
Cours VET

« Environnement atmosphérique et qualité de l'air »

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

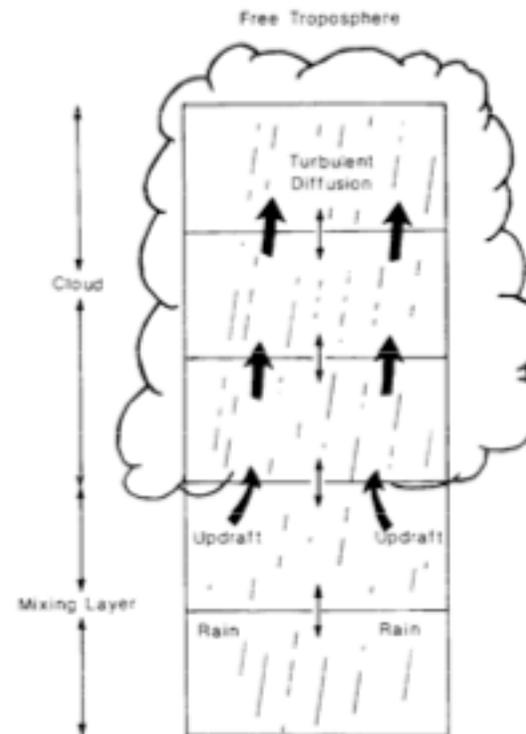
- Les deux phénomènes fondamentaux sont
 - La capture par les gouttes de pluie de polluants gazeux ou particulaires dans le nuage : « rainout »
 - La capture par les gouttes de pluie de polluants gazeux ou particulaires lors de la précipitation sous le nuage : « washout »

Flux de dépôt humide

- Les méthodologies pour calculer le flux de dépôt humides :
 - 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) ou dissolution après coagulation entre particules et gouttes

Flux de dépôt humide : représentation explicite avec équilibre

- Équilibre (loi de Henry)

$$C_a = H C_g$$

où H est la constante de Henry du polluant en M/atm si C_a est en mole/l (M) et C_g en atm

- Pour un électrolyte, on utilise la constante de Henry effective afin de prendre en compte la dissociation ionique du composé dissout

$$C_a = H_e C_{g,eq}$$

où H est la constante effective de Henry du polluant

Flux de dépôt humide :

représentation explicite du transfert de masse

- On calcule le flux de transfert, W , du polluant de la phase gazeuse vers la goutte

$$W(z, t) = k_m (C_g - C_{g,eq})$$

où k_m est la constante de transfert massique ($m s^{-1}$), C_g est la concentration du polluant dans l'air interstitiel et $C_{g,eq}$ est la concentration du polluant à la surface de la goutte (par conséquent, à l'équilibre avec la concentration dans la phase aqueuse de la goutte).

- Cette relation peut s'exprimer avec la constante de Henry pour lier la concentration de la phase aqueuse à celle de la phase gazeuse

$$W(z, t) = k_m (C_g - C_a/H)$$

Flux de dépôt humide :

représentation explicite du transfert de masse

- Le coefficient de transfert massique, k_m , peut être calculé à partir de la relation empirique suivante (Bird, Stewart et Lightfoot, Transport phenomena, 1960)

$$Sh = 2 + 0,6 Re^{1/2} Sc^{1/3}$$

Nombre de Sherwood :	$Sh = k_m d_p / D_g$	(transport total / diffusion)
Nombre de Reynolds :	$Re = (\rho_{air} v_p d_p) / \mu_{air}$	(convection / viscosité)
Nombre de Schmidt :	$Sc = \mu_{air} / (\rho_{air} D_g)$	(viscosité / diffusivité)

où :

d_p : diamètre de la goutte de pluie (m)

D_g : coefficient de diffusion du polluant dans l'air ($m^2 s^{-1}$)

ρ_{air} : masse volumique de l'air (kg/m^3)

v_p : vitesse de chute de la goutte de pluie ($m s^{-1}$)

μ_{air} : viscosité dynamique de l'air ($Pa s$; $kg s^{-1} m^{-1}$)

Flux de dépôt humide : exemples de coefficients de diffusion

	Coefficient de diffusion (cm ² /s)
Ozone	0,14
Dioxyde d'azote	0,14
Acide nitrique	0,12
Benzène	0,09
Toluène	0,07

Flux de dépôt humide :

exemples de coefficients de transfert massique

<i>Diamètre de la goutte</i>	<i>0,2 mm</i>	<i>2 mm</i>	<i>10 mm</i>	<i>20 mm</i>
Ozone	0,25 cm/s	0,14 cm/s	0,07 cm/s	0,05 cm/s
Dioxyde d'azote	0,25 cm/s	0,14 cm/s	0,07 cm/s	0,05 cm/s
Acide nitrique	0,22 cm/s	0,13 cm/s	0,06 cm/s	0,04 cm/s
Benzène	0,17 cm/s	0,10 cm/s	0,05 cm/s	0,04 cm/s
Toluène	0,16 cm/s	0,09 cm/s	0,05 cm/s	0,03 cm/s

Flux de dépôt humide : représentation explicite avec transfert de masse

- La concentration du polluant dans la goutte est :

$$d(C_a V_p) / dt = W S_p$$

V_p : volume de la goutte = $\pi d_p^3 / 6$

S_p : surface de la goutte = πd_p^2

- Si on fait l'hypothèse que le polluant est très soluble dans l'eau, dans une atmosphère polluée, on aura : $C_g \gg C_a / H$, et $W(z, t) = k_m C_g$

donc,

$$dC_a / dt = 6 k_m C_g / d_p$$

Flux de dépôt humide :

représentation explicite avec transfert de masse

- Si la hauteur entre le sol et la base du nuage est h , le temps de chute d'une goutte de pluie est :

$$t = h / v_p$$

Si la concentration du polluant est constante dans l'atmosphère avec l'altitude (hypothèse d'atmosphère bien mélangée), on peut intégrer et obtenir

$$C_a = (6 k_m C_g h) / (d_p v_p) + C_{a, n}$$

où $C_{a, n}$ est la concentration du polluant dans les gouttes de nuage (concentration initiale des gouttes de pluie)

Flux de dépôt humide :

représentation explicite avec transfert de masse

- On peut calculer le flux de dépôt humide, si l'on connaît l'intensité de la précipitation, I_p (m/s) :

$$F = I_p C_a$$

Faisant l'hypothèse que les gouttes de nuage ont une concentration initiale en polluant nulle (ou négligeable)

$$F = (6 k_m C_g h I_p) / (d_p v_p)$$

Flux de dépôt humide : coefficient de lessivage

- Le coefficient de lessivage, Λ , représente une perte de polluant avec une cinétique du premier ordre :

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

où $C_{g,0}$ est la concentration du polluant au début de l'épisode de précipitation

Flux de dépôt humide : coefficient de lessivage

- Le flux de dépôt humide peut être calculé en utilisant la hauteur de la masse d'air, h , qui est lessivée

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

En comparant avec la solution du modèle explicite, on obtient :

$$\Lambda = (6 k_m I_p) / (d_p v_p)$$

- Si la concentration du polluant n'est pas constante avec l'altitude, la solution générale est :

$$F(t) = \int_0^h C_g(z, t) \Lambda dz$$

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 : particules

- Le lessivage des particules s'effectue de plusieurs manières :

Dans le nuage :

- formation de gouttelettes à partir de particules (noyaux de nucléation d'Aitken)
- collision de particules avec les gouttes

Sous le nuage :

- lessivage par collision des particules avec les gouttes de pluie

Flux de dépôt humide : lessivage des particules

- Taux de collision des particules avec les gouttes de pluie sous le nuage (coefficient de lessivage) :

$$\Lambda = (\pi/4) (d_p + d_a)^2 (v_p - v_a) E(d_p, d_a) n_p$$

d_p : diamètre de la goutte de pluie

d_a : diamètre de la particule d'aérosols

v_p : vitesse de chute de la goutte de pluie

v_a : vitesse verticale de la particule

$E(d_p, d_a)$: efficacité de la collision entre la goutte et la particule (<1)

n_p : nombre de gouttes de pluie par volume d'air

Flux de dépôt humide : lessivage des particules

- On peut faire les hypothèses : $d_p \gg d_a$ et $v_p \gg v_a$

$$\Lambda = (\pi/4) d_p^2 v_p E(d_p, d_a) n_p$$

Le taux de précipitation est : $I_p = (\pi/6) d_p^3 v_p n_p$

Donc, $\Lambda = (3/2) I_p E(d_p, d_a) / d_p$

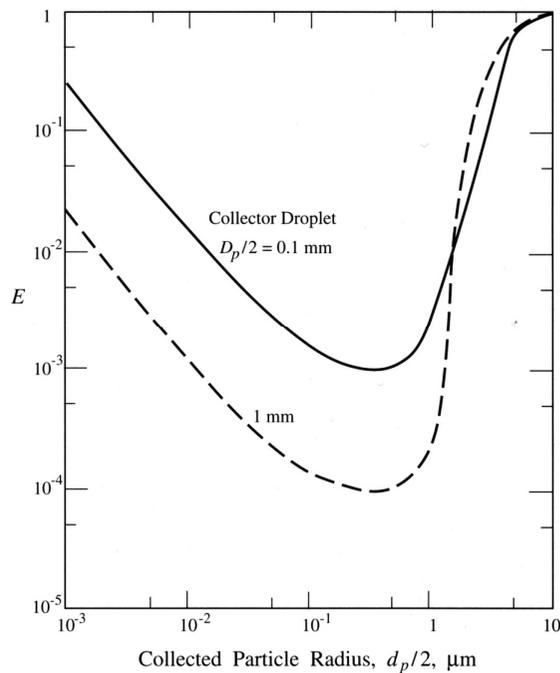
L'évolution de la concentration des particules dans l'atmosphère est :

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

où $C_{g,0}$ est la concentration des particules au début de l'épisode de précipitation

Flux de dépôt humide : coefficient de lessivage

Efficacité des collisions gouttes / particules



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

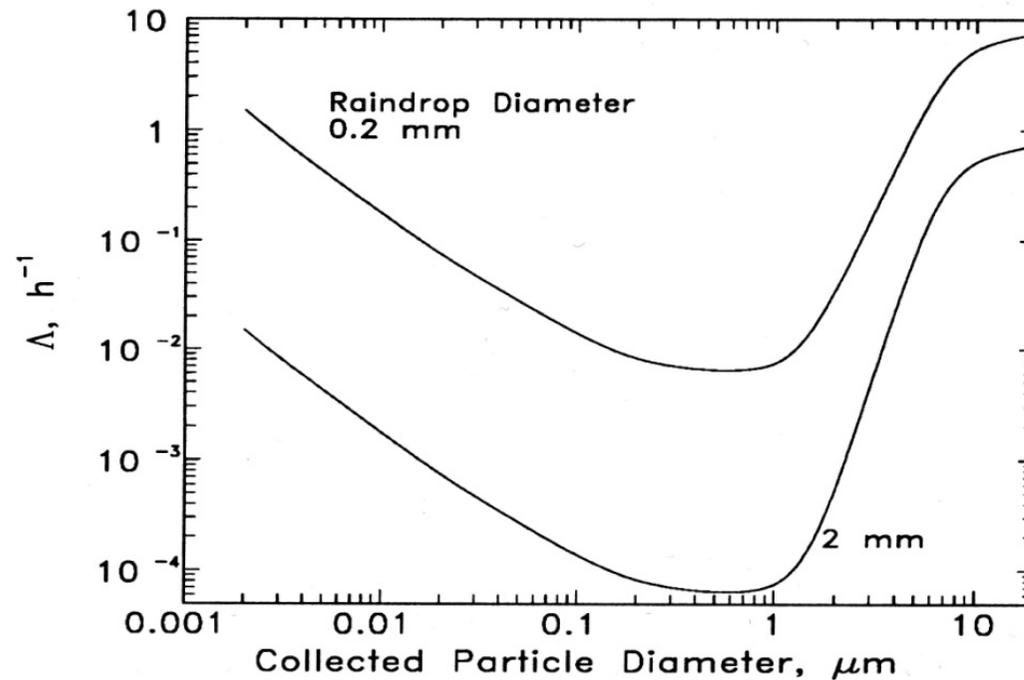
L'interception devient importante
pour les particules de diamètre entre
0,1 et 1 micron

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 (intensité de la pluie de 1 mm/h)



Flux de dépôt humide : formules empiriques

- Une relation entre la concentration d'un polluant dans la précipitation et la concentration du polluant dans l'air est parfois utilisée

$$\text{Rapport de lessivage} = C_p / C_g$$

ou C_p est la concentration du polluant dans les eaux de pluie par exemple et C_g la concentration dans l'air avant la pluie. Cette relation est cependant spécifique à l'évènement météorologique (une pluie d'orage tropical donnera un rapport de lessivage différent de celui d'une petite averse).

Flux de dépôt humide : formules empiriques

- Une relation entre le flux de dépôt humide du polluant et la concentration du polluant dans l'air est parfois utilisée pour définir une vitesse de dépôt humide :

$$V_w = F_w / C_g$$

ou F_w est le flux de dépôt humide du polluant et C_g la concentration dans l'air avant la pluie. Par conséquent, la vitesse de dépôt est reliée au rapport de lessivage :

$$\text{Rapport de lessivage} = V_w / I_p$$

où I_p est l'intensité de la précipitation (mm/heure). La vitesse de dépôt humide est spécifique à l'évènement météorologique.

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
 - Diverses formes de diffusion : 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.
- Quand le nombre de Reynolds est très faible ($Re \ll 1$) :

$$F_{St} = 3 \pi \mu_{air} d_p v_p / c_c$$

μ_{air} : viscosité dynamique de l'air

d_p : diamètre de la particule

v_p : vitesse de la particule dans le fluide

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

Pour les particules inférieures à 10 microns de diamètre, $Re < 2,5 \times 10^{-3}$

Sédimentation

- Quand le nombre de Reynolds est plus élevé, il faut prendre en compte le coefficient de traînée ($Re \gg 1$) :

$$F = \pi c_D \rho_p d_p^2 v_p^2 / (8 c_c)$$

ρ_p : masse volumétrique de la particule

d_p : diamètre de la particule

v_p : vitesse de la particule dans le fluide

c_D : facteur de traînée (fonction de la taille de la particule)

c_c : facteur de correction de Cunningham (fonction de la taille de la particule : 1,01 pour $d_p = 10 \mu\text{m}$, 1,16 pour $d_p = 1 \mu\text{m}$, 2,8 pour $d_p = 0,1 \mu\text{m}$ et 22 pour $d_p = 0,01 \mu\text{m}$)

Cette formule s'applique aux très grosses particules ($d_p > 50$ microns), par exemple aux gouttes de pluie ou de brouillard.

Sédimentation

- L'accélération d'une particule en mouvement dans l'atmosphère est gouvernée par la gravité et la résistance de l'air :

$$m_p \, dv_p/dt = m_p \, g - m_{\text{air}} \, g + F_{\text{St}}$$

$m_p \gg m_{\text{air}}$; donc, la poussée d'Archimède peut être négligée

$$m_p \, dv_p/dt = m_p \, g + F_{\text{St}}$$

- Quand la résistance de l'air compense la gravité, on déduit la vitesse de chute finale de la particule, v_p^f , à partir de la relation :

$$m_p \, g + F_{\text{St}}$$

Sédimentation

- Pour $Re \ll 1$

$$v_p^f = (m_p c_c g) / (3 \pi \mu_{\text{air}} d_p)$$

soit :

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

- Pour $Re \gg 1$

$$v_p^f = \{(4 \rho_p d_p c_c g) / (3 \rho_p c_D)\}^{1/2}$$

$c_D = \text{Fonction}(Re)$, où $Re = \rho d_p v_p / \mu_{\text{air}}$

Diffusion

- Diffusion turbulente : elle conduit la matière à proximité de la surface
- Diffusion en régime laminaire :
 - Gaz : diffusion moléculaire
 - Particules fines : diffusion brownienne, interception et impact par inertie

Dépôt à la surface

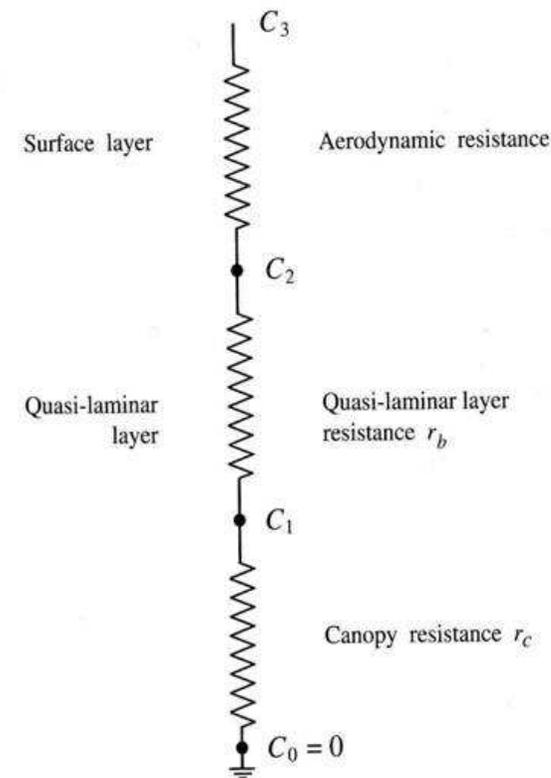
- Particules : On considère que la particule se dépose une fois en contact avec la surface, mais un coefficient de rebondissement peut être invoqué
- Gaz : La molécule de gaz se dépose soit par adsorption, absorption (par exemple dissolution dans un fluide) ou réaction avec la surface

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 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 :

$$F = \underset{\text{diffusion}}{K \frac{dC}{dz}} + \underset{\text{sédimentation}}{v_s C}$$

Le premier terme de droite correspond à l'expression précédente pour le dépôt sec par diffusion $F = K \frac{dC}{dz} = C / r$

En intégrant l'expression du flux : $C = F / v_s * (1 - \exp(-r v_s))$

Donc : $v_d = v_s / (1 - \exp(-r v_s))$

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

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

Méthodologie des résistances

Particules avec vitesse de sédimentation :

Une approximation est souvent effectuée en incorporant le flux de sédimentation dans la méthodologie des résistances (ce qui n'est pas correct car la sédimentation n'est pas gouvernée par un gradient de concentration)

$$F = (C_3 - C_2) / r_a + C_3 v_s = (C_2 - C_1) / r_b + C_2 v_s = (C_3 - C_1) / r_t$$

Pour les particules qui adhèrent parfaitement à la surface, $C_1 = 0$, on peut résoudre pour r_t en éliminant C_2 et C_3 :

$$v_d = \frac{1}{r_t} = \frac{1}{r_a + r_b + r_a r_b v_s} + v_s$$

Résistance aérodynamique

Le flux massique ou thermique dans la couche turbulente de l'atmosphère peut être exprimé en utilisant une fermeture de la turbulence au premier ordre :

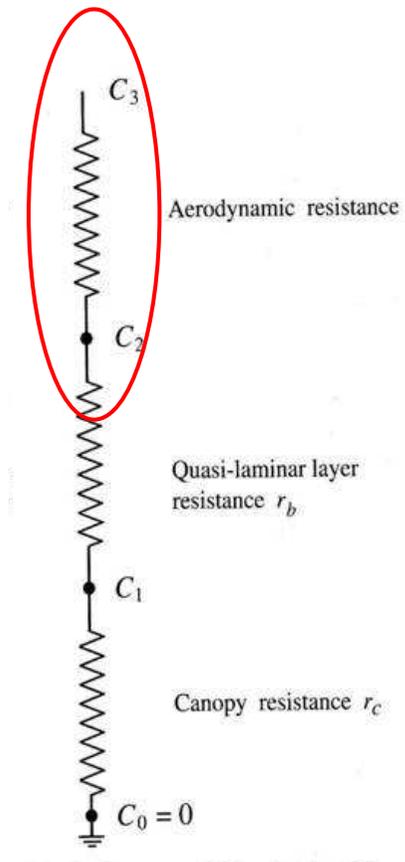
$$F_a = K \frac{\partial C}{\partial z} \quad F_a = K \frac{\partial T}{\partial z}$$

Le coefficient de diffusion peut être exprimé ainsi :

$$K_M = \frac{\kappa u_* z}{\phi_M(\zeta)} \quad K_T = \frac{\kappa u_* z}{\phi_T(\zeta)}$$

où :

- F_a – le flux massique ou thermique
- K – le coefficient de diffusion turbulente
- K_M – le coefficient de diffusion turbulente (moment)
- K_T – le coefficient de diffusion turbulente (chaleur)
- κ – la constante de von Karman
- u^* – la vitesse de friction
- ϕ_M, ϕ_T – les profils verticaux des fonctions de température et de moment
- ζ – la hauteur sans dimension, $= z / L$, L est la longueur de Monin-Obukhov



Résistance aérodynamique

Donc :

$$F_a = (C_3 - C_2) \left(\int_{z_2}^{z_3} \frac{\phi(\zeta)}{\kappa u_* z} dz \right)^{-1}$$

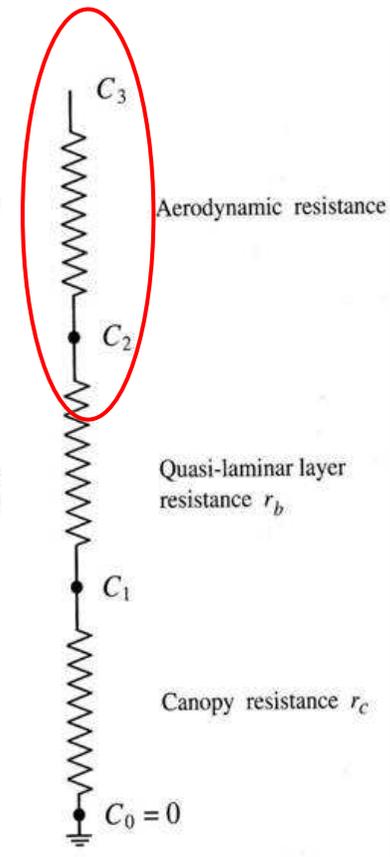
La formulation du flux en fonction de la résistance est :

$$F_a = \frac{C_3 - C_2}{r_a}$$
$$r_a = \left(\int_{z_2}^{z_3} \frac{\phi(\zeta)}{\kappa u_* z} dz \right)$$

On en déduit :

Les profils verticaux dépendent de la stabilité atmosphérique (formulation de Businger et al., 1971) :

$$\phi_T(\zeta) = \begin{cases} 1 + 4.7\zeta & \text{for } 0 < \zeta < 1 & \text{(stable)} \\ 1 & \text{for } \zeta = 0 & \text{(neutral)} \\ (1 - 15\zeta)^{-1/4} & \text{for } -1 < \zeta < 0 & \text{(unstable)} \end{cases}$$



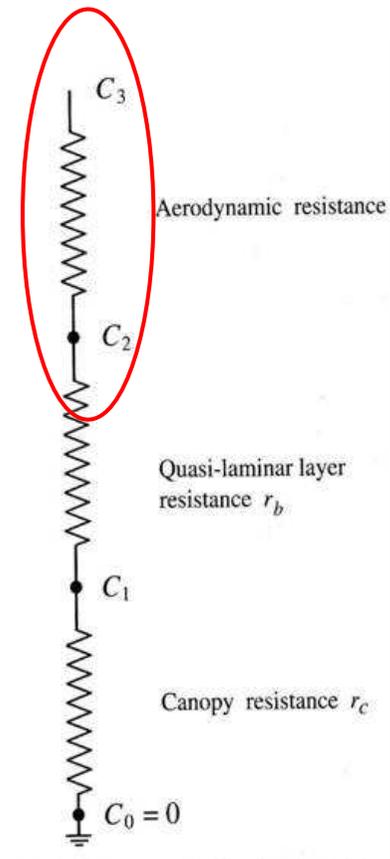
Résistance aérodynamique

La résistance aérodynamique peut être calculée :

$$r_a = \begin{cases} \frac{1}{\kappa u_*} \left[\ln\left(\frac{z}{z_0}\right) + 4.7(\zeta - \zeta_0) \right] & \text{Stable} \\ \frac{1}{\kappa u_*} \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) & \text{Neutre} \\ \frac{1}{\kappa u_*} \left[\ln\left(\frac{z}{z_0}\right) + \ln\left(\frac{(\eta_0^2 + 1)(\eta_0 + 1)^2}{(\eta_r^2 + 1)(\eta_r + 1)^2}\right) + 2(\tan^{-1}\eta_r - \tan^{-1}\eta_0) \right] & \text{Instable} \end{cases}$$

$$\eta_0 = (1 - 15\zeta_0)^{1/4}, \quad \eta_r = (1 - 15\zeta_r)^{1/4}, \quad \zeta_0 = z_0/L.$$

Cette équation ne s'applique que dans la couche de surface (< 100 m) avec une hauteur de référence de quelques mètres seulement, avec terrain plat et ouvert.



Résistance quasi-laminaire

Le flux massique dans la couche quasi-laminaire en contact avec la surface peut être exprimé en fonction de la résistance :

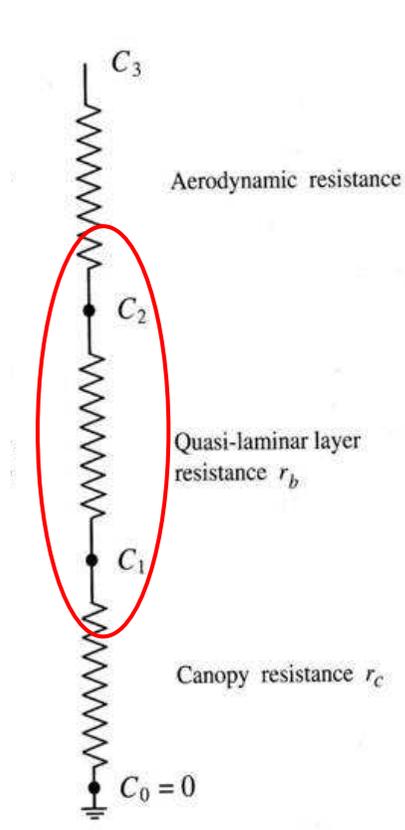
$$F_b = \frac{C_2 - C_1}{r_b}$$

Pour les gaz :

$$r_b = \frac{5S_c^{2/3}}{u_*} \quad Sc = \frac{\nu}{D}$$

où :

- F_b – le flux massique
- u^* – la vitesse de friction
- Sc – le nombre de Schmidt (advection / diffusion)
- ν – la viscosité cinématique de l'air
- D – la diffusivité moléculaire du gaz



Résistance quasi-laminaire

Pour les particules :

$$r_b = \frac{1}{\varepsilon_0 u_* (E_B + E_{IM} + E_{IN}) R_1}$$

où :

E_B – efficacité de dépôt par diffusion brownienne

E_{IM} – efficacité de dépôt par impact dû à l'inertie de la particule

E_{IN} – efficacité de dépôt par interception

R_1 – un facteur correctif représentant la fraction des particules qui adhèrent à la surface

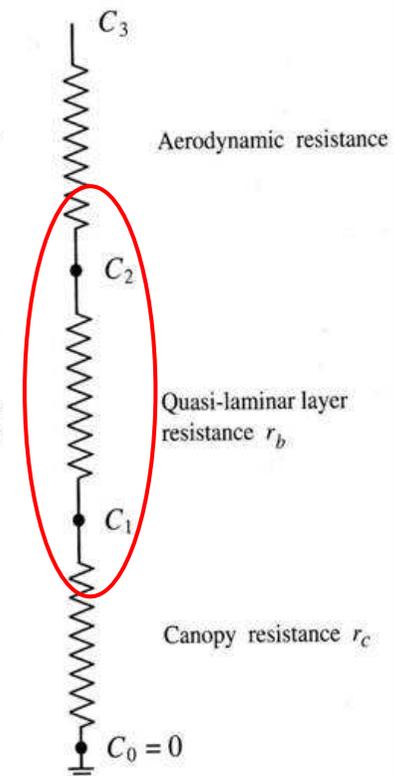
$$E_B = Sc^{-\gamma}, \quad E_{IM} = \left(\frac{St}{\alpha + St}\right)^\beta, \quad E_{IN} = \frac{1}{2} \left(\frac{D_p}{A}\right)^2,$$

St – le nombre de Stokes (une caractéristique de la particule et de l'écoulement, plus la particule est petite, plus le nombre de Stokes est petit et la particule adopte le mouvement de l'écoulement)

$\alpha, \beta, \gamma, \varepsilon_0$ – des paramètres judicieusement choisis

D_p – le diamètre de la particule

A – la dimension caractéristique du récepteur (feuilles...)



Résistance surfacique

Pour les particules, elle est zéro.

Pour les gaz, elle dépend du type de surface :

$$F_c = \frac{C_1 - C_0}{r_c}$$

Pour les eaux de surface : $r_c = r_{cw}$

Pour les sols nus : $r_c = r_{cs}$

Pour les sols avec végétation $\frac{1}{r_c} = \frac{1}{r_{cf}} + \frac{1}{r_{cs}}$

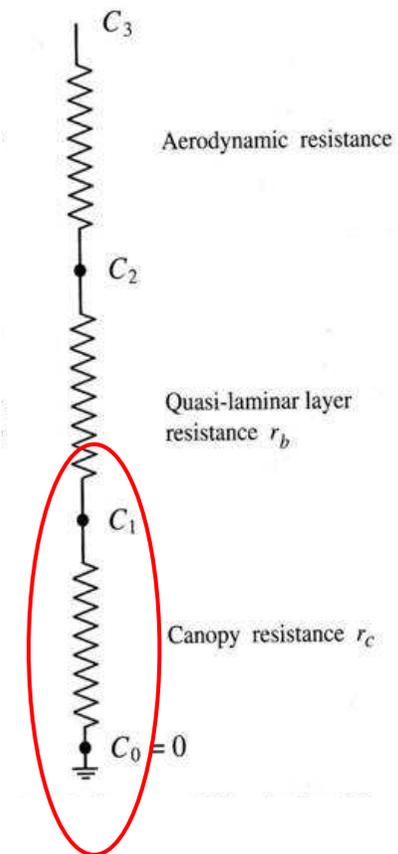
$$r_{cf} = \left(\frac{1}{r_{cut}} + \frac{1}{r_{st}} \right)^{-1} (LAI)^{-1}$$

où : r_{cf} – résistance foliaire (due au feuillage)

LAI – “leaf area index”, un paramètre qui représente la densité du feuillage : le rapport de la surface totale du feuillage et de la surface du sol

r_{cut} – la résistance due au cuticule (l'épiderme de la feuille)

r_{st} – la résistance due au stomates (les pores de la feuille)



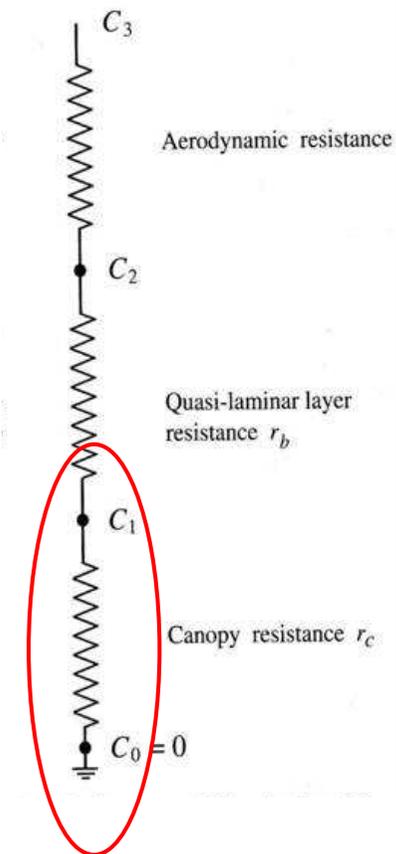
Résistance surfacique

La résistance due aux stomates est généralement plus faible que la résistance cuticulaire pendant la journée (les stomates se ferment la nuit). Cette résistance stomatale peut être décomposée en deux résistances en série :

$$r_{st} = r_s + r_m$$

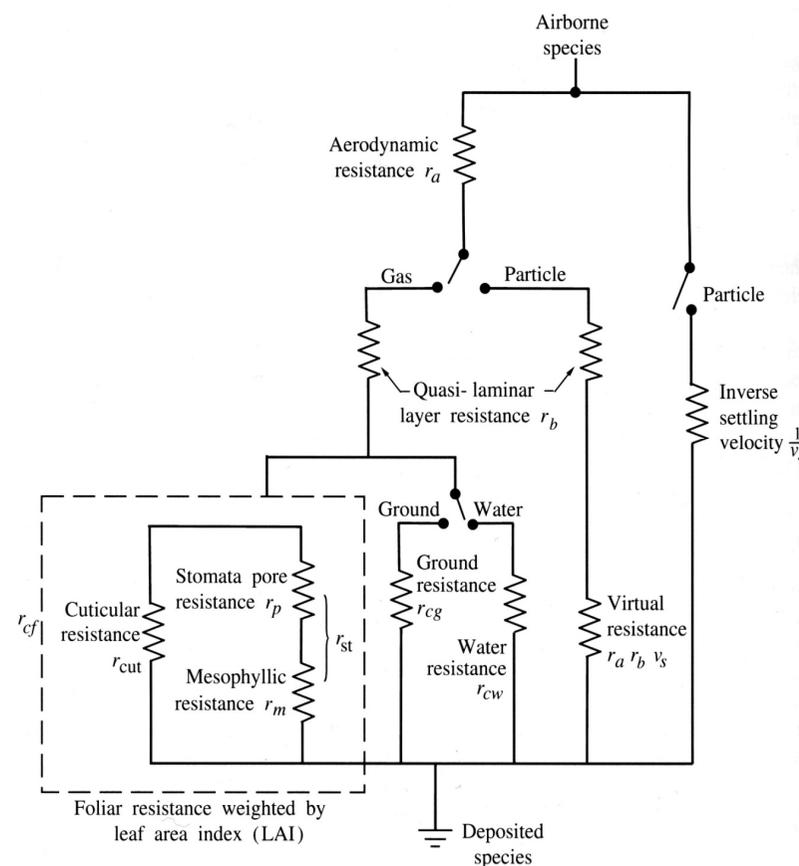
Où :
 r_s – la résistance initiale du stomate
 r_m – la résistance de la mésophyle (absorption du polluant dans le végétal)

La résistance stomatale dépend fortement du rayonnement et de la solubilité dans l'eau du polluant qui est déposé.



Méthodologie des résistances

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

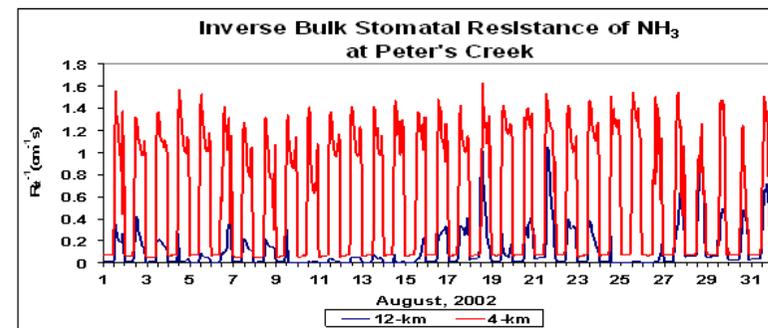
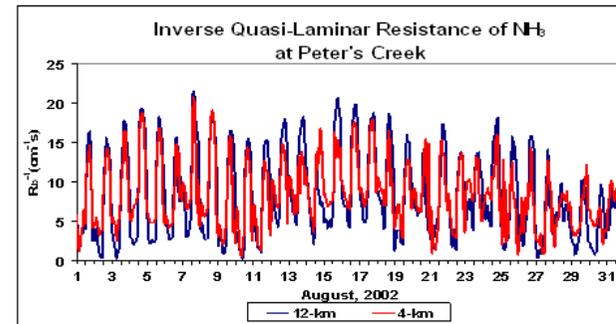
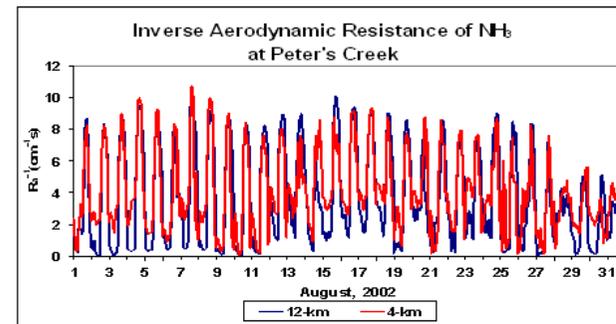


Exemple de résistances

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

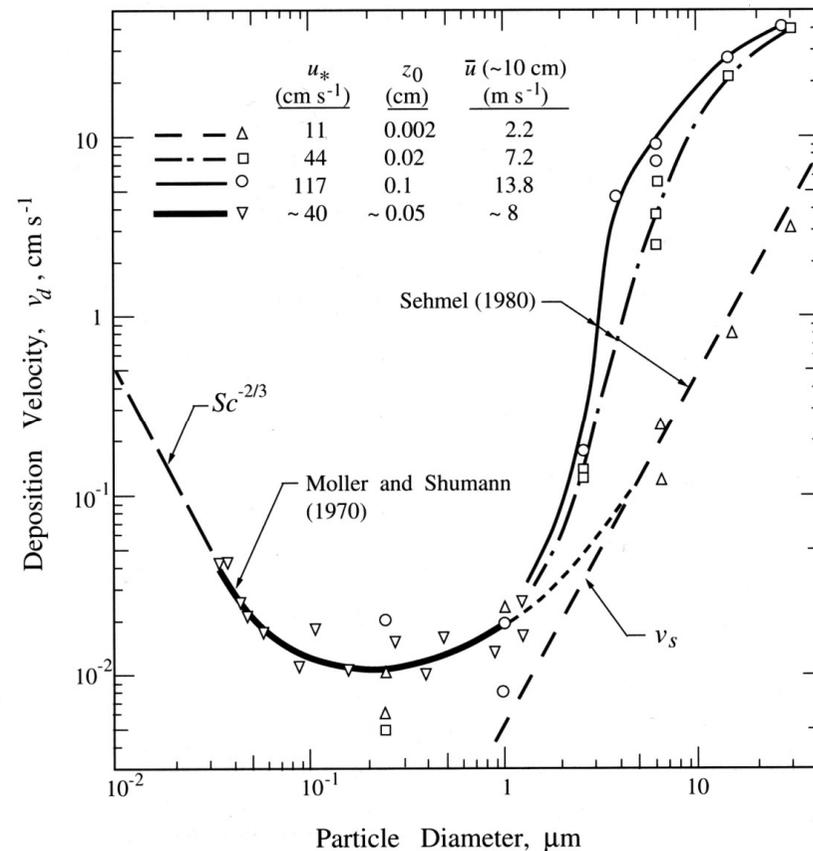
Species	v_d (cm s ⁻¹) Over		
	Continent	Ocean	Ice/Snow
CO	0.03	0	0
N ₂ O	0	0	0
NO	0.016	0.003	0.002
NO ₂	0.1	0.02	0.01
HNO ₃	4	1	0.5
O ₃	0.4	0.07	0.07
H ₂ O ₂	0.5	1	0.32

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 microns 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

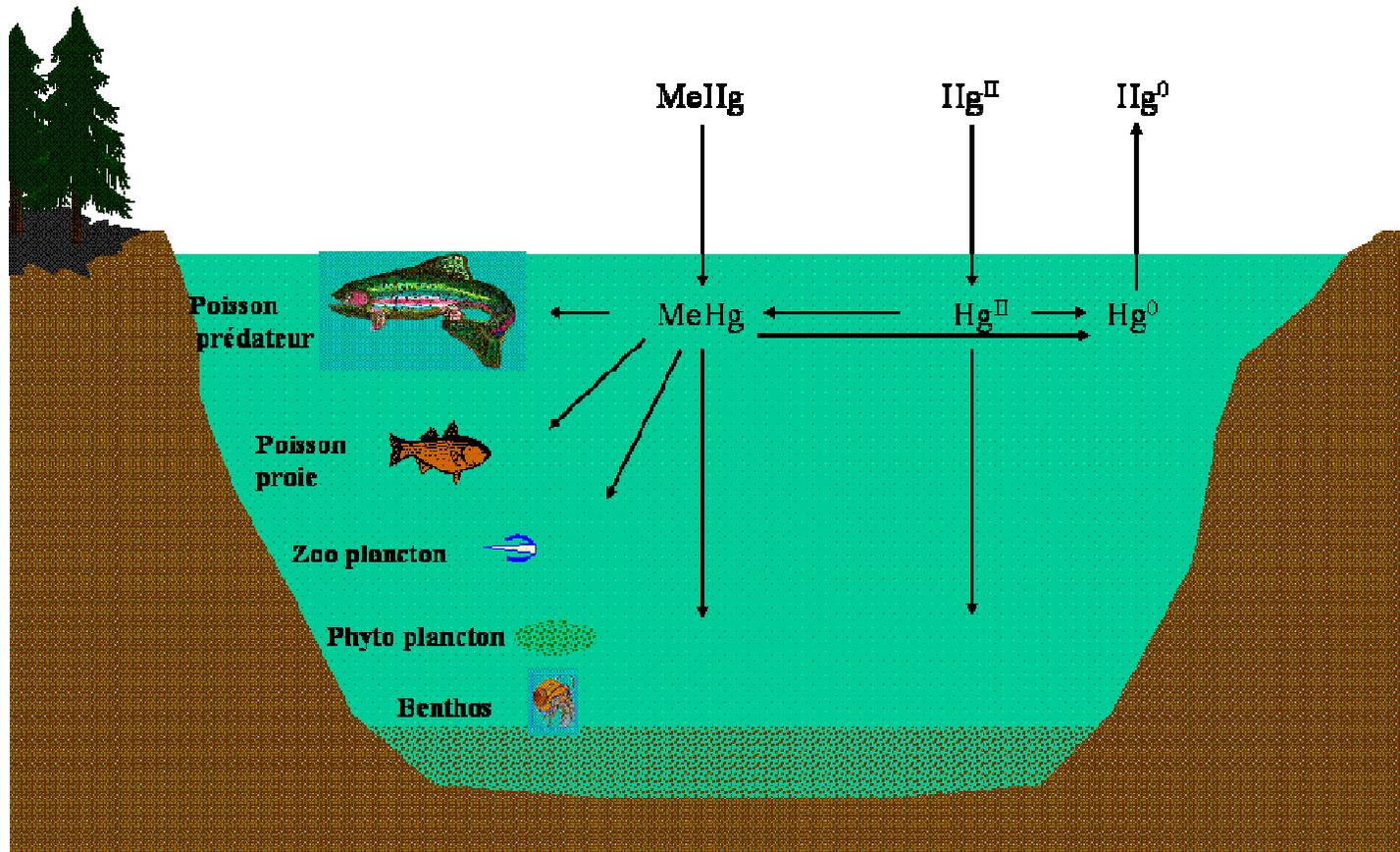
Deux grandes catégories de modèles

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.

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

où D_j est la dose journalière de mercure pour la personne ou l'animal consommant du poisson, CR est le taux de consommation de poisson et BW est le poids de la personne ou de l'animal.

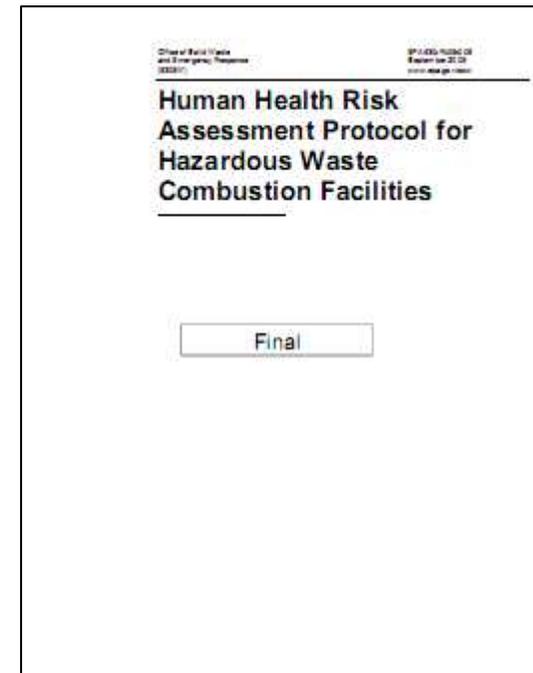
Modélisation multi-milieux

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)



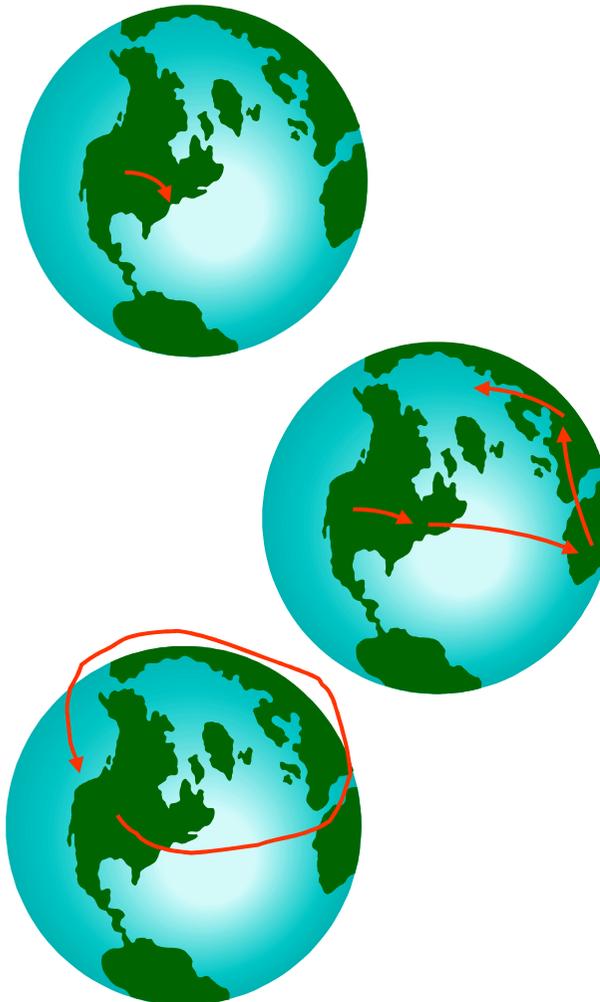
Impacts des dépôts atmosphériques

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

- 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



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

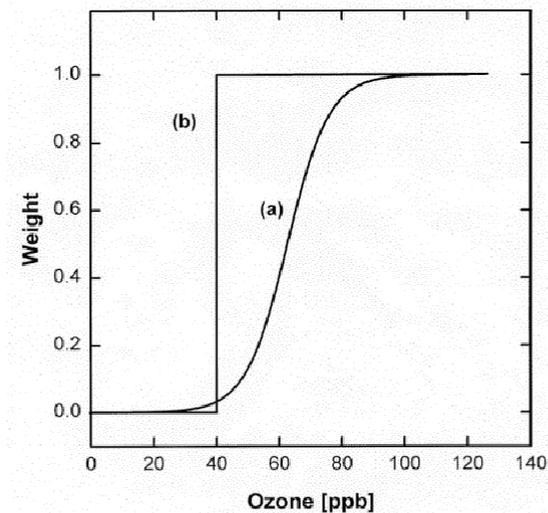
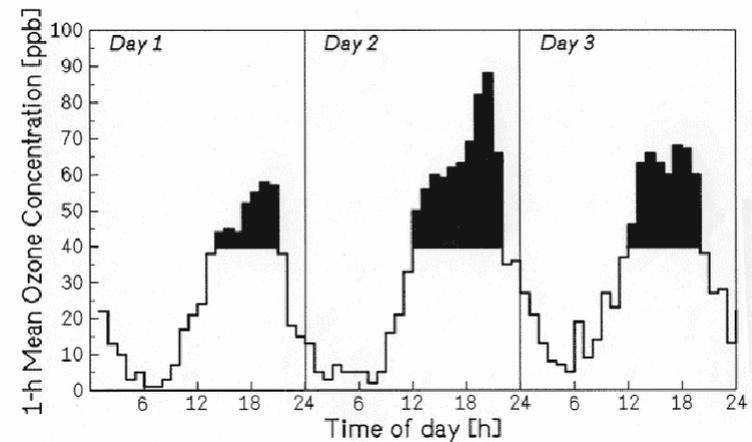


Dépôts d'ozone : impact sur la végétation

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 : 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

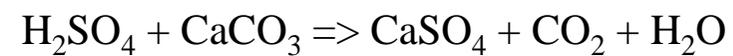


Acidification des lacs : perte de plancton, de certaines plantes et d'espèces de poissons

Les pluies acides : Effets sur le bâti

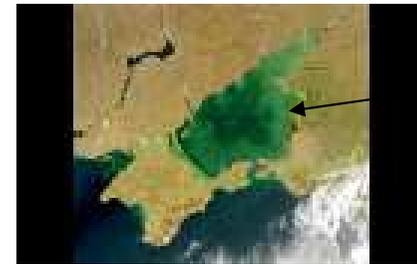


Effet d'érosion sur des pierres calcaires, du tuffeau et de certains marbres



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



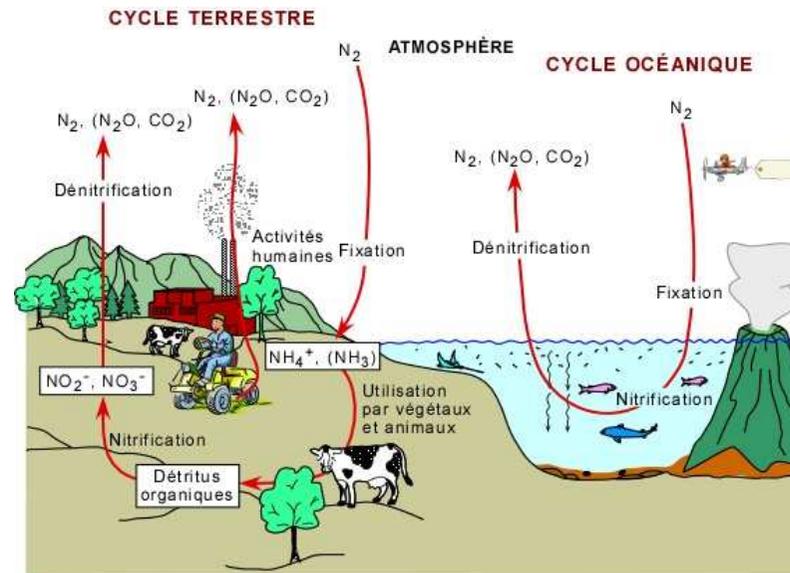
Mer d'Azov



Mer noire

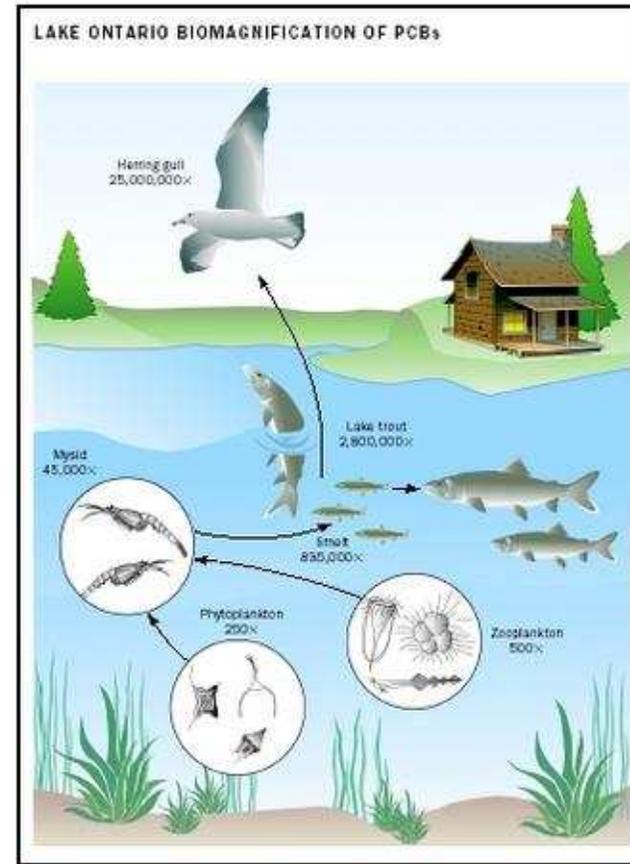
Eutrophisation : Dépôts d'espèces azotées

- 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)



Les polluants organiques persistants (POPs)

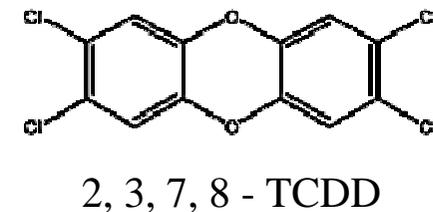
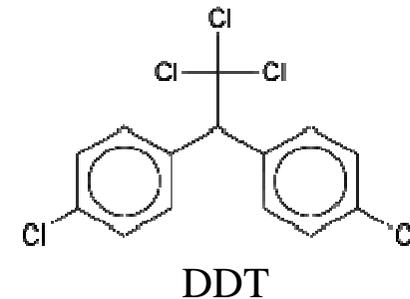
- Groupe de polluants organiques qui sont pour la plupart des composés cycliques (parfois aromatiques), contenant des atomes de chlore
- Ils ont tendance à s'accumuler dans la chaîne alimentaire, c'est-à-dire que leur concentration dans un organisme vivant augmente de plusieurs ordres de grandeur par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



Les polluants organiques persistants (POPs)

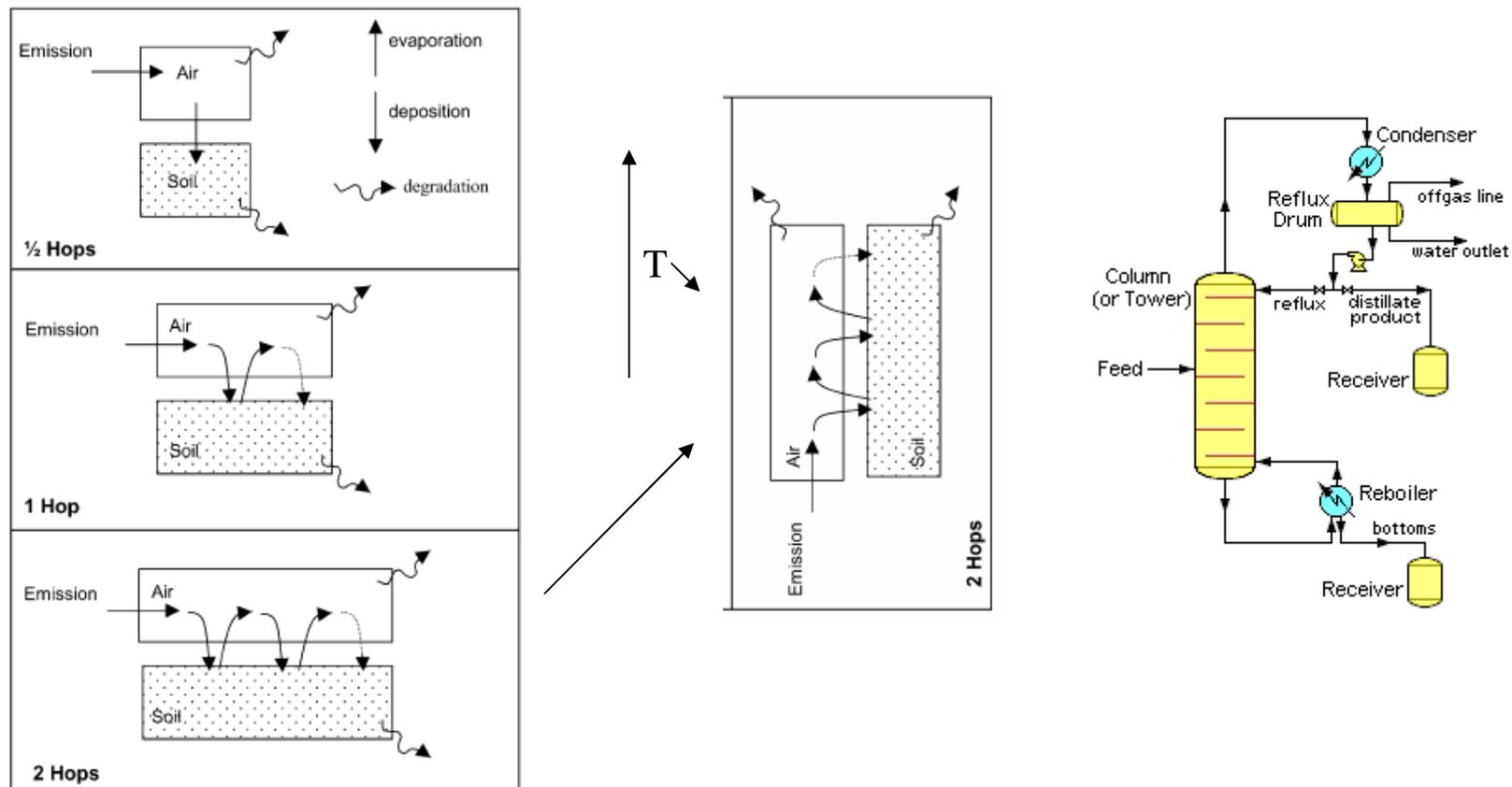
La convention de Stockholm a identifié douze POPs qui doivent être éliminés ou réduits de façon significative

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



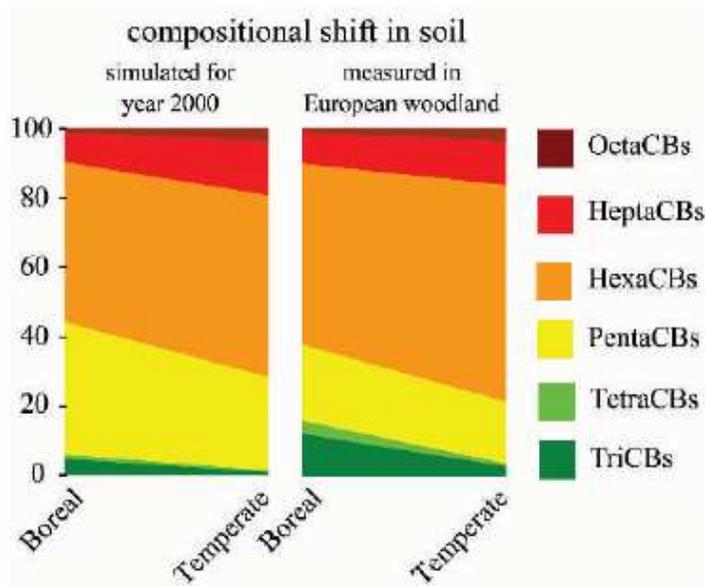
Autres POPs : Hexachlorocyclohexanes (e.g., lindane), hexabromobiphenyl, chlordecone, hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAPs), etc.

Les POPs : L'effet sauterelle

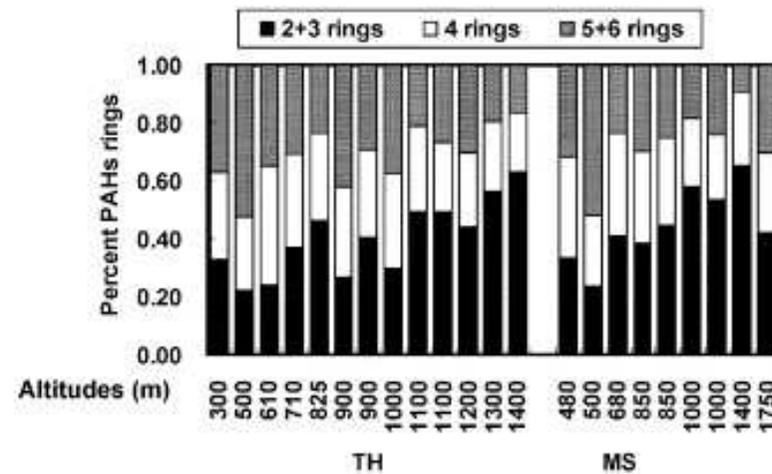


L'effet "sauterelle" est semblable à celui d'une colonne à distiller

Les POPs : L'effet sauterelle



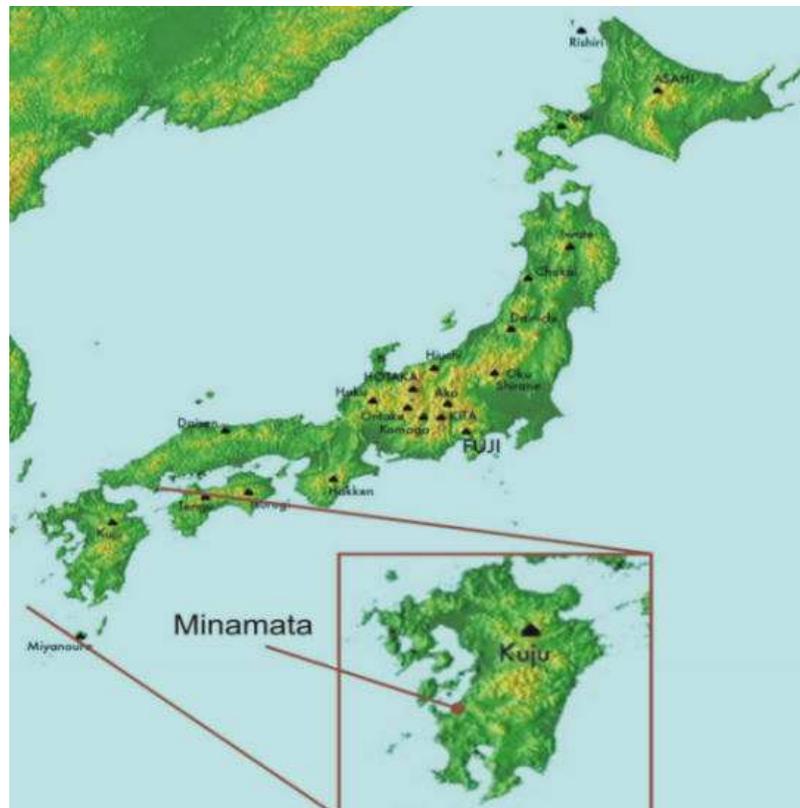
Distillation en fonction de la latitude de PCB au Royaume Uni et en Norvège (Source : Wania et Su, Ambio, 2004)



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

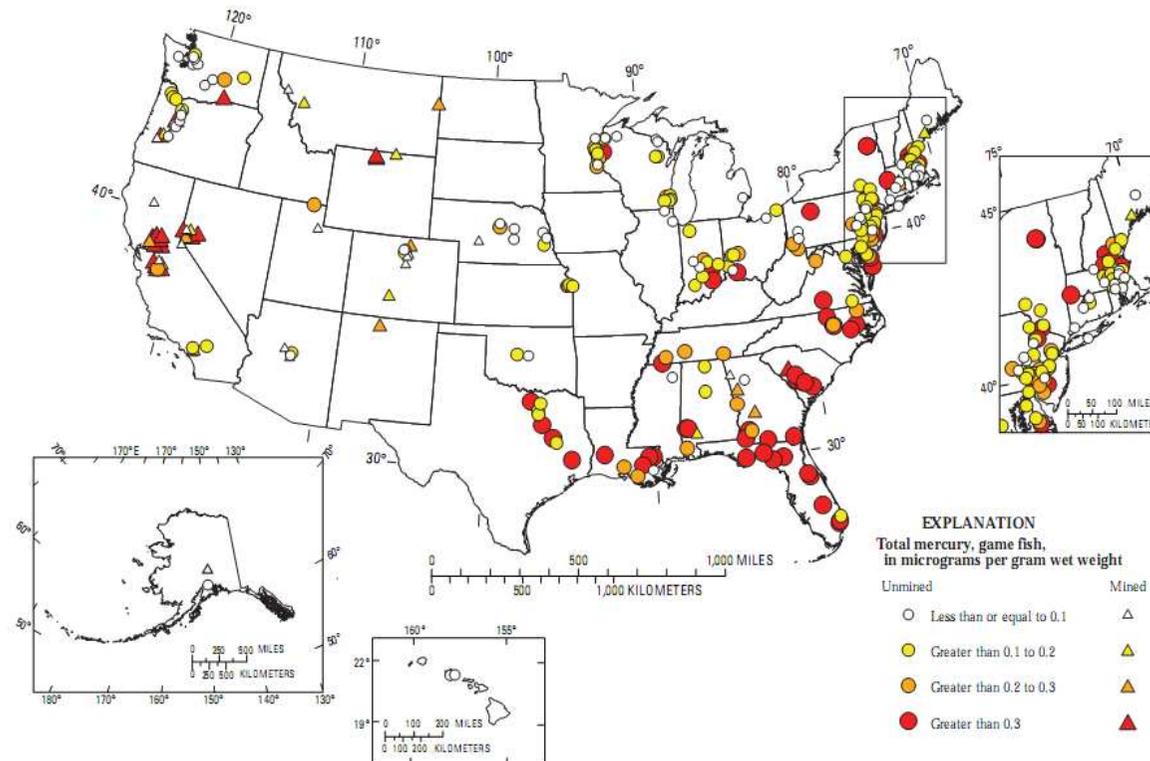
Le mercure

La catastrophe de Minamata



Source : W.E. Smith, 1971-1972

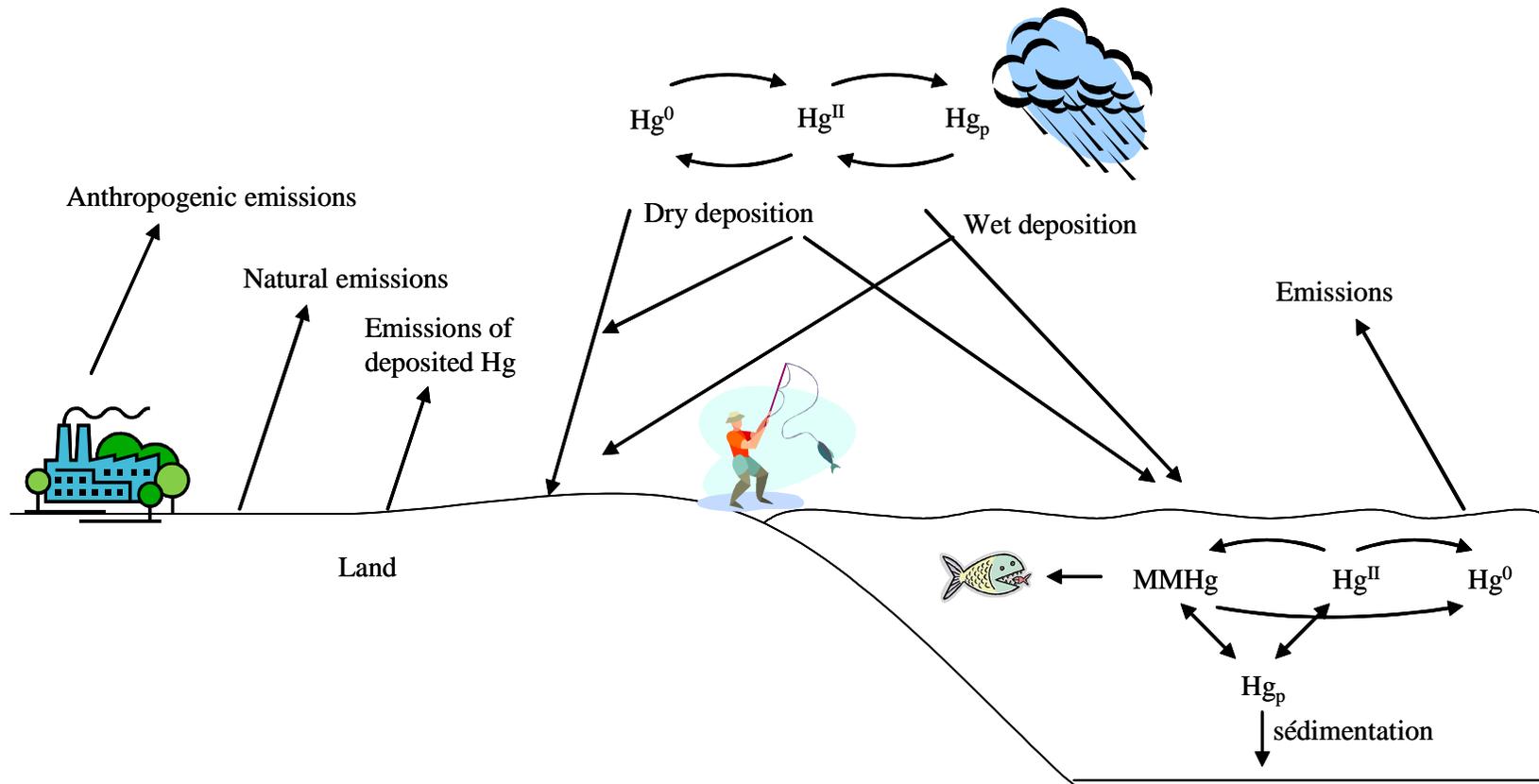
Contamination des eaux de surface par le mercure aux États Unis



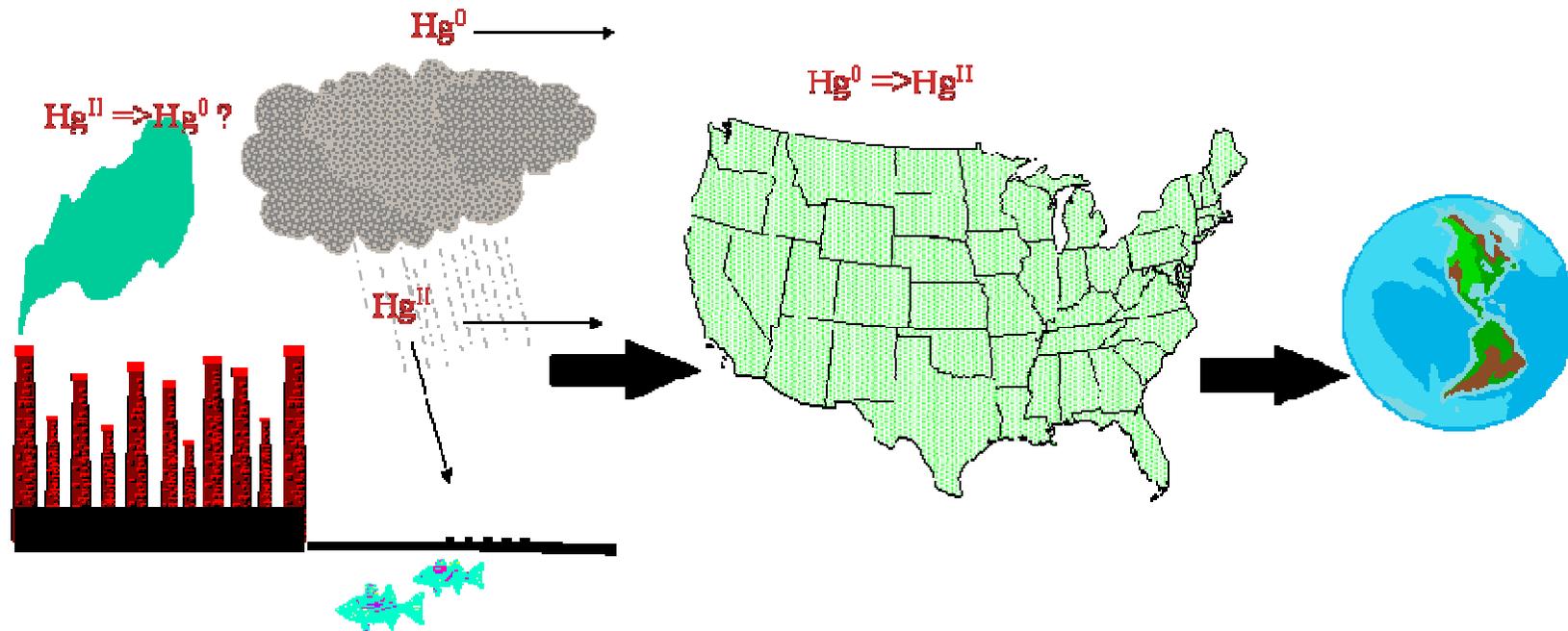
Concentrations de mercure dans les poissons des rivières américaines
(le seuil réglementaire est de 0,3 ppm, soit 0,3 $\mu\text{g Hg/g}$ poisson)

Source : Scudder et al., USGS Report, 2009

Cycle du mercure



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



Local

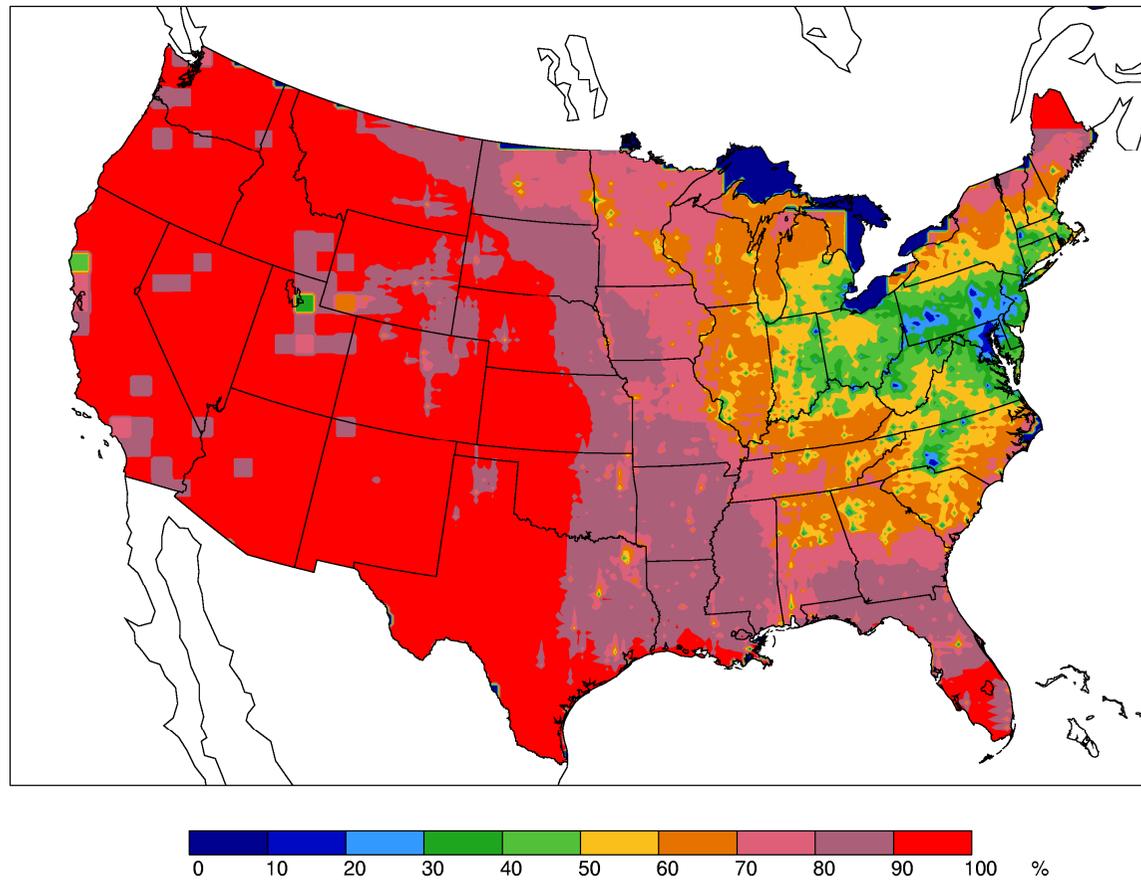


Régional

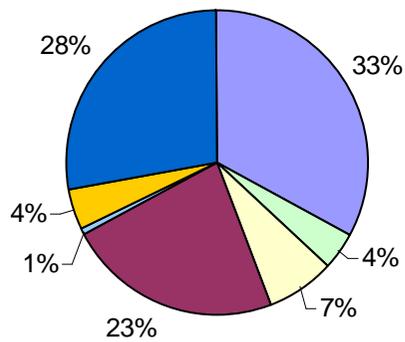
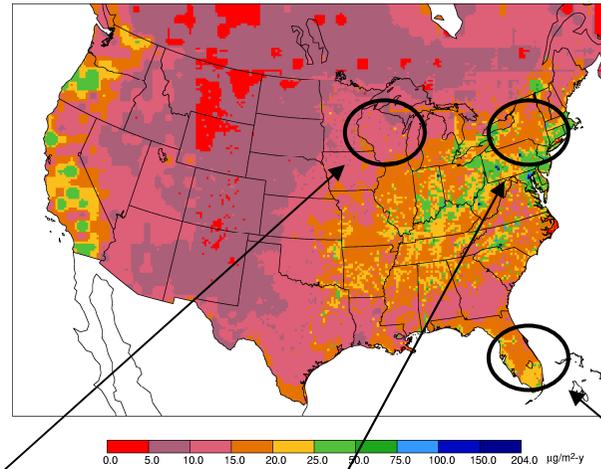


Global

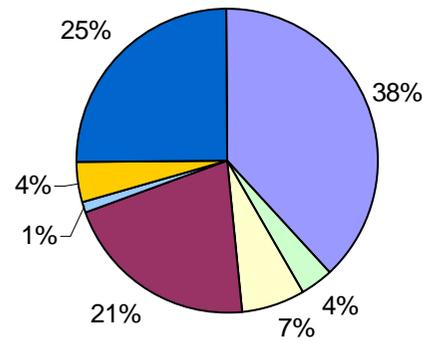
Contribution des sources naturelles et autres que celles d'Amérique du Nord aux dépôts de mercure aux États-Unis



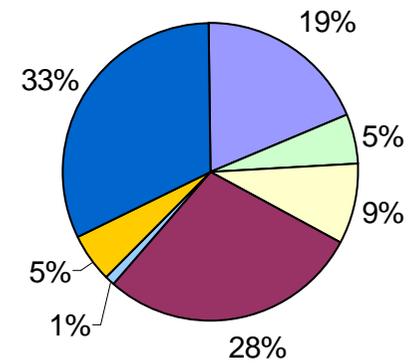
Contributions aux dépôts de mercure aux États-Unis



Wisconsin



New York



Floride

