

---

# Cours VET

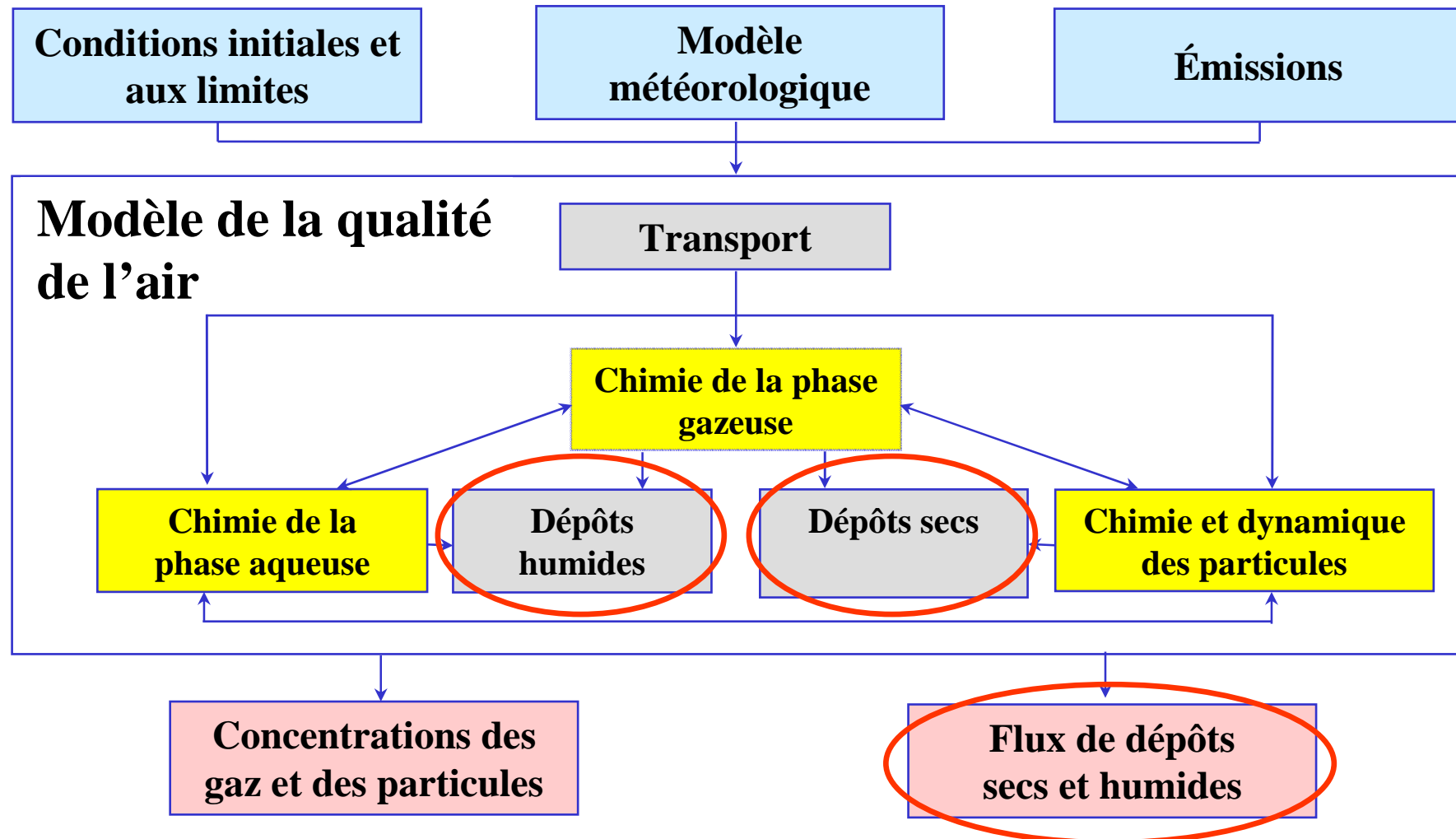
## « Environnement atmosphérique et qualité de l'air »

### Dépôts atmosphériques

Christian Seigneur

Cerea

# Représentation schématique d'un modèle de pollution atmosphérique



# Plan

---

- Dépôts secs
- Dépôts humides

# 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 ou interception (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 ( $Re \ll 1$ ) :

$$\text{Force}_{St} = 3 \pi \mu_{air} d_p v_p / c_c$$

$\mu_{air}$  : viscosité dynamique de l'air (kg / (m s))

$d_p$  : diamètre de la particule (m)

$v_p$  : vitesse de la particule dans le fluide (m / s)

$c_c$  : 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 ( $Re \gg 1$ ) :

$$\text{Force}_{st} = \pi c_D \rho_a d_p^2 v_p^2 / (8 c_c)$$

$\rho_a$  : masse volumique de l'air ( $\text{kg} / \text{m}^3$ )

$d_p$  : diamètre de la particule (m)

$v_p$  : vitesse de la particule dans le fluide (m / s)

$c_D$  : 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 :

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

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

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

- 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 :

$$m_p \, g + \text{Force}_{\text{St}} = 0$$

# Sédimentation

---

- Pour  $Re \ll 1$

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

soit :

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

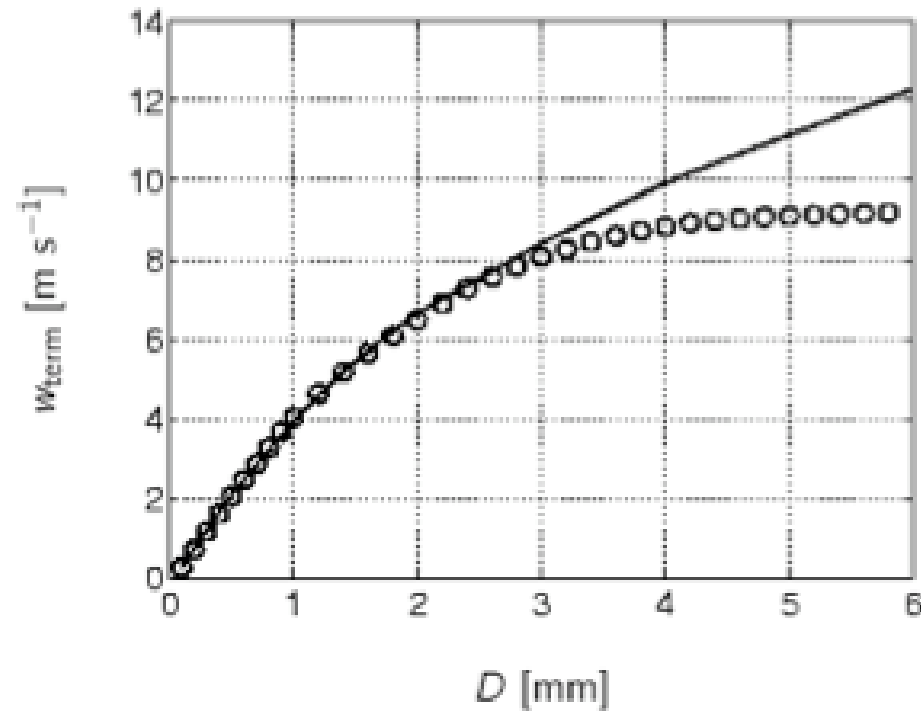
- Pour  $Re \gg 1$

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

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

# Vitesse de chute des gouttes

---



Mesures (cercles) de Gunn & Ginzer (*JAM*, 1949) et théorie (ligne)

# 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

---

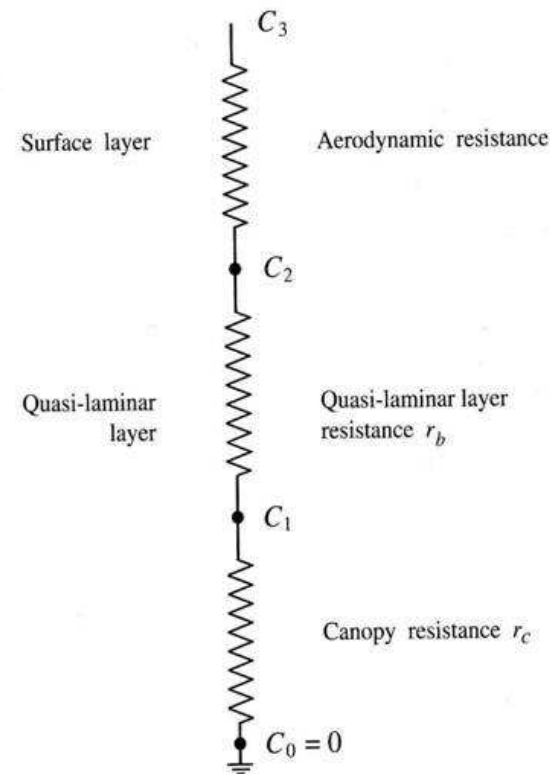
- Particules : On considère que la particule se dépose une fois en contact avec la surface, mais un coefficient de rebondissement peut être invoqué
- Gaz : La molécule de gaz se dépose soit par adsorption, absorption (par exemple dissolution dans un fluide) ou réaction avec la surface

# Méthode des résistances

Cette méthode 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.



# Méthode des résistances

---

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

$$F = v_d C$$

Polluants gazeux :  $1 / v_d = r_t = r_a + r_b + r_c$

Particules fines :  $1 / v_d = r_t = r_a + r_b$

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

# Méthode 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  $K \frac{dC}{dz} = C / r$

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,  $v_s \ll 1/r \Rightarrow v_d = 1/r$



# Méthode 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 (quantité de mouvement)

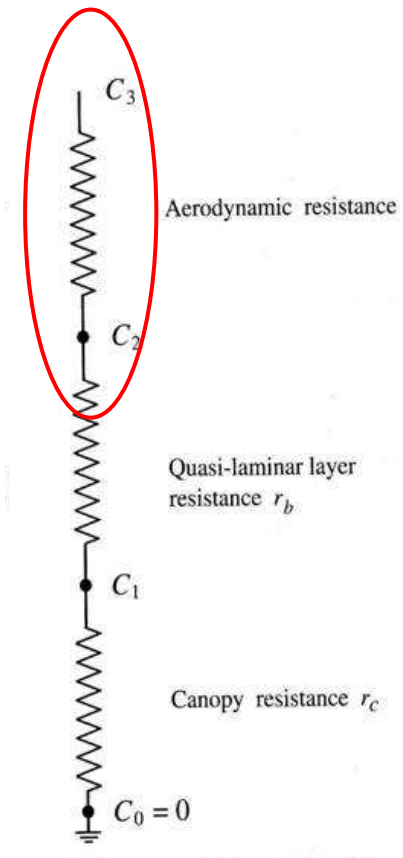
$K_T$  – le coefficient de diffusion turbulente (chaleur)

$\kappa$  – la constante de von Karman

$u^*$  – la vitesse de friction

$\phi_M, \phi_T$  – les profils verticaux des fonctions de température et de moment

$\zeta$  - hauteur sans dimension,  $= z / L$ ,  $L$  : 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 :

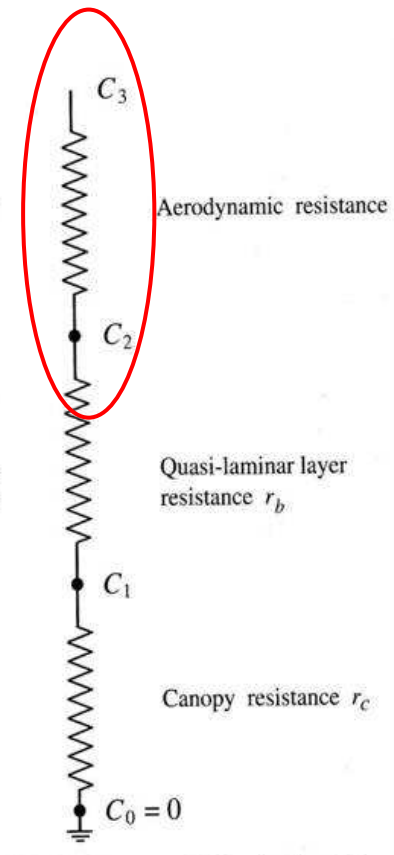
$$F_a = \frac{C_3 - C_2}{r_a}$$

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

On en déduit :

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

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



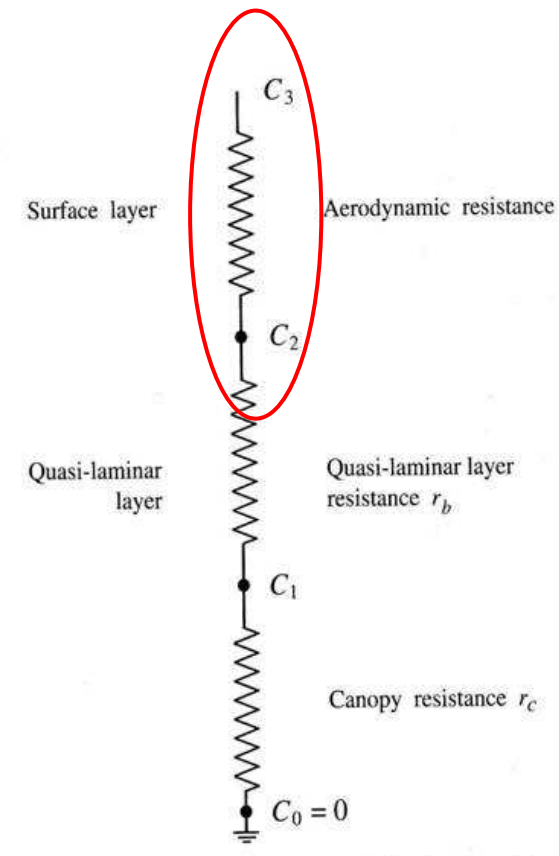
# Résistance aérodynamique

La résistance aérodynamique peut être calculée en intégrant l'équation.

Pour des conditions atmosphériques neutres, on a :

$$r_a = \ln(z/z_0) / \kappa u_*$$

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 :

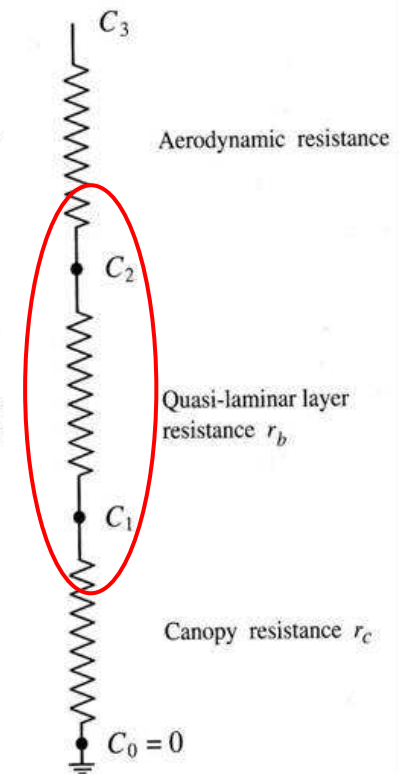
$$F_b = \frac{C_2 - C_1}{r_b}$$

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 ( $\langle u' w' \rangle^{1/2}$ )
- $Sc$  – le nombre de Schmidt (advection / diffusion)
- $\nu$  – la viscosité cinématique de l'air ( $\nu = \mu / \rho$ )
- $D$  – 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

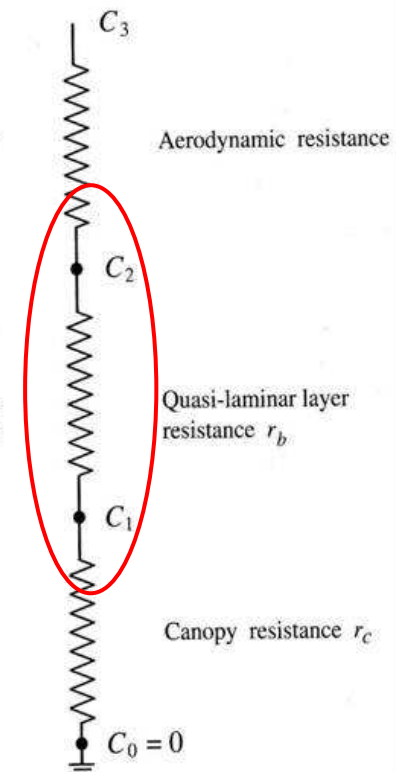
$$E_B = Sc^{-\gamma}, \quad E_{IM} = \left(\frac{St}{\alpha + St}\right)^\beta, \quad E_{IN} = \frac{1}{2} \left(\frac{D_p}{A}\right)^2,$$

$St$  – 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 généralement prise égale à 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  $\frac{1}{r_c} = \frac{1}{r_{cf}} + \frac{1}{r_{cs}}$

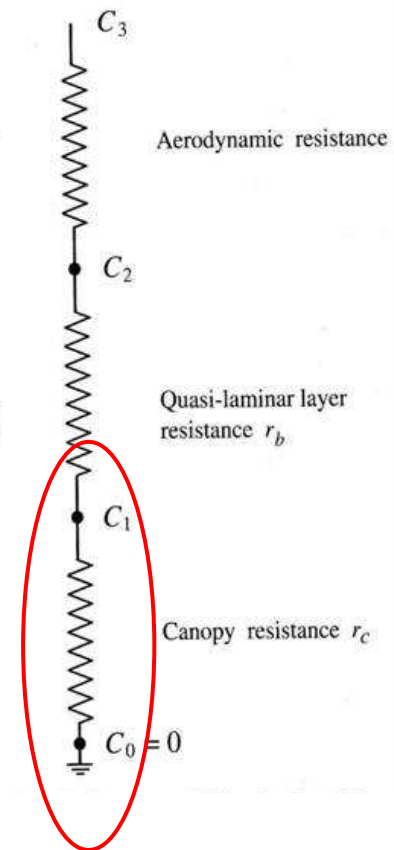
$$r_{cf} = \left( \frac{1}{r_{cut}} + \frac{1}{r_{st}} \right)^{-1} (LAI)^{-1}$$

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)



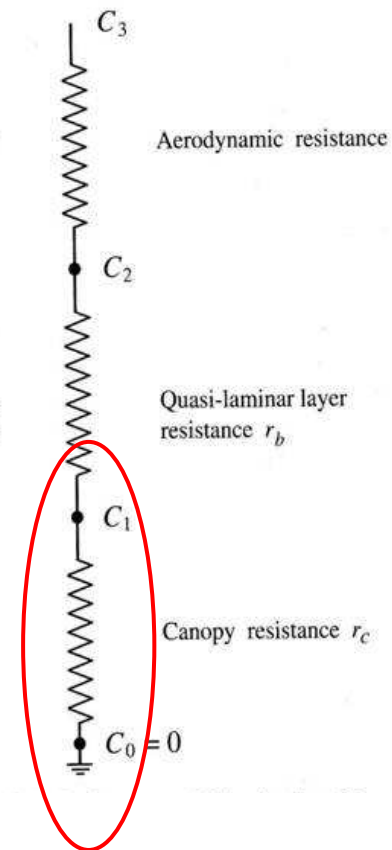
# Résistance surfacique

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.

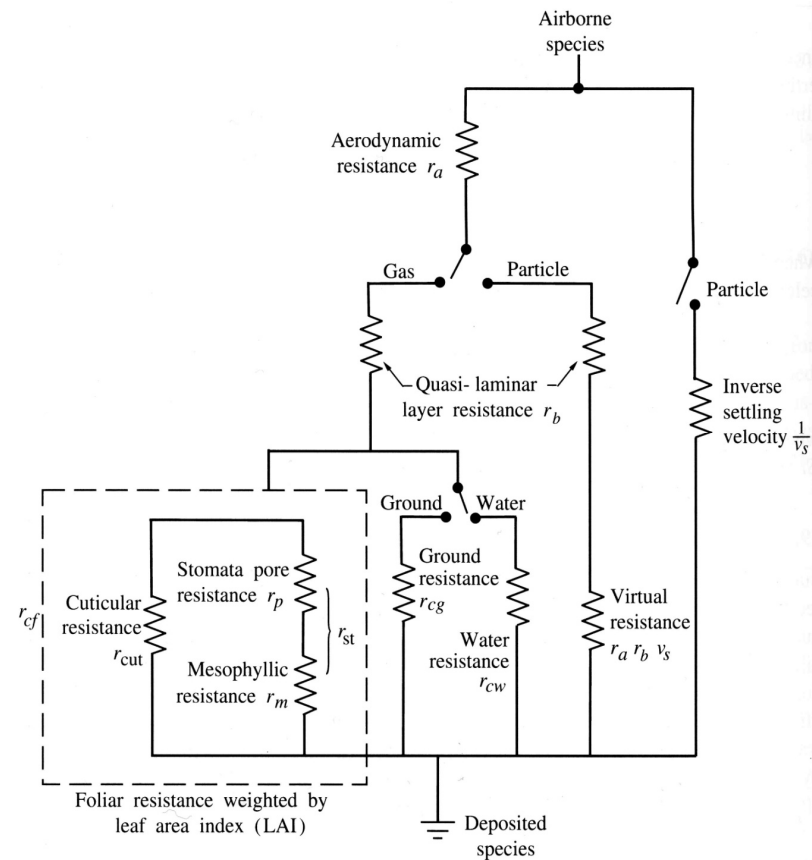
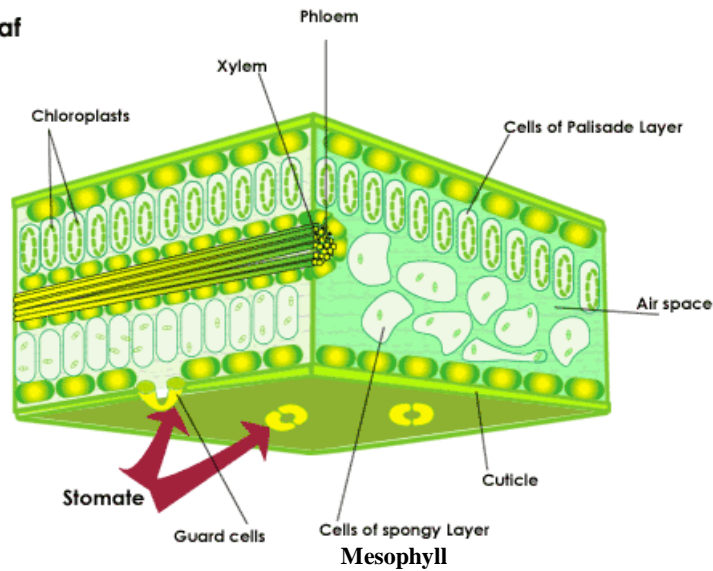




# Méthode des résistances

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

The Leaf



# Méthode des résistances

---

---

Vitesses de dépôts typiques pour différents gaz

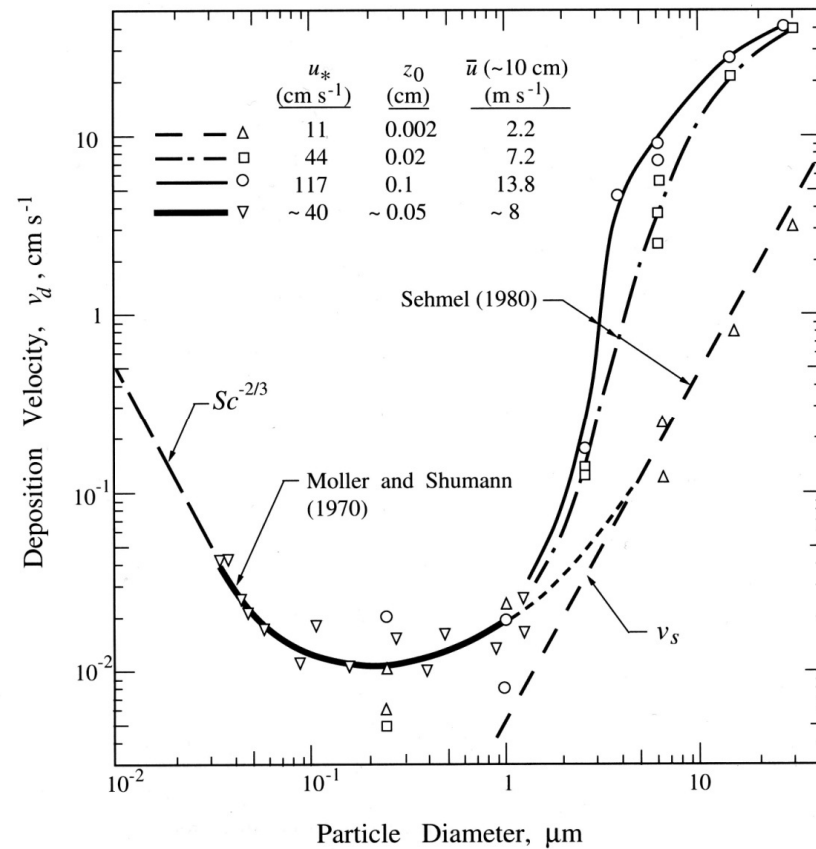
Species	$v_d$ (cm s <sup>-1</sup> ) Over		
	Continent	Ocean	Ice/Snow
CO	0.03	0	0
N <sub>2</sub> O	0	0	0
NO	0.016	0.003	0.002
NO <sub>2</sub>	0.1	0.02	0.01
HNO <sub>3</sub>	4	1	0.5
O <sub>3</sub>	0.4	0.07	0.07
H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	0.5	1	0.32

# 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

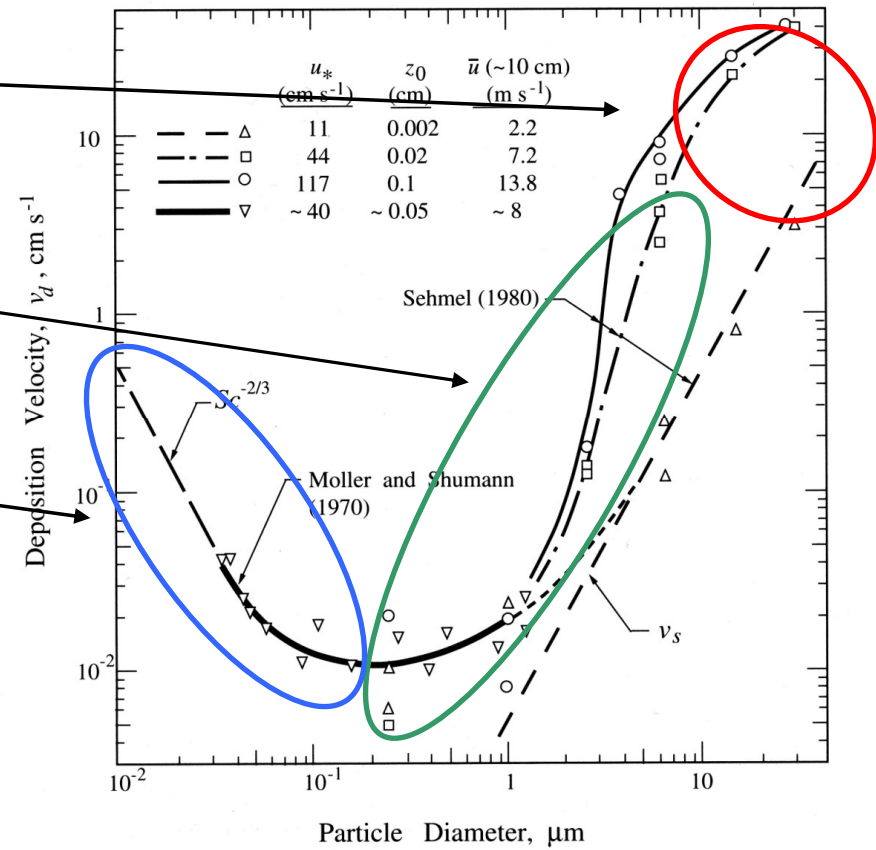


# Dépôts secs de particules

Sédimentation

Inertie et interception

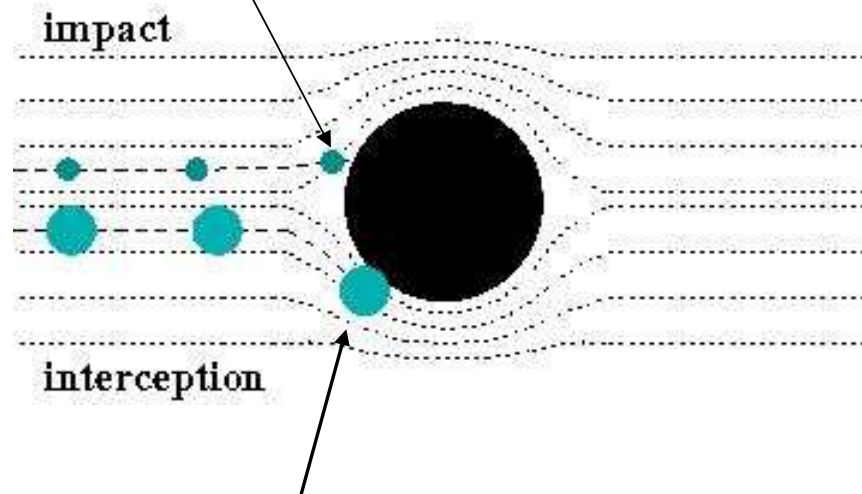
Diffusion brownienne



# Dépôts secs de particules

---

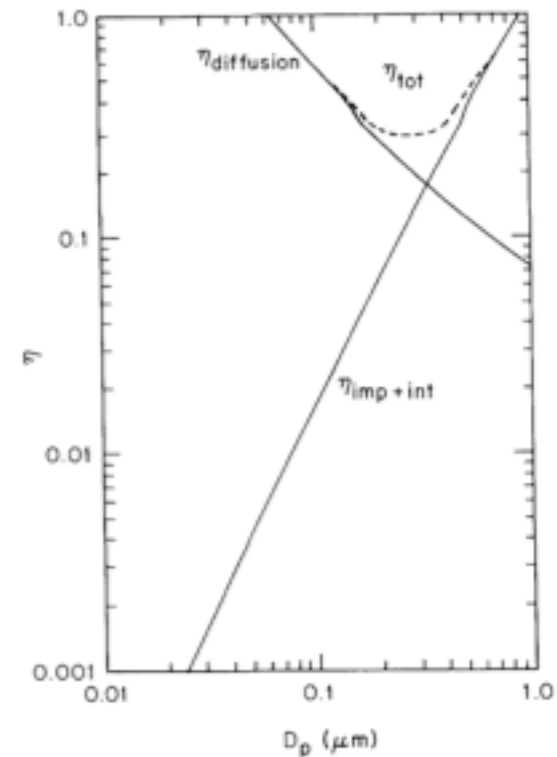
Impact par **inertie** : proportionnel à la masse de la particule, donc au volume ( $d_p^3$ ) et à la masse volumique



Impact par **interception** : proportionnel à la surface projetée de la particule, donc  $d_p^2$

# Réduction des émissions de polluants particulaires : Filtration

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

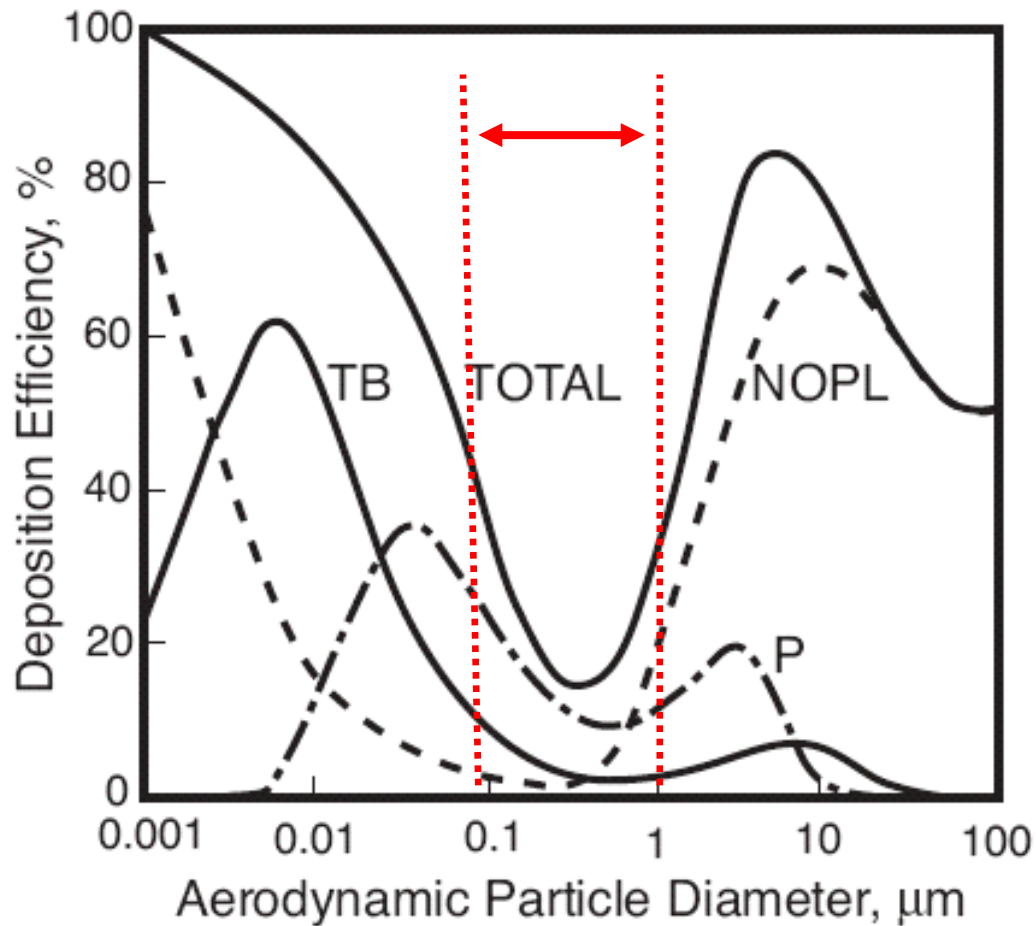


Efficacité pour impact par inertie et interception et par diffusion brownienne pour un cylindre placé transversalement à l'écoulement

Source : Flagan et Seinfeld, 1988

# Inhalation des particules

## Influence de la granulométrie



Les mêmes processus de dépôts ont lieu lors de l'inhalation des particules : les particules entre 0,1 et 1 μm vont le plus profondément dans les poumons

NOPL : voies aériennes supérieures (région oto-rhyno-pharyngo-laryngienne)

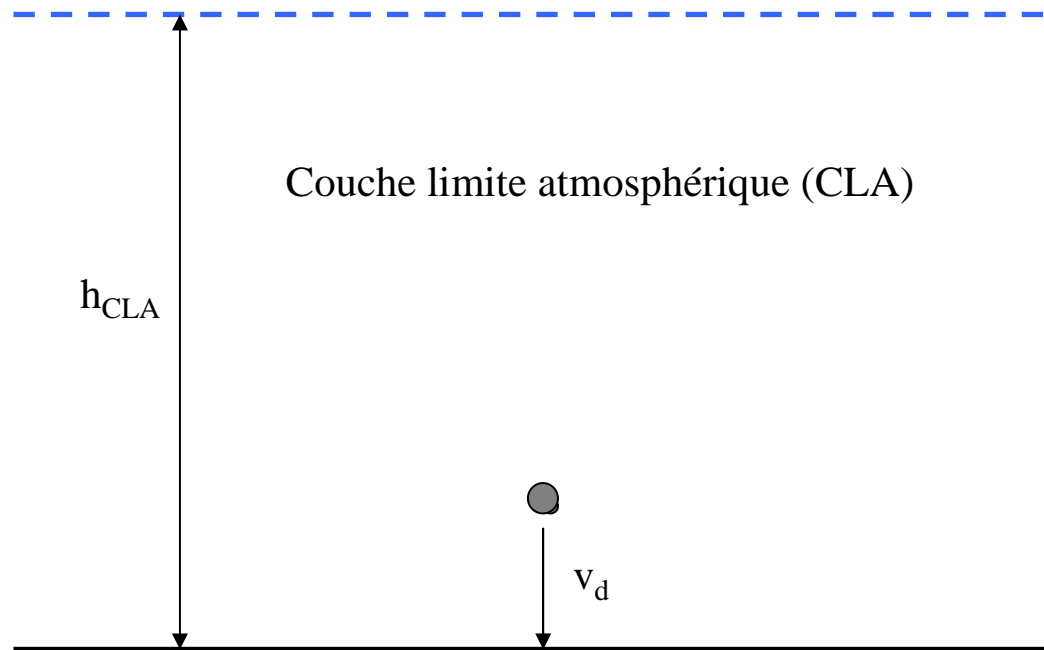
TB : arbre trachéo-bronchique

P : région pulmonaire

# Dépôts secs

## Bilan matière dans la couche limite

---



Flux de dépôt sec :

$$F = v_d C$$

Évolution de la concentration dans la couche limite :

$$dC/dt = - v_d C / h_{CLA}$$

$$C = C_0 \exp(- (v_d / h_{CLA}) t)$$



# 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

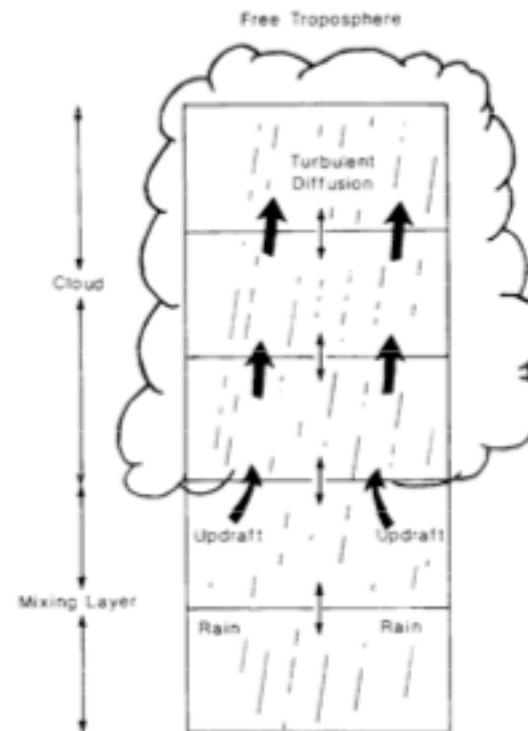
---

- 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 ( $m^2 s^{-1}$ )

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

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

$\mu_{air}$  : 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 <sup>2</sup> /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 =  $\pi d_p^2$

- 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), donc  $C_{a,n} \sim 0$

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

# Flux de dépôt humide : coefficient de lessivage

---

- Le coefficient de lessivage,  $\Lambda$ , 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 $\mu\text{m}$ )	$3 \times 10^{-7} \text{ s}^{-1}$	$8 \times 10^{-7} \text{ s}^{-1}$	$1 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$	$2 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$



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

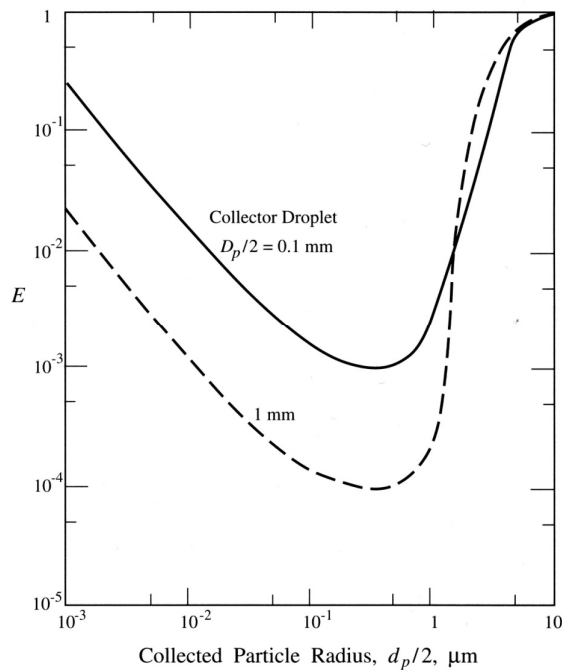
L'évolution de la concentration des particules dans l'atmosphère est :

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

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

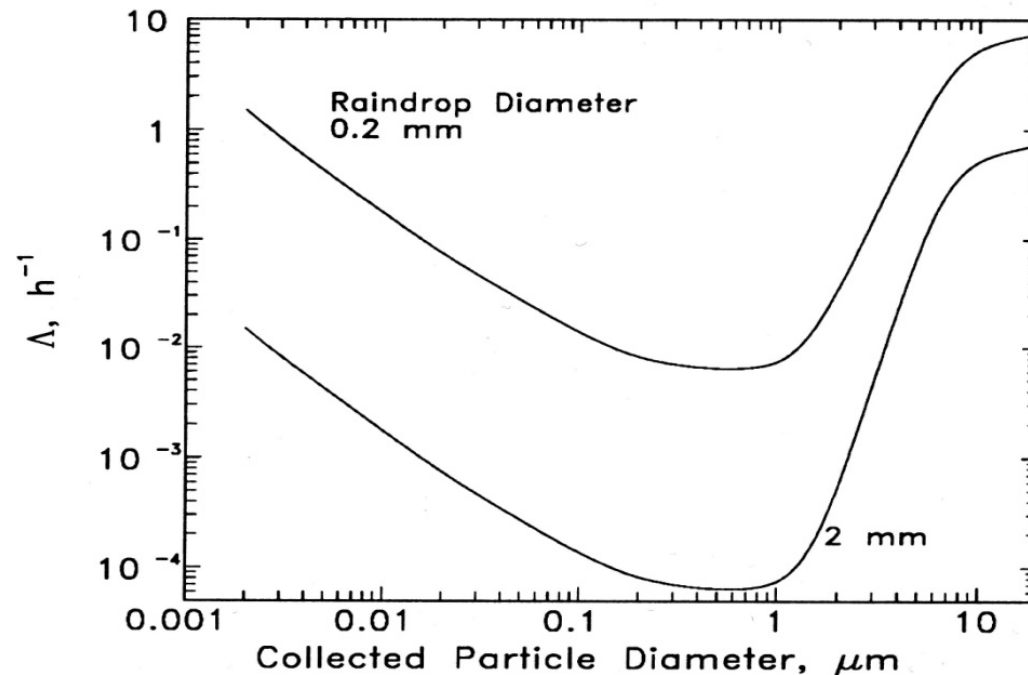
L'interception devient importante  
pour les particules de diamètre entre  
0,1 et 1 micron

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.

# Simulations de flux de dépôts : Exemple du mercure

---



Dépôts humides ( $\mu\text{g}/\text{m}^2\text{-an}$ )



Dépôts secs ( $\mu\text{g}/\text{m}^2\text{-an}$ )