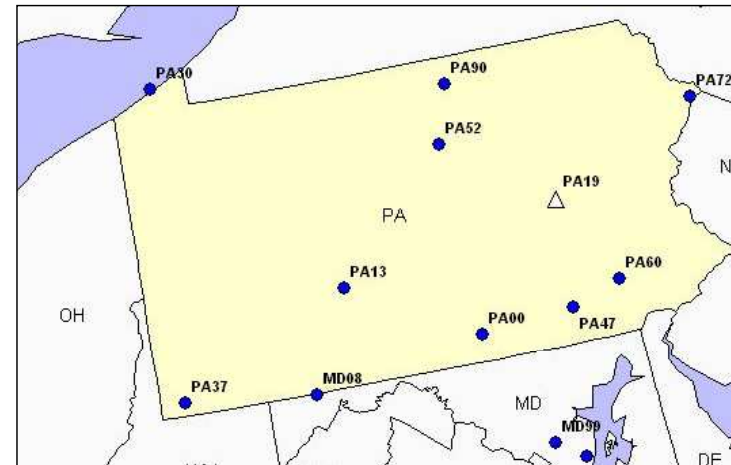
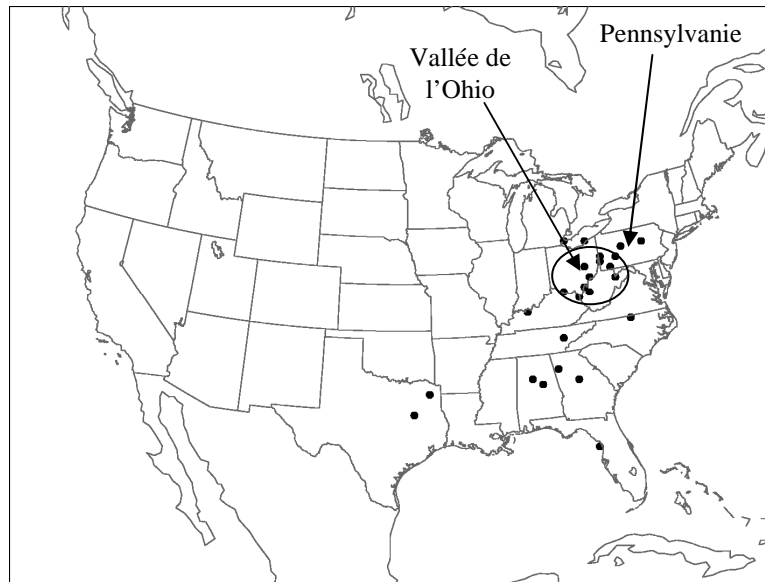
L'anomalie de Pennsylvanie



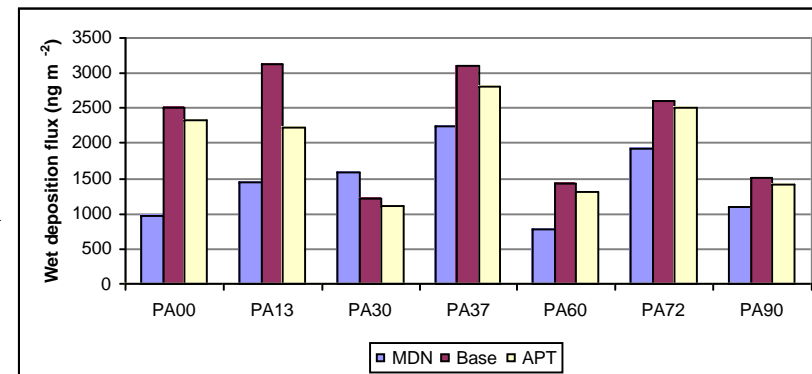
Moins d' HgCl_2 dans les émissions et plus de Hg^0 pourrait expliquer les « faibles » dépôts en Pennsylvanie



L'anomalie de Pennsylvanie

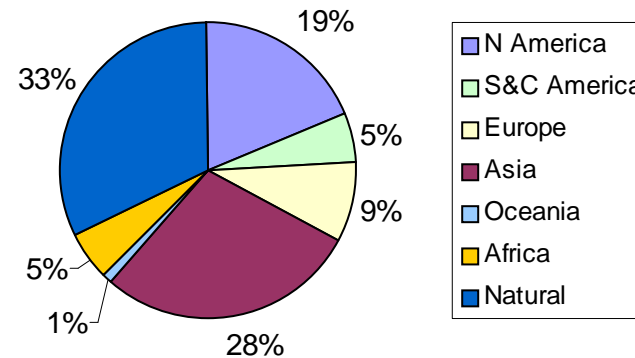


Une réaction chimique dans les panaches des centrales électriques pourrait aussi expliquer la surestimation des dépôts de mercure en Pennsylvanie



Les dépôts de mercure en Floride

- Les pluies tropicales ont lieu en été
- Les tempêtes tropicales lessivent une grande partie de la troposphère
- Le mercure élémentaire est un polluant global
- L'oxydation du mercure élémentaire est plus rapide en été
- Le mercure soluble peut donc être lessivé de toute la troposphère



Le mercure : de la science aux médias

- U.S. Geological Survey estime que 2/3 des rivières des États-Unis sont contaminées par le mercure

- U.S. Environmental Protection Agency estime que 40% des émissions de mercure anthropique aux États-Unis provient des centrales électriques à charbon



Le mercure : de la science aux médias

- U.S. Geological Survey estime que 2/3 des rivières des États-Unis sont contaminées par le mercure

- U.S. Environmental Protection Agency estime que 40% des émissions de mercure anthropique aux États-Unis provient des centrales électriques à charbon



Le mercure : de la science aux médias

- U.S. Geological Survey estime que 2/3 des rivières des États-Unis sont contaminées par le mercure



- U.S. Environmental Protection Agency estime que 40% des émissions de mercure anthropique aux États-Unis provient des centrales électriques à charbon



Le mercure : de la science aux médias

- U.S. Geological Survey estime que 2/3 des rivières des États-Unis sont contaminées par le mercure

X

Pollution de fond

?

- U.S. Environmental Protection Agency estime que 40% des émissions de mercure anthropique aux États-Unis provient des centrales électriques à charbon

The Economist August 29th 2009

Mercury in fish

Hold the sushi

NEW YORK

A pollution trail from the streams to the ocean

HERBERT HOOVER once described fishing as a "discipline in equality—for all men are equal before fish". The converse, unfortunately, is not true. After the release of a new government study that documents the prevalence of mercury in freshwater fish, American consumers are aware that all fish are not equal, or at least not equally good to consume.

The new study was conducted by the US Geological Survey (USGS), a scientific agency run by the government. It found traces of methylmercury, a form of mercury that is readily absorbed, in every fish sampled in 294 streams across the country. In around a quarter of those fish, the amount of mercury was above the level set by the Environmental Protection Agency (EPA) as safe for human consumption. Mercury levels at more than two-thirds of the sites exceeded what scientists believe fish-eating mammals, such as mink and otters, should ingest.

The leading source of mercury is pollution from coal-burning power plants, which accounts for 40% of all domestic anthropogenic mercury, according to the EPA. It is emitted through smokestacks and deposited in rain and snow, often making its way into the water. Mercury can be toxic, and adult exposure to it can lead to reproductive problems, memory loss and tremors. Prenatal and infant exposure can cause mental retardation, deafness and blindness. The National Research Council, an organisation that looks at science and public policy, estimates that more than 60,000 children are born each year at risk of learning disabilities because they have been exposed to methylmercury in the womb.

The fish lobby points out that the USGS findings do not necessarily damn the commercial fish industry, as most of the fish people eat comes from the ocean and not from freshwater streams. But mercury levels are high in marine fish, too—particularly in larger species, such as shark, tuna and swordfish. Mercury accumulates as it works its way up the food chain. A report released earlier this year by Harvard and the USGS forecasts that mercury levels in the Pacific Ocean will rise by 50% by 2050 as emissions from coal-fired power plants increase.

Consumers are now trying to understand how the USGS study's findings should influence their eating habits. One popular national news programme displayed slices of raw fish on air and asked a health expert go through which ones were safe to consume. This shows the need for clearer guidance from the EPA and the Food and Drug Administration (FDA) on fish consumption by pregnant women, says Richard Wiles of the Environmental Working Group, which keeps an eye on toxins in food. He says the FDA has "historically been in the pocket of the tuna industry", and has failed to give specific directives about how to get the health benefits of fish while avoiding mercury.

The news about mercury also underscores the importance of developing a federal policy to control emissions. The Bush administration's proposed cap-and-trade policy, which would have allowed heavily polluting factories to buy emission rights from cleaner ones, was struck down in court last year. That leaves Barack Obama responsible for suggesting a more aggressive curb on mercury emissions—for the good of America's fish and those who eat them.

Les dépôts atmosphériques vus des sources

- **Combustion** : NO_x (ozone, pluies acides, eutrophisation), COV (ozone), certains POPs (HAP, dioxines, furannes)
- **Combustion de charbon et de fioul** : SO_2 (pluies acides), NO_x (ozone, pluies acides, eutrophisation) et mercure (contamination des poissons)
- **Incinération des déchets** : POPs, mercure, HCl, métaux lourds
- **Sidérurgie** : Métaux lourds, SO_2 (pluies acides), mercure
- **Agriculture** : Pesticides (POPs) et produits azotés des engrais et de l'élevage (eutrophisation)

L'avenir des dépôts de polluants atmosphériques ?

Certains polluants peuvent être tout simplement éliminés (pesticides, plomb tétraéthyle)

Des technologies de dépollution peuvent être utilisées pour réduire les émissions dues aux produits de combustion (NO_x , SO_x , POPs, mercure)

La surveillance des concentrations dans l'atmosphère et dans les milieux sensibles (lacs, forêts) est nécessaire pour évaluer l'impact des politiques de dépollution et anticiper les nouvelles pollutions éventuelles

