

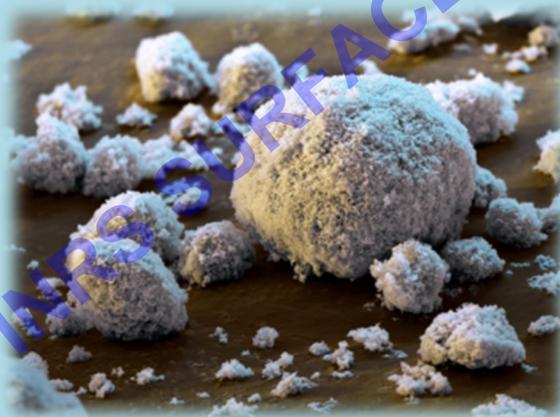
# SURFACES CONTAMINÉES AU TRAVAIL

JOURNÉE  
TECHNIQUE

Comment  
mesurer  
pour  
prévenir?



## Mécanismes de dépôt des aérosols sur les surfaces et de remise en suspension



Emmanuel Belut, INRS

*Jeudi 8 avril 2021*

# SURFACES CONTAMINÉES AU TRAVAIL

JOURNÉE  
TECHNIQUE

Comment  
mesurer  
pour  
prévenir?



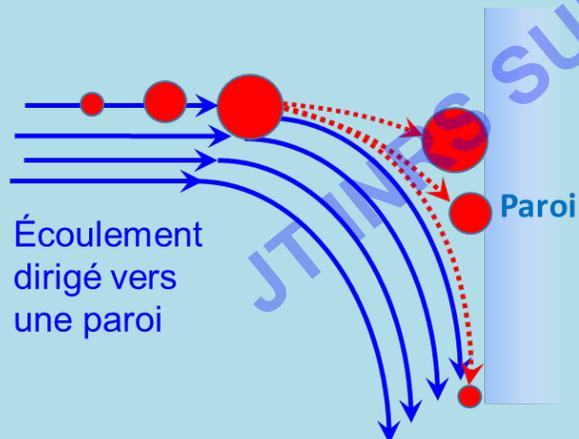
## 1) le transport des aérosols vers les surfaces

pour contaminer les surfaces, les aérosols  
doivent d'abord y être transportés

# Mécanismes de transport : l'omniprésence du transport par les écoulements d'air

- Toutes les particules inhalables (i.e.  $< 100\mu\text{m}^1$ ) tendent à suivre les écoulements d'air (trainée aérodynamique)
- Ce mode de transport est toujours présent dans les atmosphères de travail
- Les particules ajustent leur trajectoire sur celle de l'air ambiant avec un **temps de retard** qui croît avec le **carré de leur dimension** et avec leur **densité**
- Si un écoulement d'air est dévié par une surface → dépôt par « impaction inertielle »
  - Particules  $> 1\ \mu\text{m}$  : « inertielles » sujettes à impaction
  - Particules  $< 1\ \mu\text{m}$  : « non inertielles », suivent les écoulements
  - Dépôt « différentiel » en fonction de la taille

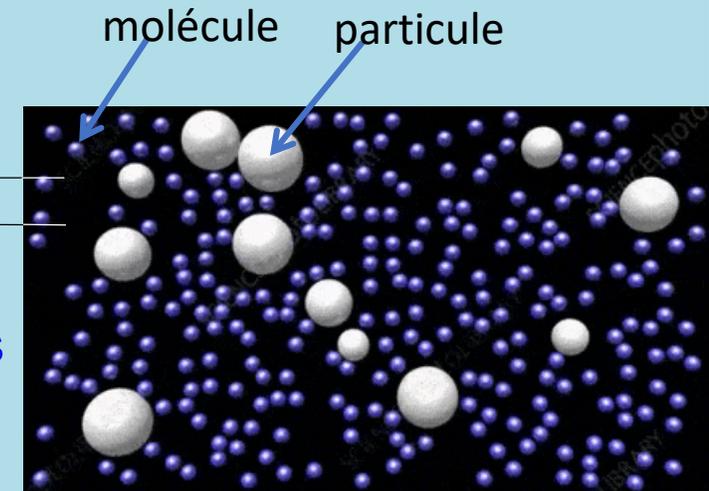
approximativement



# Mécanismes de transport : transport par diffusion brownienne

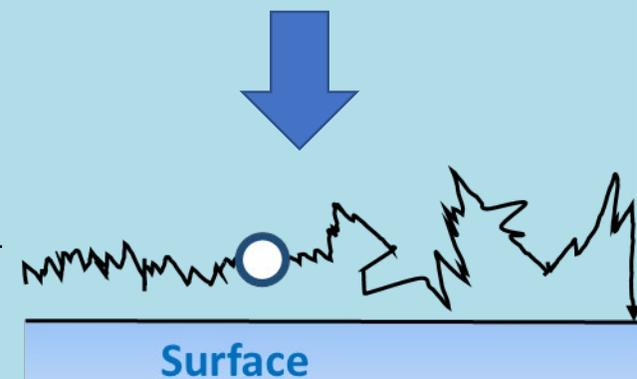
→ pour les particules de moins de quelques centaines de nanomètres

- Air = gaz : molécules dispersées en mouvement
  - Caractérisé par le libre parcours moyen  $l$  ( $\sim 70\text{nm}$ )
  - Si la dimension des particules se rapproche de  $l$  :
    - sensibilité au chaos moléculaire
      - mouvement erratique « brownien » sous les impacts
    - s'ajoute au mouvement d'ensemble dû aux mouvements d'air
    - peut transporter certaines particules vers une surface

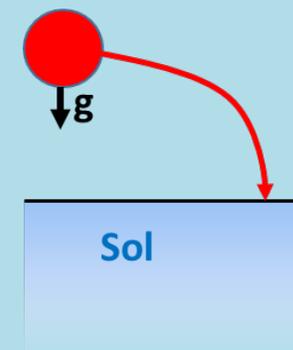


↓ pour mémoire ↓

Diamètre des particules	5 nm	100 nm	1 μm	10 μm
	x 200 000	x 600		x 0.4
déplacement typique par seconde [m]	1.1 mm	64 μm	13 μm	4 μm



# Mécanismes de transport : la sédimentation



- → Equilibre poids / résistance de l'air (traînée aérodynamique)
- Dirigée vers le sol (contamination des surfaces exposées par le dessus)
- Caractérisée par la vitesse de sédimentation en air immobile

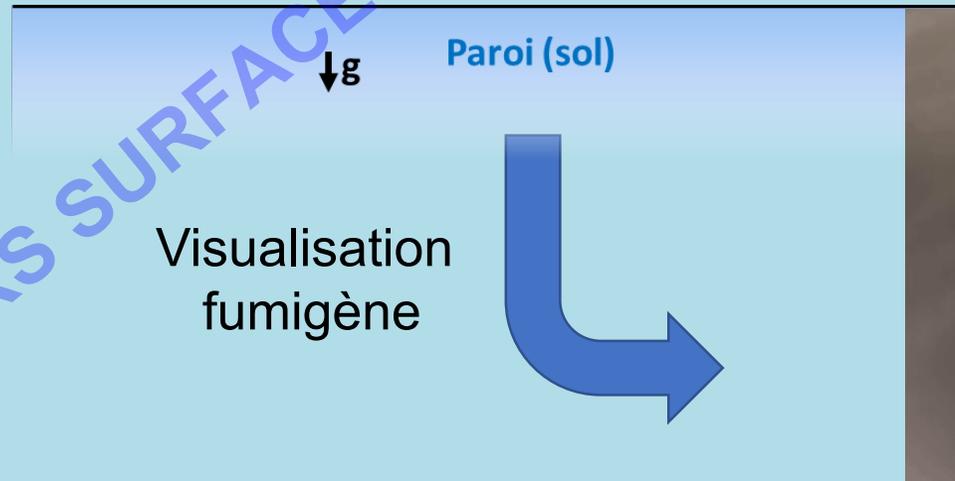
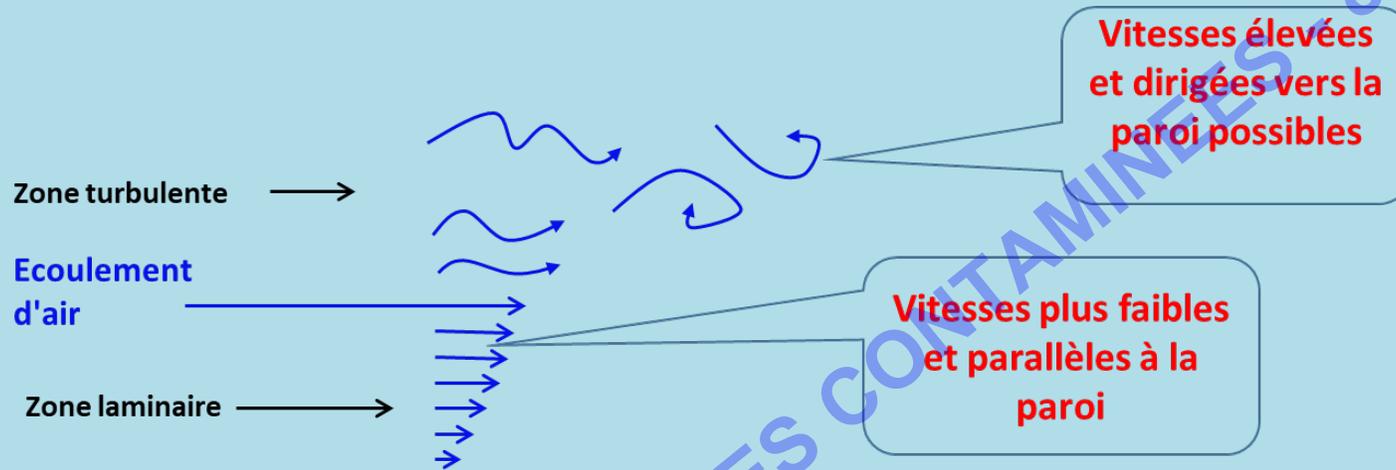
Pour mémoire →

Diamètre des particules	100 nm	1 µm	10 µm	100 µm
Vitesse de sédimentation	négligeable...	35 µm/s	3 mm/s	25 cm/s

- Ordre de grandeur des vitesses d'air en atmosphère « calme » : **20 cm/s !!**
- au-delà d'une dizaine de µm, les particules sédimentent généralement très rapidement
- En dessous de 1 µm (~) la sédimentation n'est plus un mode de dépôt efficace !!

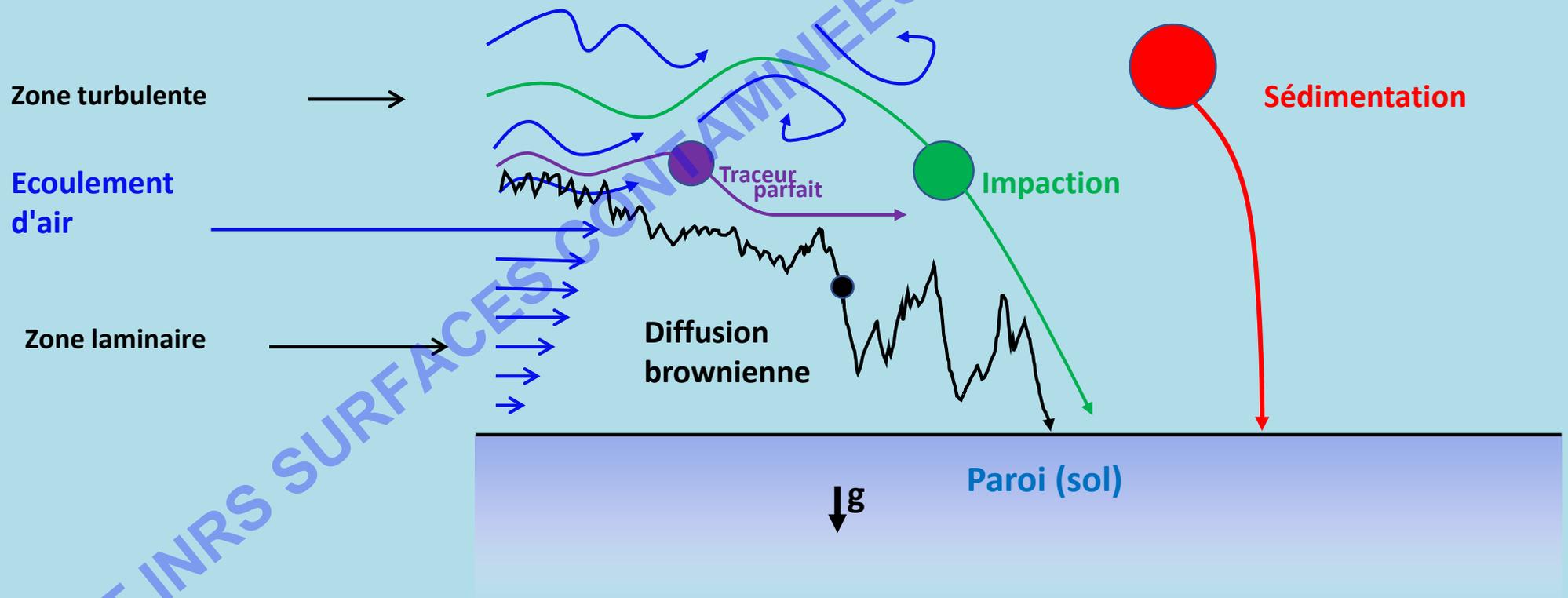
# Bilan du transport aérien, de la diffusion et de la sédimentation sur le dépôt des aérosols

- Allure de l'écoulement de l'air en proche paroi



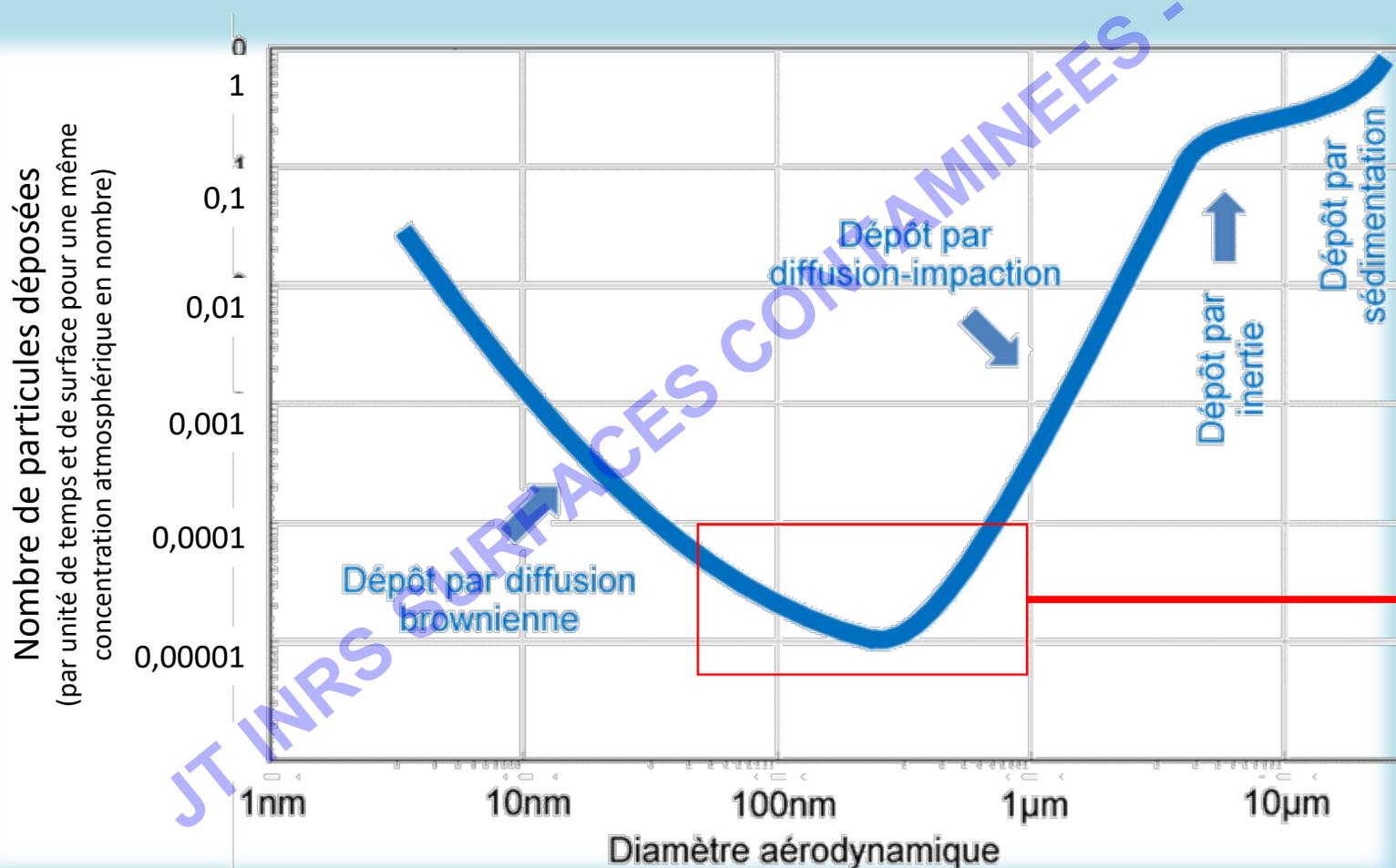
# Bilan du transport aérien, de la diffusion et de la sédimentation sur le dépôt des aérosols

- comportement global pour différentes tailles de particules :



# Bilan du transport aérien, de la diffusion et de la sédimentation sur le dépôt des aérosols

- Conséquence 1 : influence de la dimension des aérosols sur leur dépôt

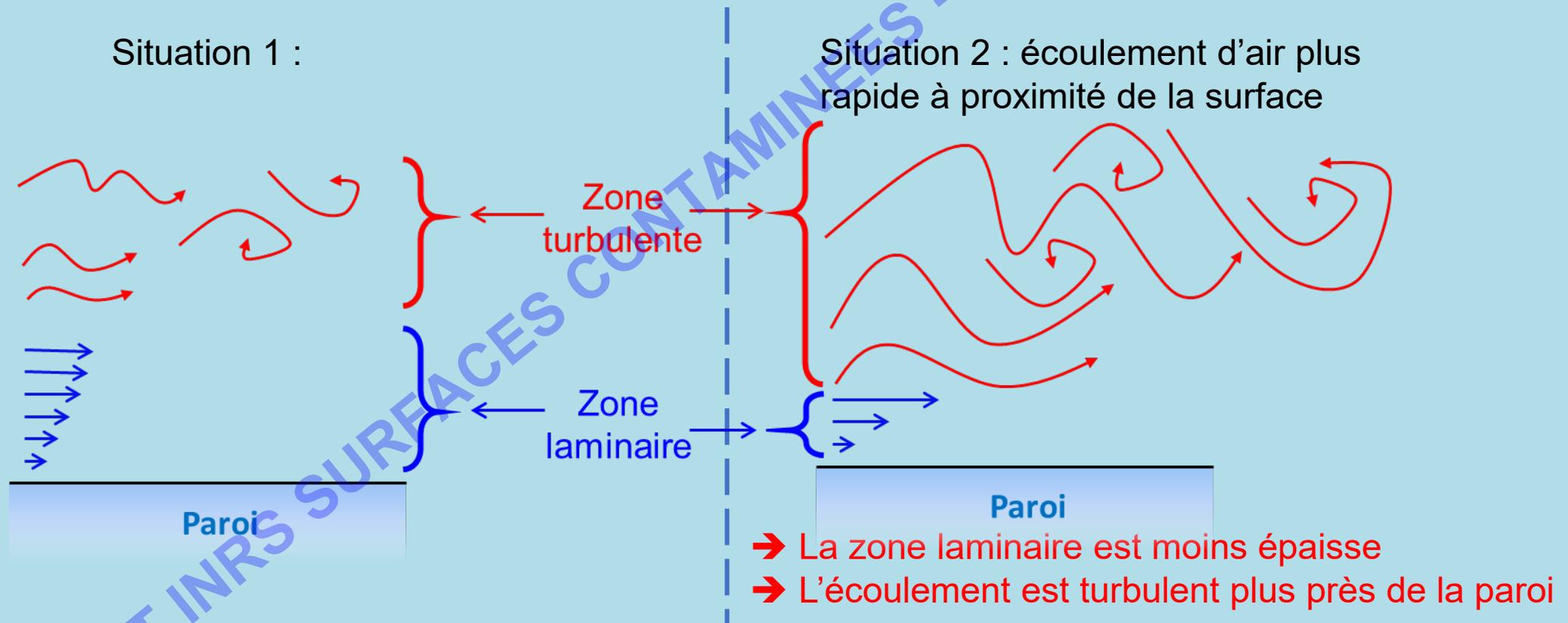


→ Exemple pour une surface horizontale exposée par le dessus (sol, table,...)

**Particules les moins déposables**

# Bilan du transport aérien, de la diffusion et de la sédimentation sur le dépôt des aérosols

- Conséquence 2 : influence d'une vitesse d'air accrue sur le dépôt

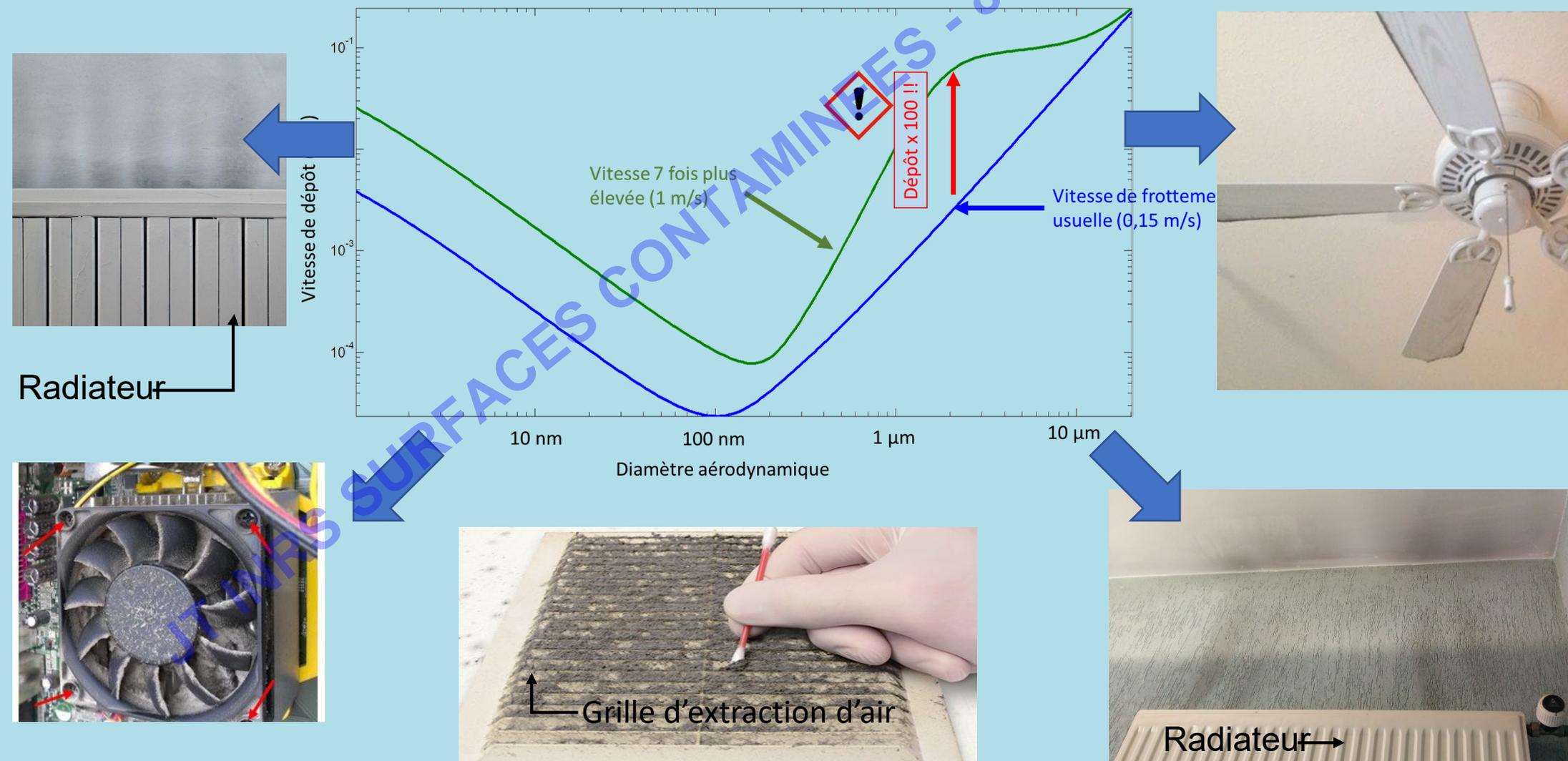


→ si l'air est accéléré, des particules moins inertielles (plus petites ou moins denses) pourront être déposées

→ des particules qui se déposent peu au niveau des zones d'écoulement lent se déposent dans les zones d'écoulement rapide

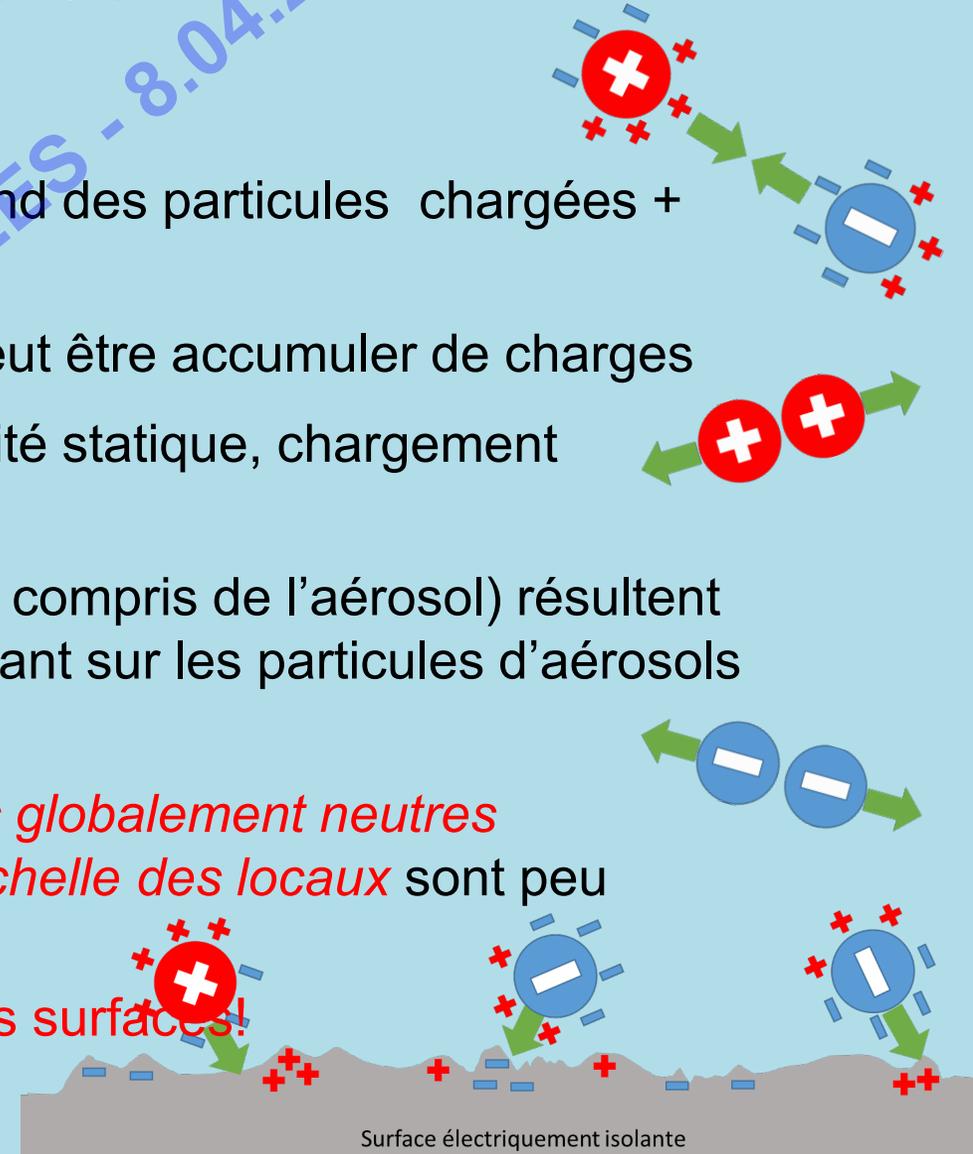
# Bilan du transport aérien, de la diffusion et de la sédimentation sur le dépôt des aérosols

- Conséquence 2 : influence d'une vitesse d'air accrue sur le dépôt



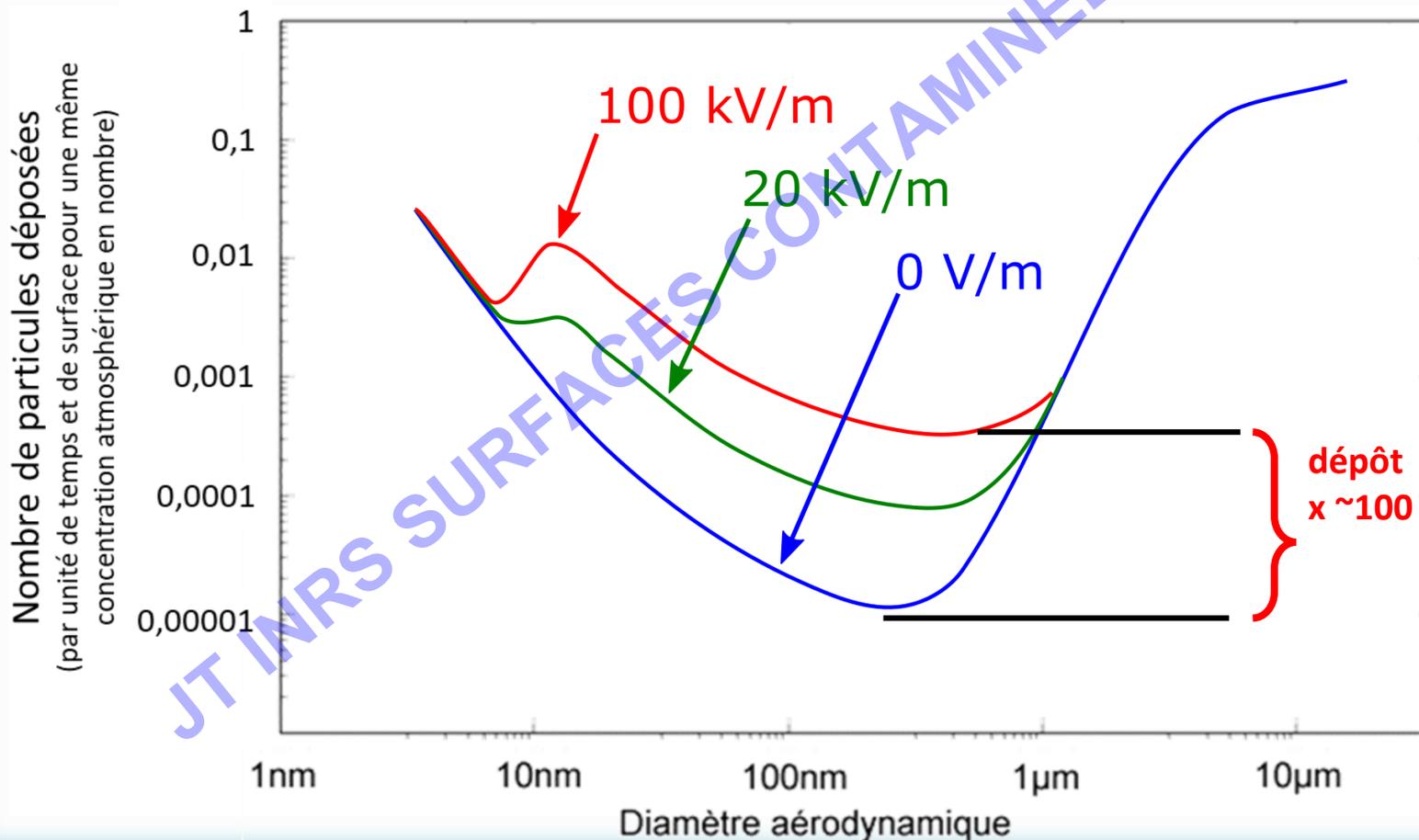
# Transport électrodynamique des aérosols vers les surfaces

- Aérosols toujours chargés électriquement (ou presque), parfois intentionnellement (procédé)
  - charge + ou - : déficit ou excès d'électrons
- Même s'il est globalement neutre, l'aérosol comprend des particules chargées + ou -
- Plus une particule d'aérosol est grande, plus elle peut être accumuler de charges
- les surfaces sont le plus souvent chargées (électricité statique, chargement intentionnel ou non)
- L'ensemble des charges présentes dans un local (y compris de l'aérosol) résultent en un champ électrique variable spatialement agissant sur les particules d'aérosols chargées en fonction de leur signe
- *Pour les champs électriques usuels et des aérosols globalement neutres électriquement*, les mouvements des aérosols *à l'échelle des locaux* sont peu affectés par les effets électrodynamiques
  - **Effet notable voire prépondérant à proximité des surfaces!**



# Transport électrodynamique des aérosols vers les surfaces

- les interactions électrodynamiques augmentent "toujours" les dépôts sur les surfaces
  - Exemple de l'effet d'un champ électrique sur le dépôt d'un aérosol globalement neutre



## Champs électriques usuels :

- À 30m d'une ligne électrique : 100V/m
- À 10cm baguette chargée : 200 V/m
- Claquage : 1 à 4 MV/m

## Autres mécanismes de transport des aérosols vers les surfaces

- De nombreux autres effets peuvent conduire au dépôt: (généralement moins influents)
  - *Thermophorèse* : transport des zones chaudes vers les zones froides (augmentation des dépôt sur les parois plus froides que l'ambiance) ;
  - *Diffusiophorèse* : transport dû à une diffusivité variable de l'air, par exemple en présence de **variations de concentration en vapeurs** (par exemple a proximité de films liquides sur les surfaces) ;
  - *Turbophorèse* : transport des particules des zones d'air agitées vers les zones moins agitées ;
  - *Photophorèse* : migration des aérosols due à un éclairage intense
  - ....

# SURFACES CONTAMINÉES AU TRAVAIL

JOURNÉE  
TECHNIQUE

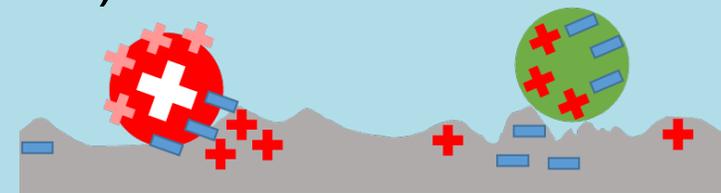
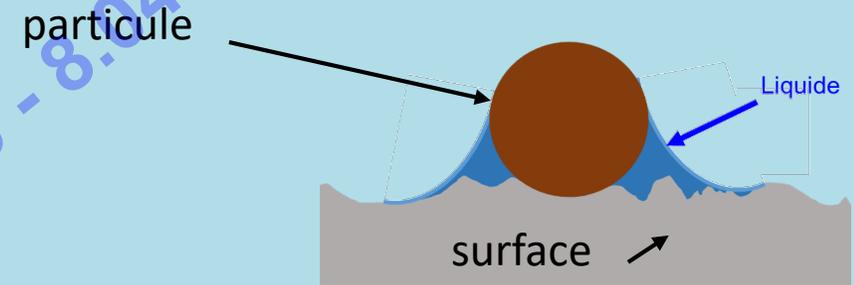
Comment  
mesurer  
pour  
prévenir?



## 2) l'adhésion aux surfaces des aérosols et leur remise en suspension

# Mécanismes d'adhésion des aérosols sur les surfaces 1/2

- **Magnétisme** (peu fréquent en pratique)
- **Tension superficielle**
  - particules hygroscopiques
  - ou en présence de films liquides ou gouttelettes sur les surfaces
- **Interactions électrodynamiques** :
  - Forces de **van der Waals** (échelle moléculaire)
  - Forces électrostatiques, **force image** (particules chargées)
- **Pesanteur** (peu influente sauf particules  $> 100 \mu\text{m}$ )
  - Suivant orientation de la surface



Intensité croissante

# Mécanismes d'adhésion des aérosols sur les surfaces 2/2

- Remettre en suspension suppose de supplanter ces mécanismes par une action extérieure
- Effet de la rugosité des surfaces : augmentation ou diminution de la surface de contact
  - **Hauteur de rugosité plus fine que la taille des particules :**  
diminution forte de l'adhésion
  - **Hauteur de rugosité comparable à la taille des particules :**  
augmentation forte de l'adhésion

# Remise en suspension des aérosols déposés & transfert de la contamination sur une autre surface

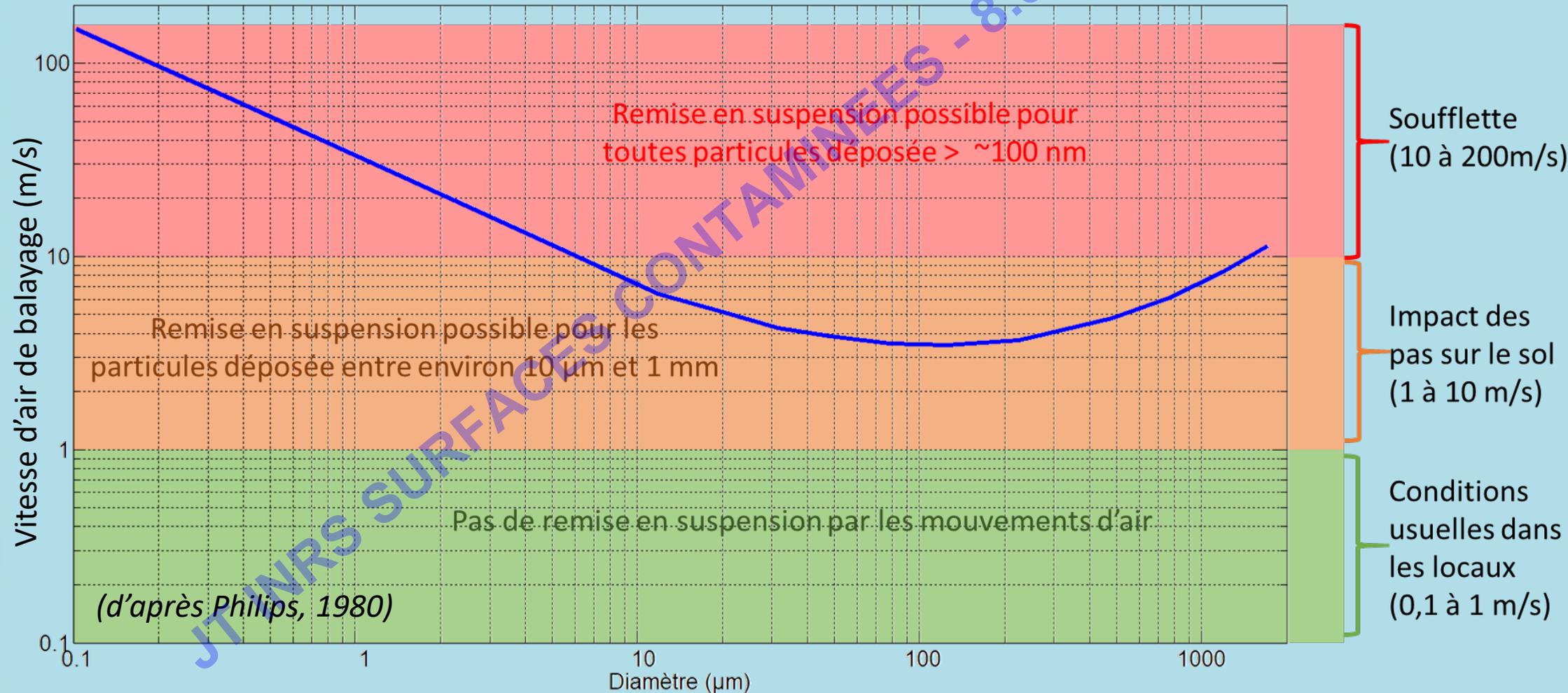
Trois principaux mécanismes :

- 1) Courant d'air très intense entraînant une force de trainée (déplacement) et de portance (arrachement) sur les particules déposées :
  - Les particules d'une taille voisine de  $100\mu\text{m}$  sont les plus facilement remises en suspension
- 2) Mise en contact d'une surface possédant une affinité de van der Waals supérieure pour les particules déposées
  - constante de Hamaker ou surface de contact plus grandes
- 3) Mise en contact d'une surface humide (adhésion par tension superficielle)

# Remise en suspension par soufflage des aérosols déposés

→ En l'absence d'adhésion par tension de surface

Vitesse d'air requise pour mettre en suspension une particule déposée d'un diamètre donné

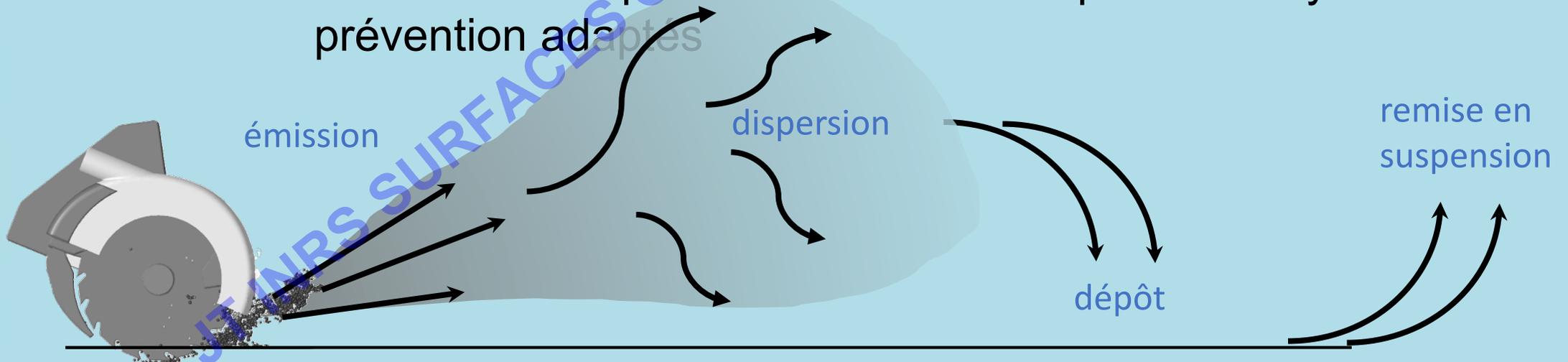


# Conclusion

- Introduction aux mécanismes de dépôt des aérosols sur les surfaces et de remise en suspension
- Des mécanismes complexes, très dépendants :
  - des propriétés des particules contaminantes considérées (diamètre, densité, charge électrique, composition),
  - des conditions ambiantes (écoulements d'air, configuration, hygrométrie, température),
  - des propriétés des surfaces (rugosité, état de charge, orientation, composition).

## Un peu de prévention pour finir

- Avant la contamination des surfaces, il y a l'émission du polluant et sa dispersion
- Il est toujours beaucoup plus facile de prévenir **d'abord l'émission** (captage la source) **puis la dispersion** que le dépôt!
  - Agir à la source en évitant la dissémination
  - Réduire au minimum les concentrations atmosphériques et les durées d'exposition des surfaces par des moyens de prévention adaptés





**Merci de votre attention !**

JT INRS SURFACES CONTAMINEES - 8.04.2021