

**IRSN**

INSTITUT  
DE RADIOPROTECTION  
ET DE SÛRETÉ NUCLÉAIRE

# Comprendre et modéliser la dispersion des aérosols dans l'environnement

Présenté par Denis BOULAUD / Direction de l'Environnement et  
de l'Intervention.

Journée scientifique - 06 novembre 2008



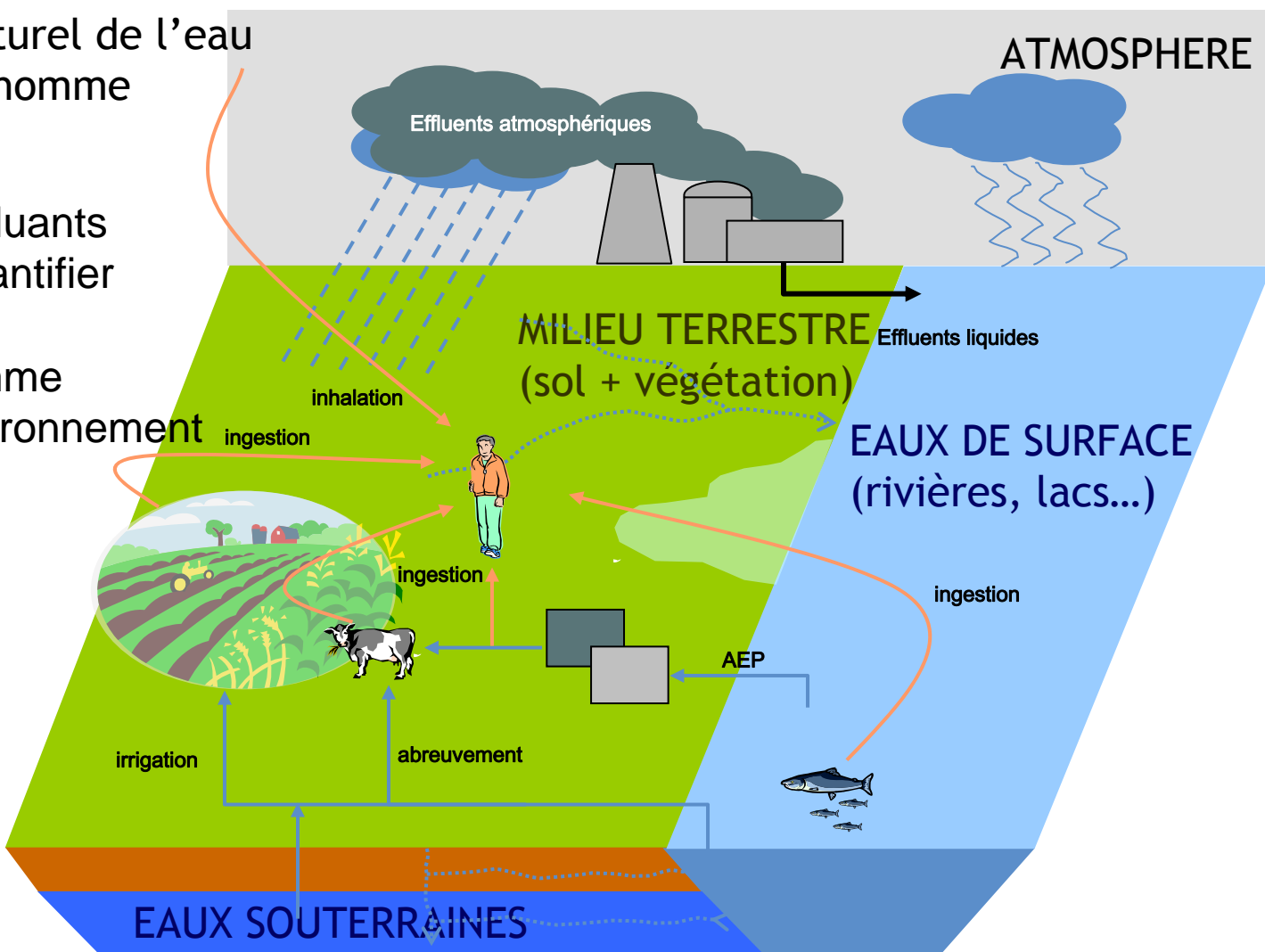
Système de management  
de la qualité IRSN certifié

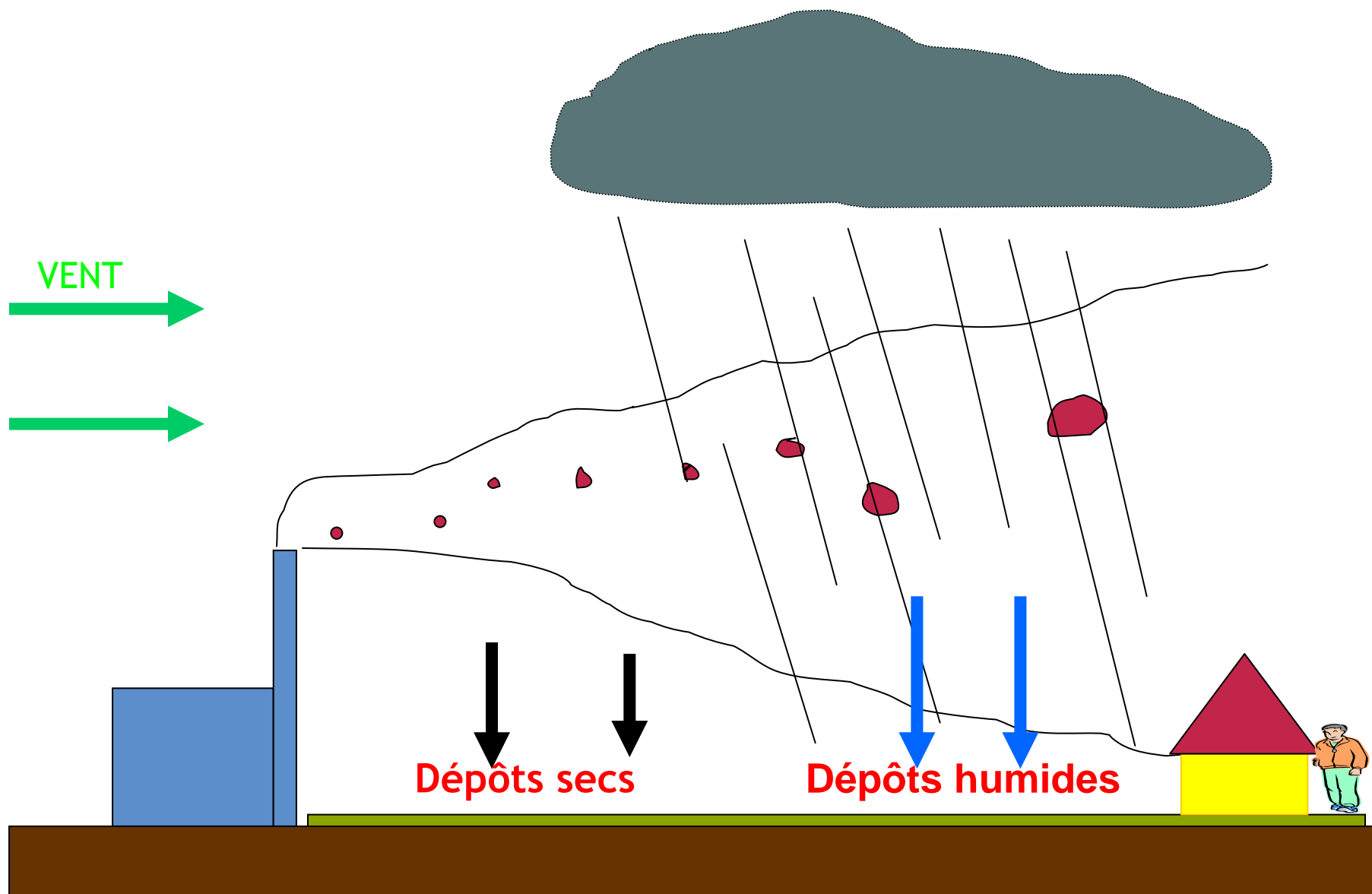
L'environnement :  
un ensemble de composantes,  
physiques et biologiques,

reliés par le cycle naturel de l'eau  
et ceux induits par l'homme  
pour ses besoins

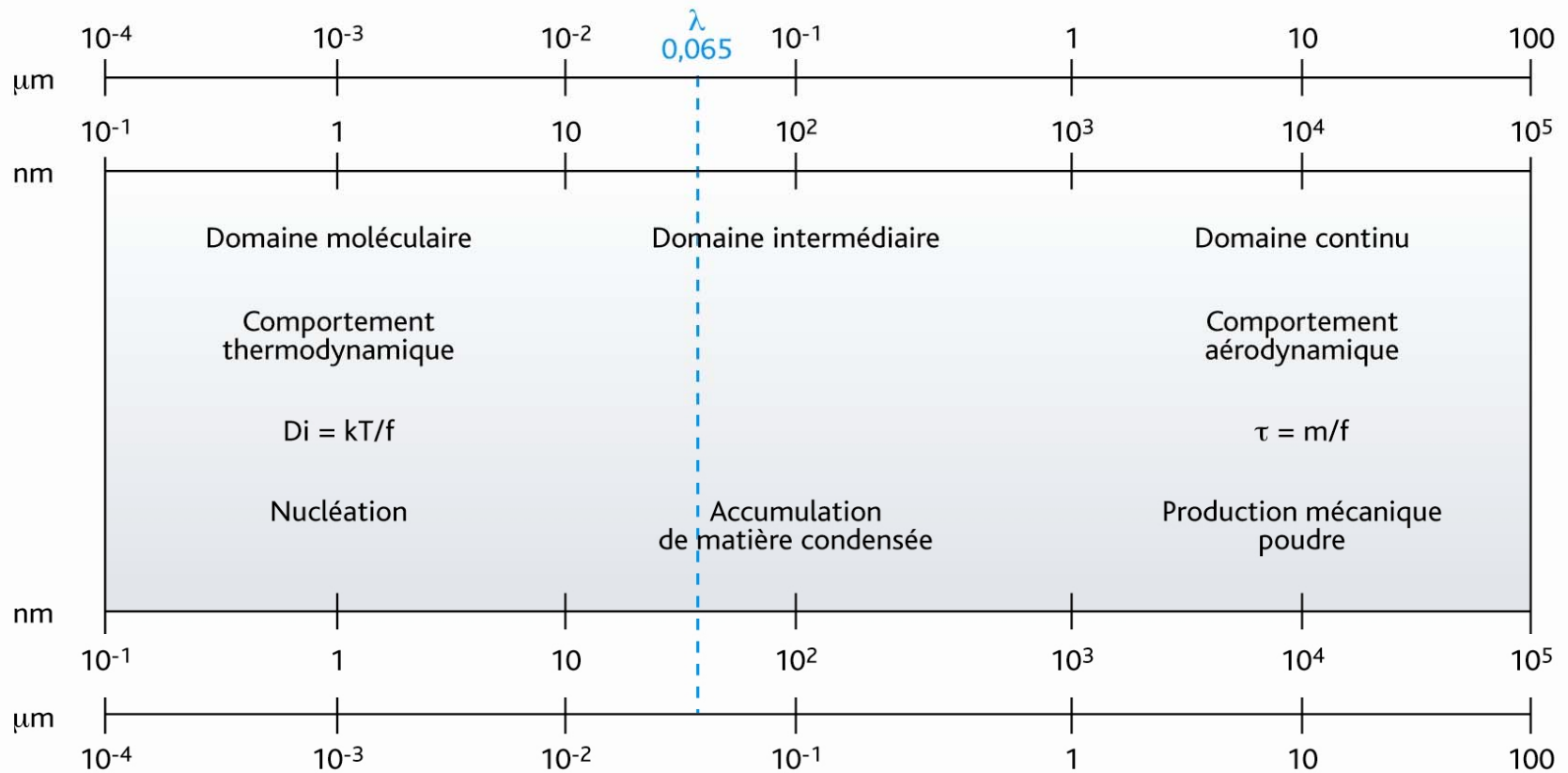
⇒ Dispersion des polluants  
⇒ Les localiser et quantifier

- ① Protection de l'homme
- ② Protection de l'environnement

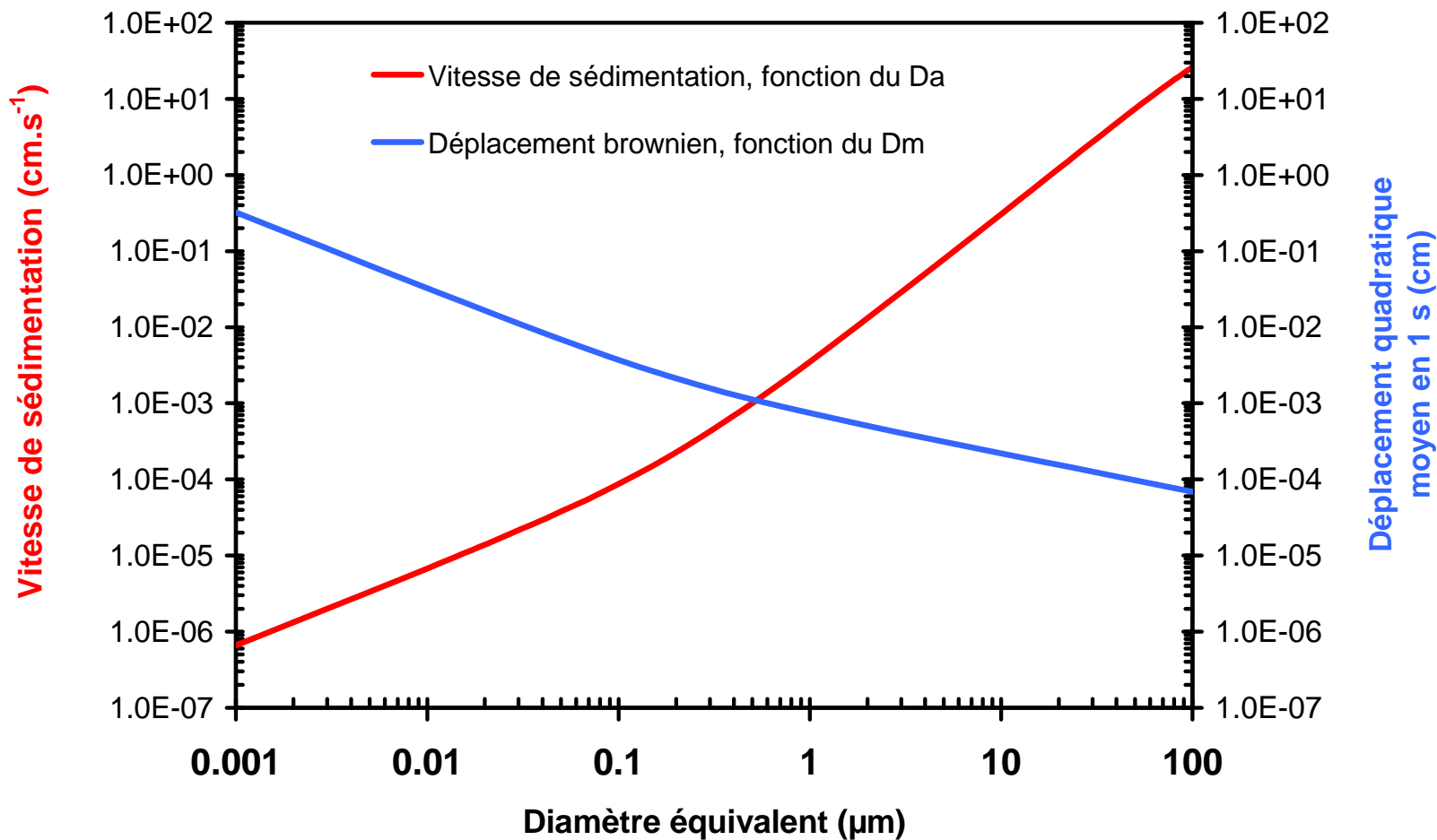




# Domaine de dimensions des aérosols



# Diffusion brownienne et sédimentation des aérosols



*D'après F. Gensdarmes*

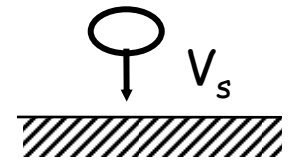
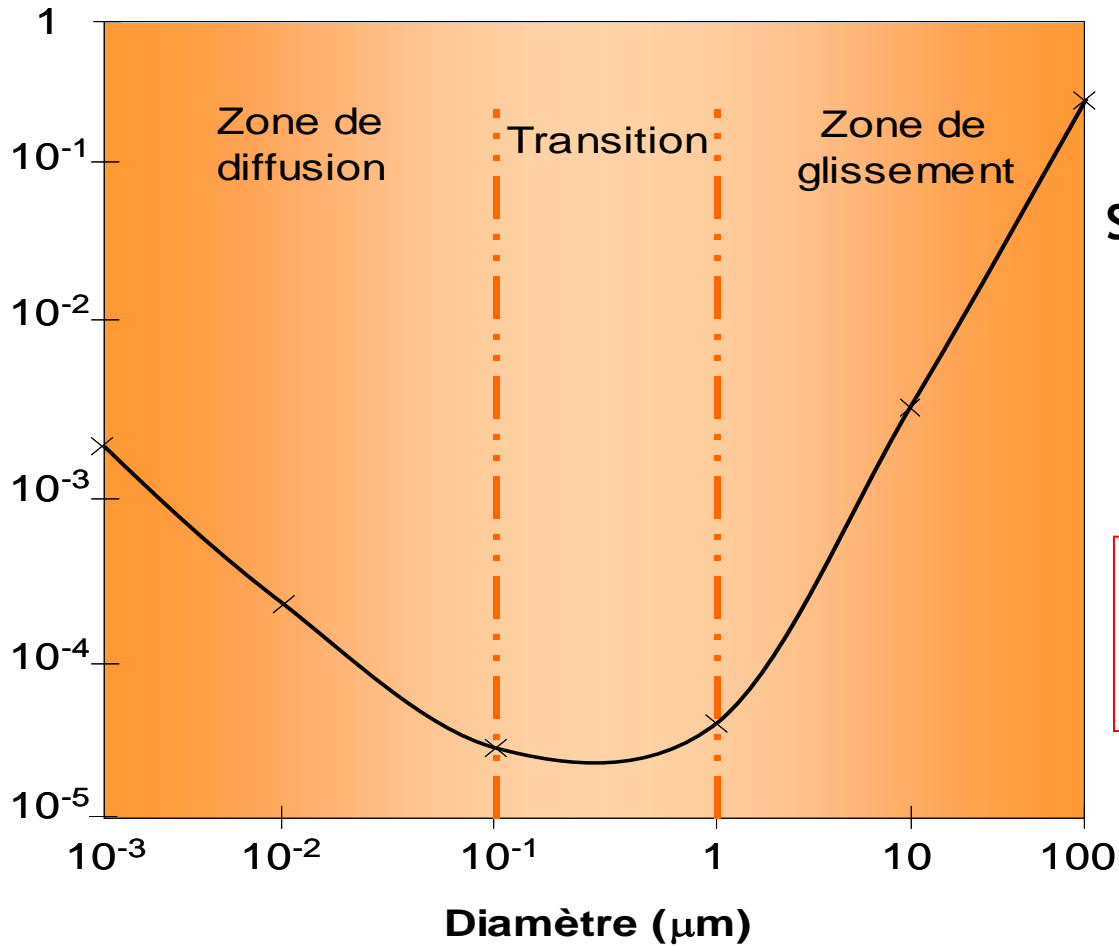
# LA COURBE EN « V »



Diffusion

Déplacement/unité de temps (m/s)

3 mm/s  
pour 1 nm



Sédimentation

3 mm/s  
pour 10 µm

La courbe en « V » se retrouve aussi pour décrire :

➤ la fraction des aérosols déposée sur les parois d'un conduit où règne un écoulement laminaire ou turbulent,

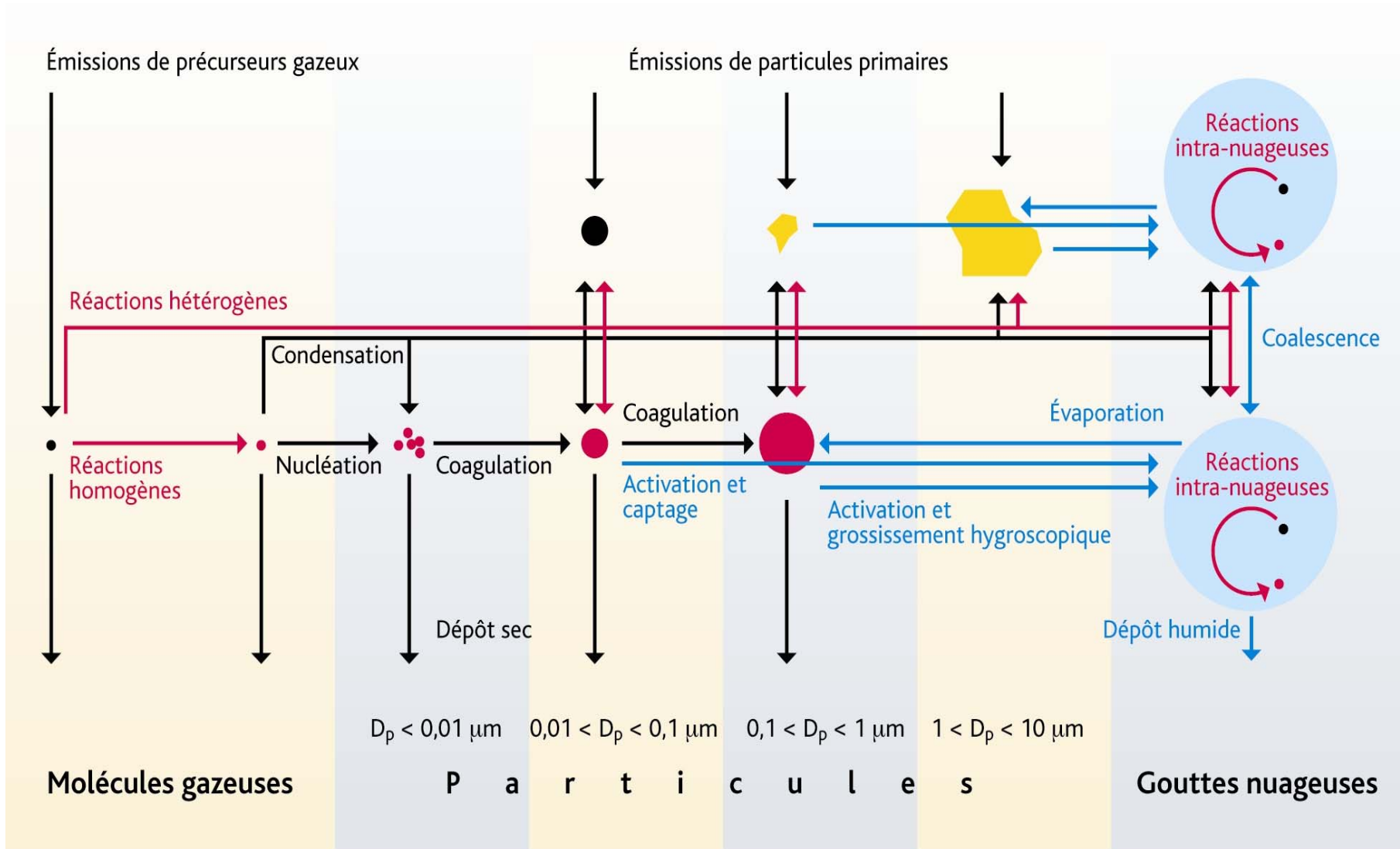
➤ la fraction des aérosols déposée dans l'appareil respiratoire,

➤ l'efficacité d'un filtre.

➤ **Qu'en est-il pour le dépôt sec et le dépôt humide ?**

➤ **Mais avant, que se passe-t-il dans le panache ?**

# Dynamique des aérosols dans l'atmosphère



d'après F. Raes et al (Atmosph. Env. 34. 2000)



# QUE FAIRE ?


Faut-il tout modéliser avec précision ?

- la nucléation,
- la coagulation,
- le dépôt sec,
- le dépôt humide : l'activation et le grossissement hygroscopique, le lessivage,
- la remise en suspension.

# Nucléation

- Mécanisme à dynamique rapide nécessitant la connaissance précise des espèces physico-chimiques susceptibles de condenser.
- Dans les AG de réacteur les éléments volatils et semi-volatils (Cs, Te, Sr...) sont déjà en phase aérosols lors de leur relâchement dans l'atmosphère.
- Ce mécanisme n'est pas à modéliser, mais il peut exister une difficulté à caractériser la distribution en dimensions des radionucléides relâchés (recours à des données expérimentales).

# Coagulation

- Mécanismes bien documentés, mais dont la dynamique est très liée à la concentration des aérosols. 
- En l'absence de source dans le panache la modélisation de ce mécanisme n'est pas impérative pour la description de la dynamique des aérosols.
- La prise en compte de l'interaction avec l'aérosol atmosphérique existant (mode accumulation) peut être essentiel lors d'un transport à longue distance.

# Le dépôt sec

## Définition de la vitesse de dépôt sec

 $m.s^{-1}$ 

$$V_d = \frac{-F}{C}$$

 $Particules.m^{-2}.s^{-1}$ 
 $Particules.m^{-3}$ 

## Rapport du flux surfacique moyen sur concentration volumique moyenne

Modélisation :

$$V_d = V_s + (R_a + R_s + R_a R_s V_s)^{-1}$$

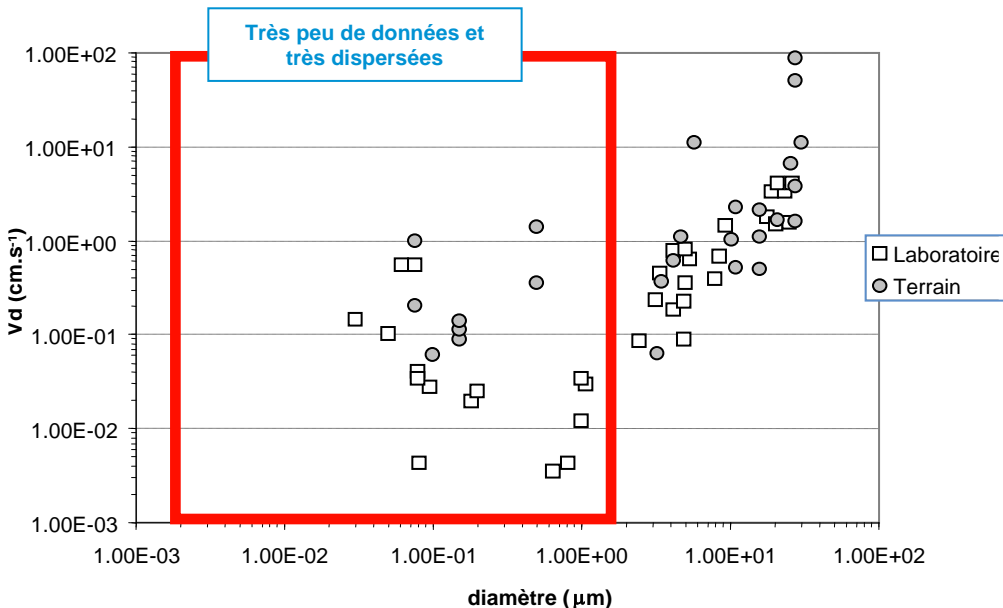
avec  $V_s$  vitesse de sédimentation,  $R_a$  résistance aérodynamique,  $R_s$  résistance de la couche de surface

# Le dépôt sec

## Contexte

- ❑ Peu de données en fonction de la dimension des aérosols, des paramètres micro-météorologiques et du substrat, notamment en milieu urbain sur les parois des bâtiments.
- ❑ Nécessité de poursuivre une approche expérimentale pour valider les modèles, notamment pour les aérosols nanométriques

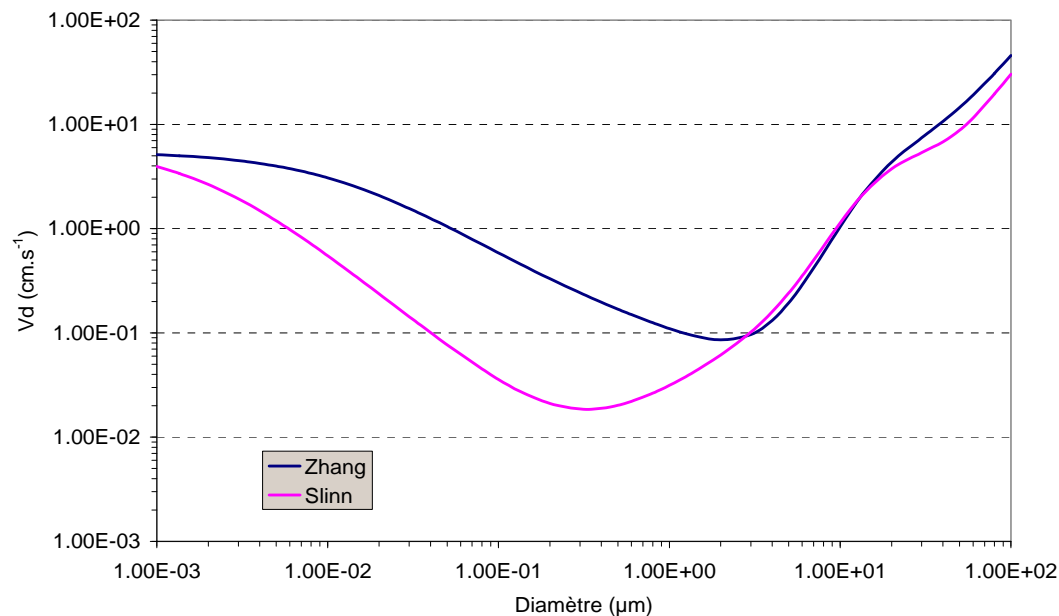
# Données pour l'herbe



Manques de données  
micro-météorologiques  
et de caractéristiques  
du couvert

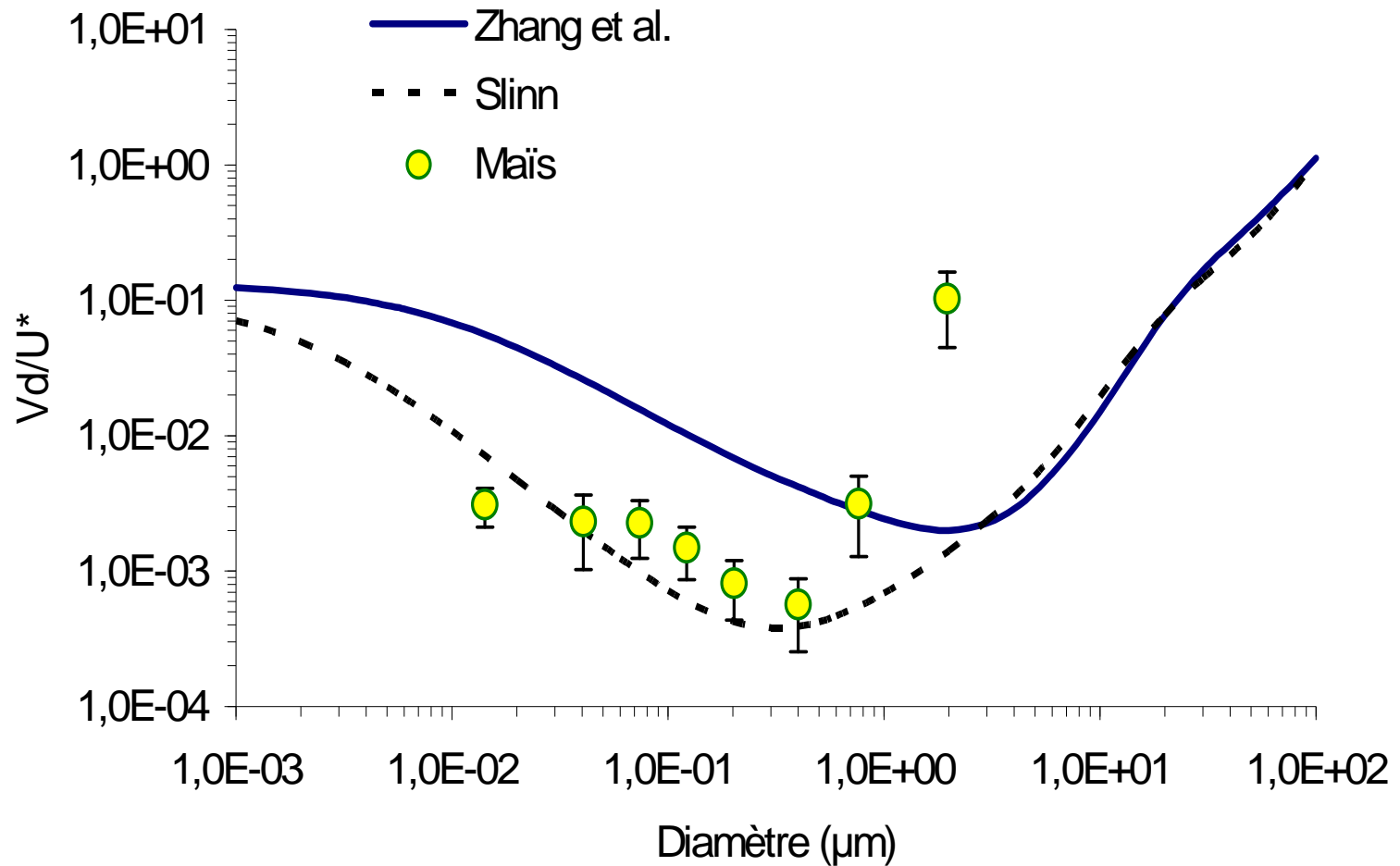
# Modèles pour l'herbe

Ecarts > un ordre de  
grandeur



D'après D. Maro et al 2008

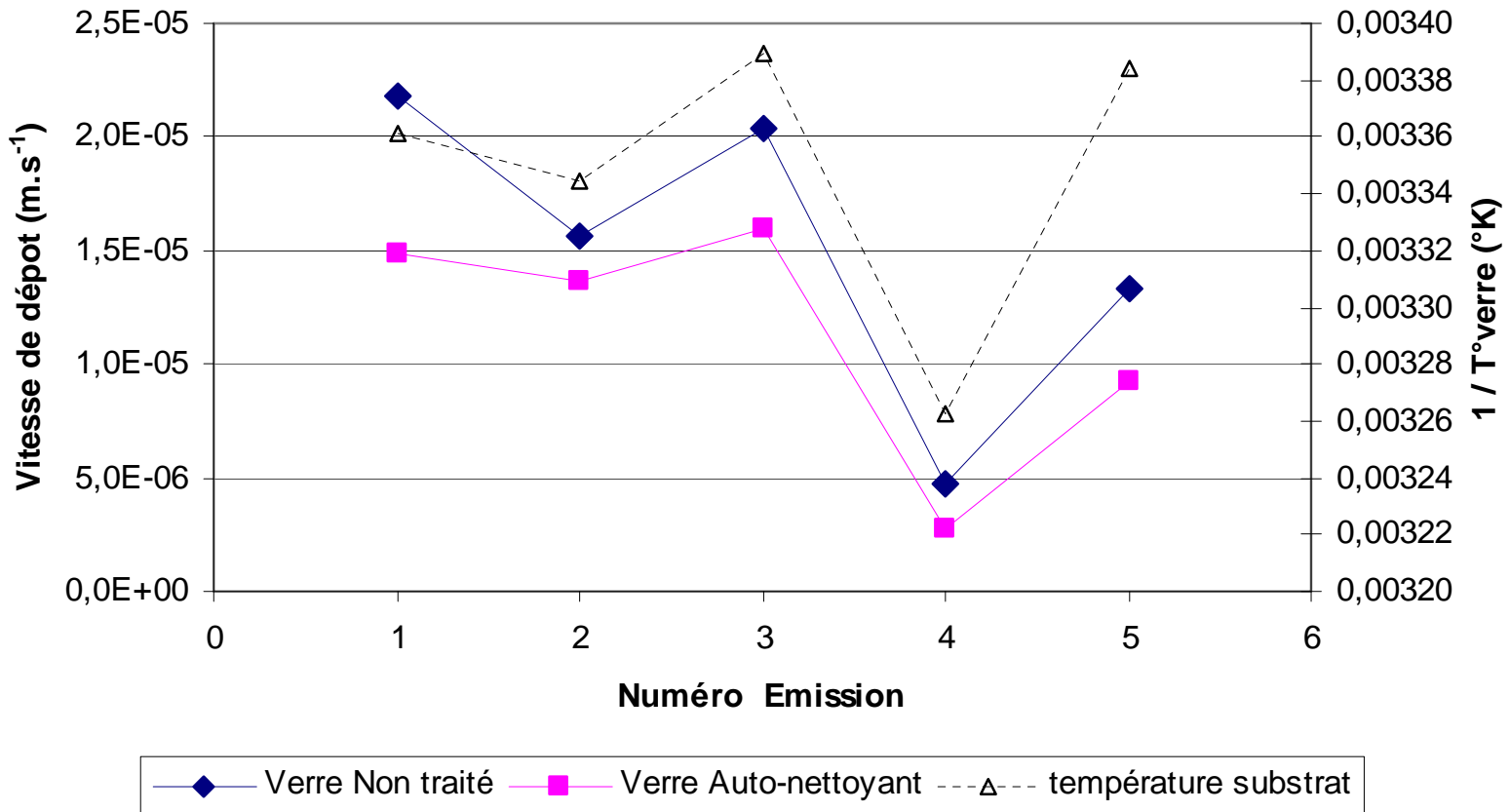
## Exemple de résultats expérimentaux obtenus par « eddy-correlation » en utilisant l'aérosol atmosphérique



*D'après P. Damay et al 2008*

# Exemple de résultats expérimentaux : dépôt sur les parois de bâtiments, rôle de la Thermophorèse ?

Influence de la température du substrat sur Vd : Verres



D'après D. Maro et al 2007



# Le dépôt sec

- Approfondir les études de terrain (écosystèmes divers, milieu urbain)
- Poursuivre la réflexion sur les modèles existants (travaux d'A. Petroff, AE, 2008)
- Analyser la transposition vers les modèles opérationnels de dispersion atmosphérique

# Dépôts humides

- **Captage dans le nuage lors de la formation de gouttelettes par nucléation hétérogène (« rain-out ») :**
  - ❑ **Aérosols insolubles,**
  - ❑ **Aérosols solubles.**

Les modèles pour décrire ces mécanismes sont bien établis, mais difficultés pour avoir les données nécessaires aux calculs (diamètres et nature des particules, sursaturation....).
- **Captage sous le nuage lors de précipitations, par collision des aérosols avec les gouttes de pluie : lessivage (« wash-out »).**

# Dépôts humides : lessivage

➤ La fréquence de captage des aérosols de diamètre,  $d_p$ , par des gouttes,  $\Lambda(d_p)$ , est reliée à leur concentration  $n$  par la relation :

$$dn(d_p)/dt = -\Lambda(d_p)n(d_p) \quad (\text{décroissance du 1}^{\text{er}} \text{ ordre})$$

➤ Pour des gouttes monodispersées :

$$\Lambda(d_p) = (\pi/4)Dg^2 \times Ug \times E(Dg, d_p) \times Ng,$$

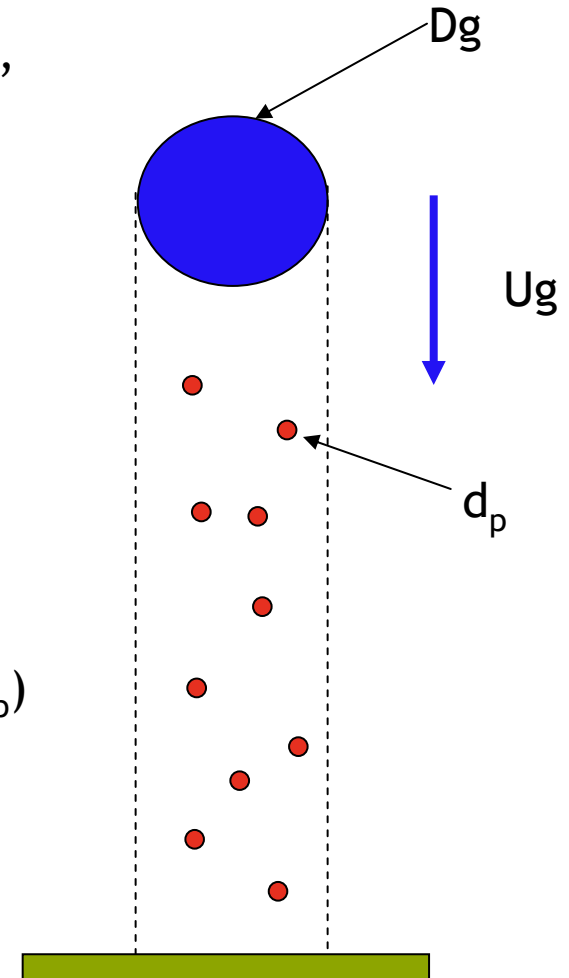
que l'on peut relier à la hauteur des précipitations,  $p_0$ ,

$$\Lambda(d_p) = 3 E(Dg, d_p) p_0 / 2 Dg$$

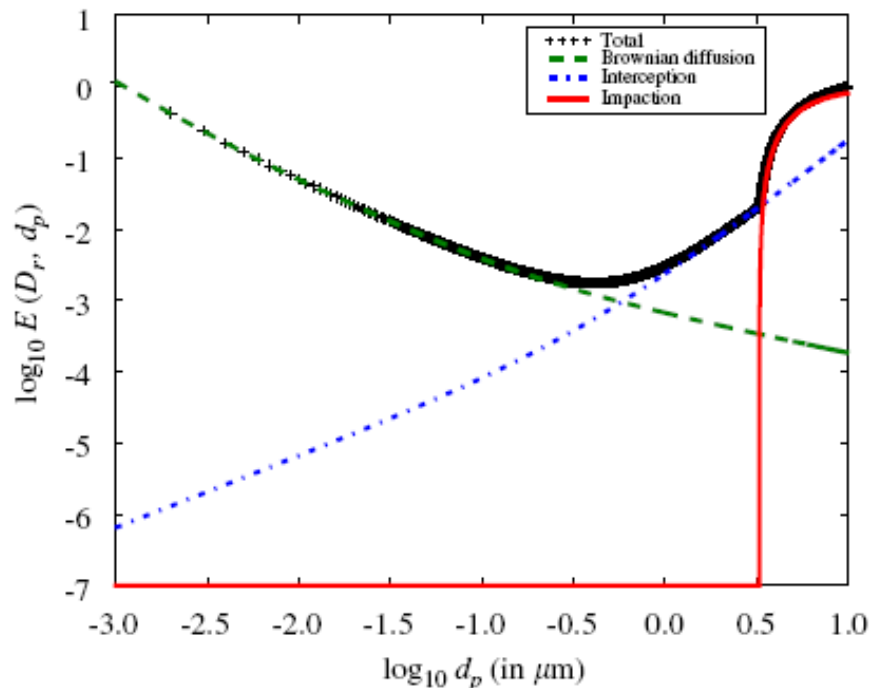
➤ Les difficultés viennent de la connaissance de  $E(Dg, d_p)$  et du lien entre  $p_0$  et  $Dg$

➤ Les solutions opérationnelles sont souvent du type

$\Lambda(d_p) = A p_0^B$  où  $A$  et  $B$  sont ajustés à des résultats expérimentaux

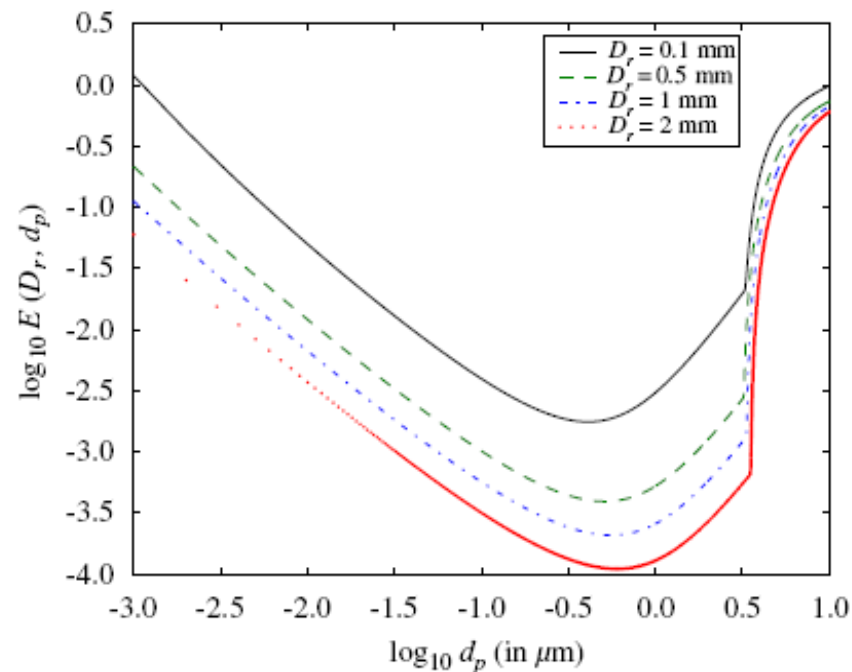


# Dépôts humides : efficacité de collecte



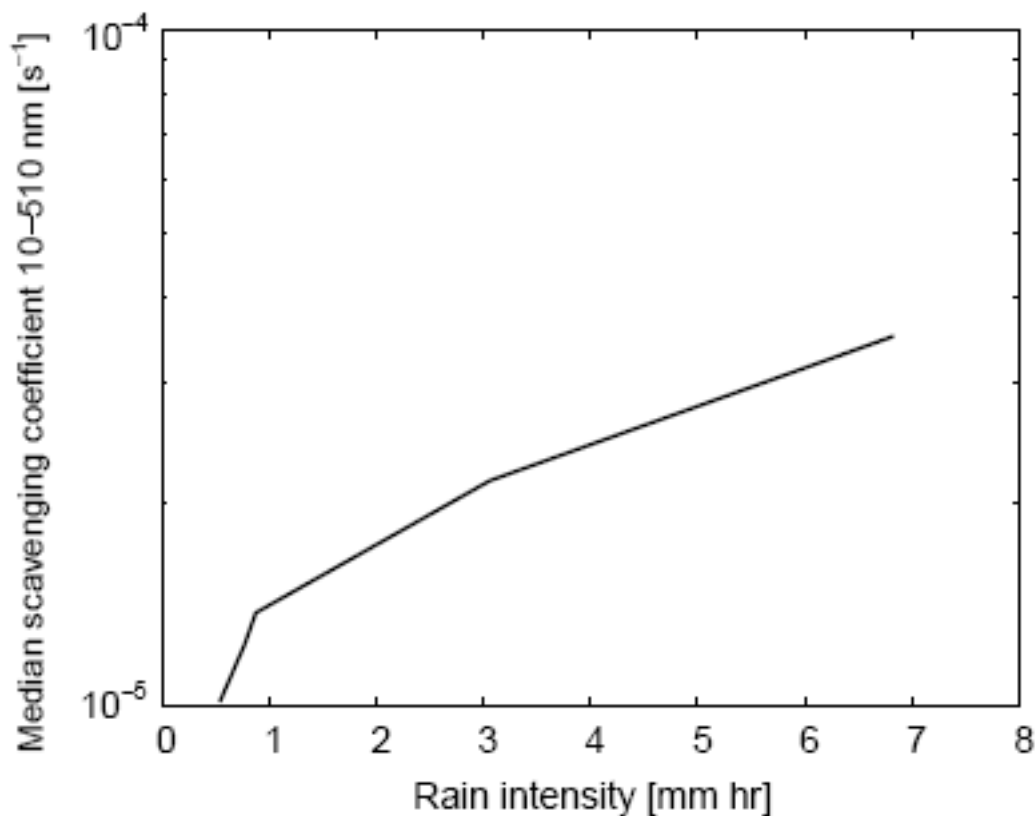
Variation de E en fonction de  $d_p$   
pour  $D_g = 0,1$  mm

(*B. Sportisse Atmospheric Environment, 41, 2007, 2683-2698*)



Variation de E en fonction de  $d_p$   
pour différents diamètres de gouttes

# Dépôts humides : exemple de résultats expérimentaux



*L. Laakso et al, Atmospheric Environment 37, 2003, 3605-3613*

# Dépôts humides

Lien entre fréquence de captage,  $\Lambda$ , et le « wash-out ratio »  $Wr$ .

$$Wr = \frac{\text{Activité dans les précipitations}}{\text{Activité dans l'air}} \text{ en Bq.l}^{-1} / \text{Bq.m}^{-3}$$



- ❑  $Wr = \Lambda H / p_0$  avec  $H$  hauteur de chute des gouttes
- ❑ *Néanmoins, ce lien théorique est complexe à utiliser du fait des difficultés à connaître  $Wr$ ,  $H$  et  $p_0$  sur des périodes de pluie bien définies. De plus, le  $Wr$  expérimental intègre le captage dans et sous le nuage.*

# Dépôts humides : lessivage

- Approfondir le lien entre modélisation et acquisition de données sur le terrain ( $p_0$ ,  $Dg$ ,  $d_p$ ,  $n(d_p)$ ,  $Wr$  et  $\Lambda$ ) ; évaluer l'importance des mécanismes phorétiques (électro, thermo et diffusio)
- Etudier l'apport d'expériences à caractère analytique.
- Analyser la transposition aux modèles opérationnels (travaux en collaboration avec le CEREAs).

# Mise en suspension des aérosols

➤ Mécanismes mis en évidence car les niveaux d'activités diminuent :



➤ Processus mis en jeu :

- ❑ mise en suspension aérodynamique (locale, poussières sahariennes),
- ❑ feux de biomasse.



# Mise en suspension des aérosols

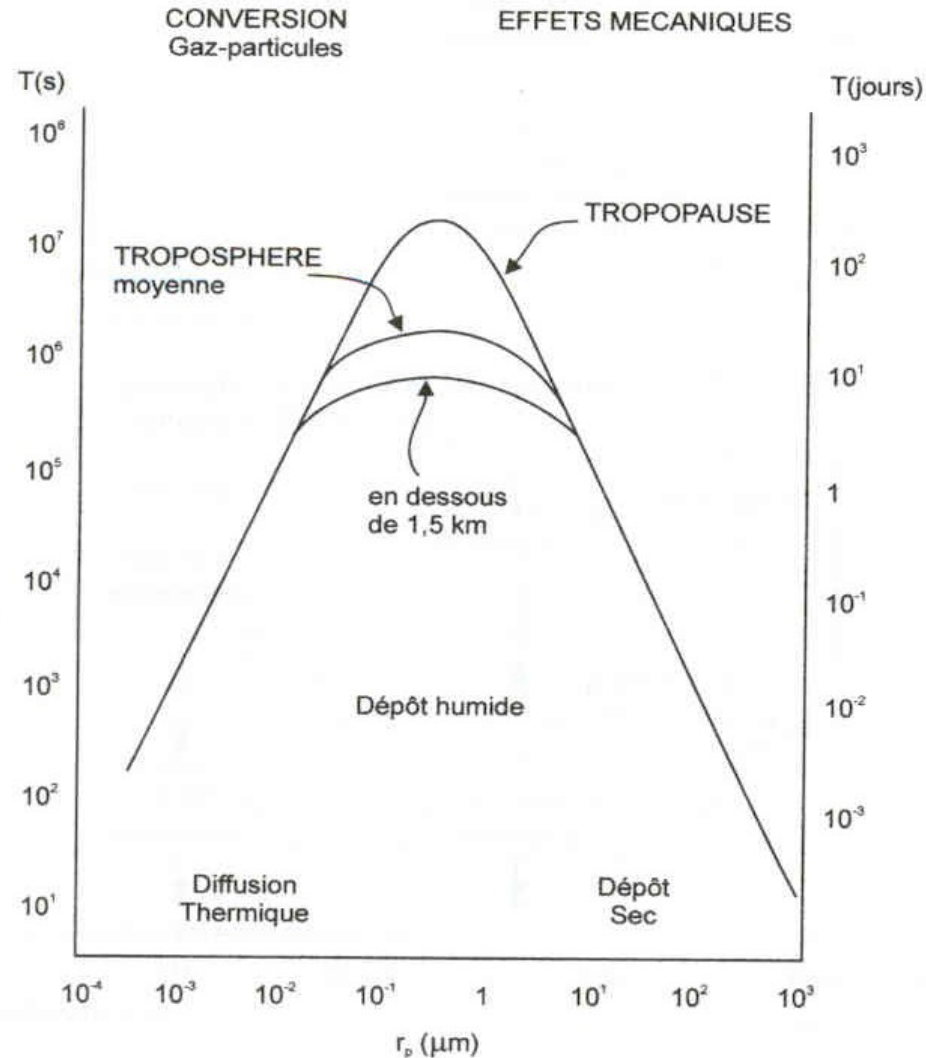
- Mécanismes complexes dont la modélisation n'est pas aboutie complètement du fait de la difficulté à accéder à des données fiables :
  - ❑ paramètres importants : vitesse de frottement, diamètre des aérosols, hauteur de rugosité, temps...;
  - ❑ la fréquence de mise en suspension est généralement de la forme :

$$\Lambda_s = A \times u_*^a \times d_p^b / t^c \times z_0^d$$

avec le flux par unité de surface et de temps,  $F$ , qui est relié à la concentration surfacique  $D_0$  par l'intermédiaire de  $\Lambda_s$  :

$$F = \Lambda_s D_0$$

# Temps de séjour des aérosols dans l'atmosphère



Renoux, Boulaud 1998, d'après R. Jaenicke 1988

# CONCLUSIONS

- La compréhension des différents mécanismes est qualitativement satisfaisante.
- La description fine permettant d'aboutir à une modélisation détaillée est en cours et beaucoup reste à faire.

# Remerciements

Denis Maro, Olivier Connan, Pierre Damay, *IRSN/DEI/SECRE/LRC* ;

Philippe Calmon, *IRSN/DEI/SECRE/LME* ;

Olivier Masson, *IRSN/DEI/SESURE/LERCM* ;

Olivier Isnard, *IRSN/DEI/SESUC/BMTA*

François Gensdarmes, *IRSN/DSU/SERAC/LPMA* ;

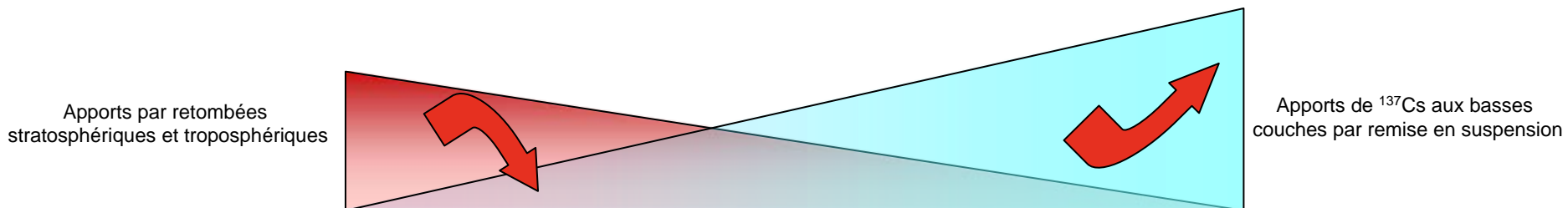
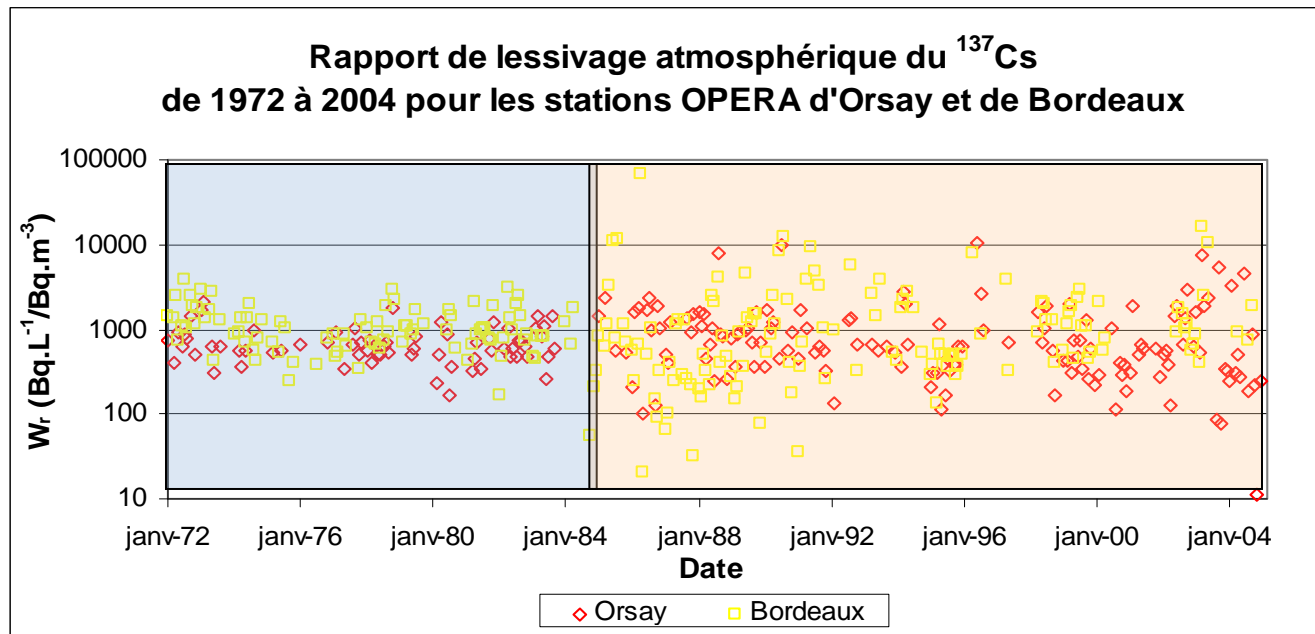
# Dynamique de la coagulation d'un aérosol monodispersé

<i>Concentration initiale</i> $\text{cm}^{-3}$	<i>Temps de doublement</i> <i>du diamètre</i>	<i>Temps de diminution de moitié de</i> <i>la concentration</i>
$10^{14}$	140 $\mu\text{s}$	20 $\mu\text{s}$
$10^{12}$	$1,4 \cdot 10^{-2}$ s	$2 \cdot 10^{-3}$ s
$10^{10}$	1,4 s	0,2 s
$10^8$	140 s	20 s
$10^6$	4 h	33 minutes
$10^4$	16 jours	55 h
$10^2$	4 ans	231 jours

Coefficient d'agglomération =  $5 \times 10^{-16} \text{ m}^3/\text{s}$  (Renoux, Boulaud 1998)



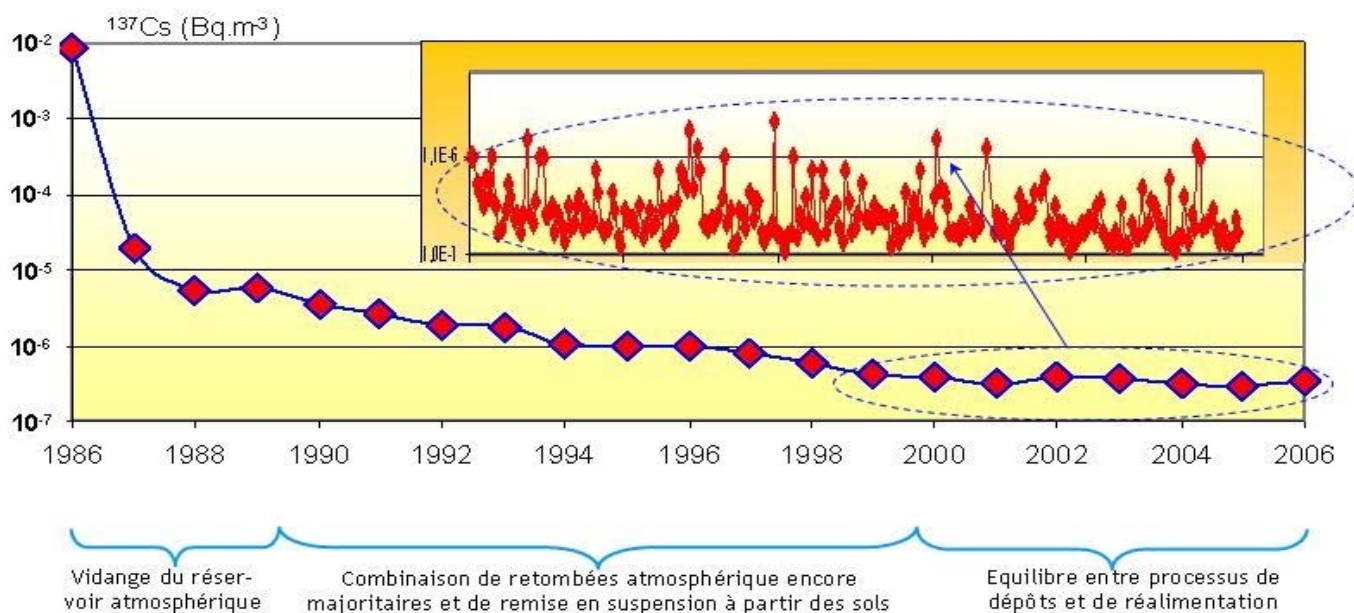
# Dépôts humides



*D'après O. Masson et al 2006*



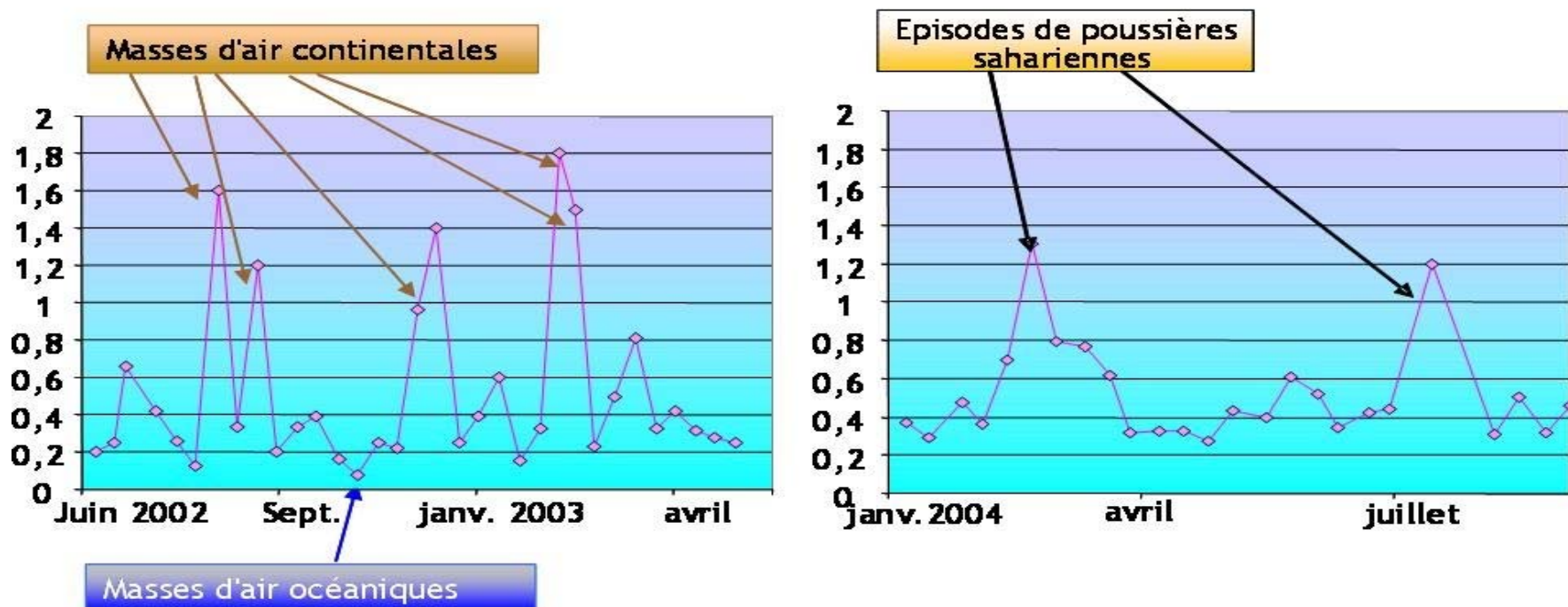
# Evolution du Cs 137 en fonction du temps



*D'après O. Masson et al 2008*

# Evolution du Cs 137 en fonction du temps

Activité en  $^{137}\text{Cs}$  de l'air ( $\mu\text{Bq}/\text{m}^3$ )



*D'après O. Masson et al 2008*

