



QUALITÉ DE L'AIR INTÉRIEUR DANS LES BÂTIMENTS. SÉANCE 3

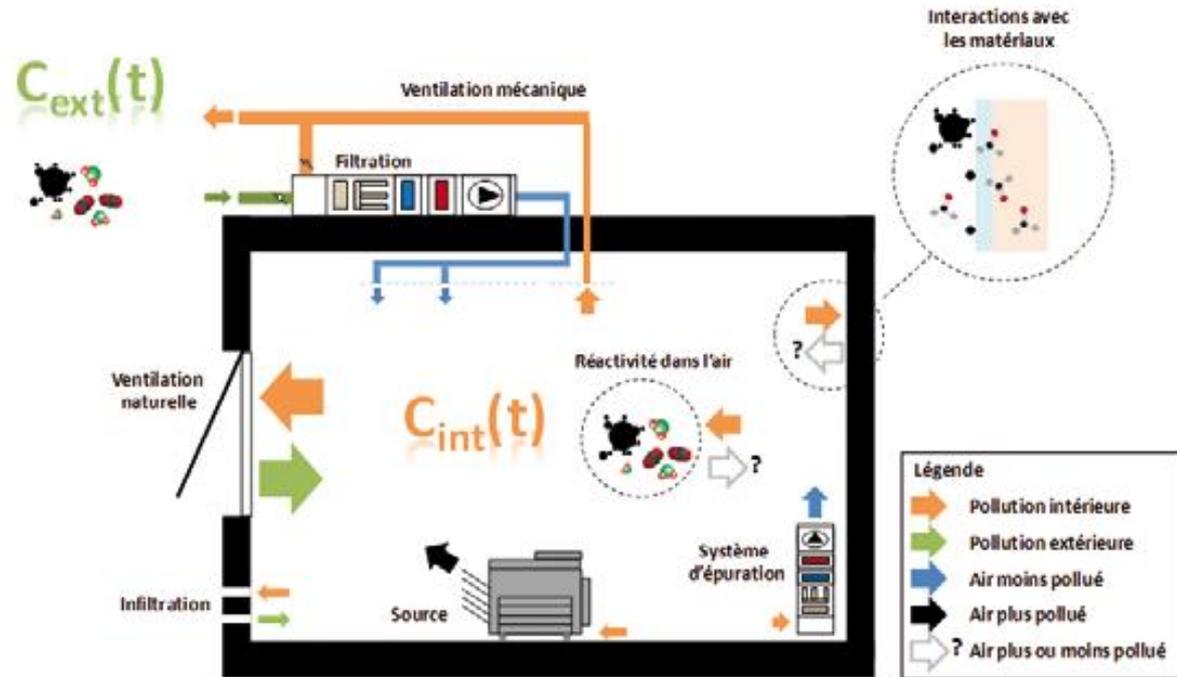
Phénoménologie et modes de transport des
polluants.

Thierry DUFORESTEL, EDF R&D, Janvier 2023



LA CONFIGURATION CLASSIQUE

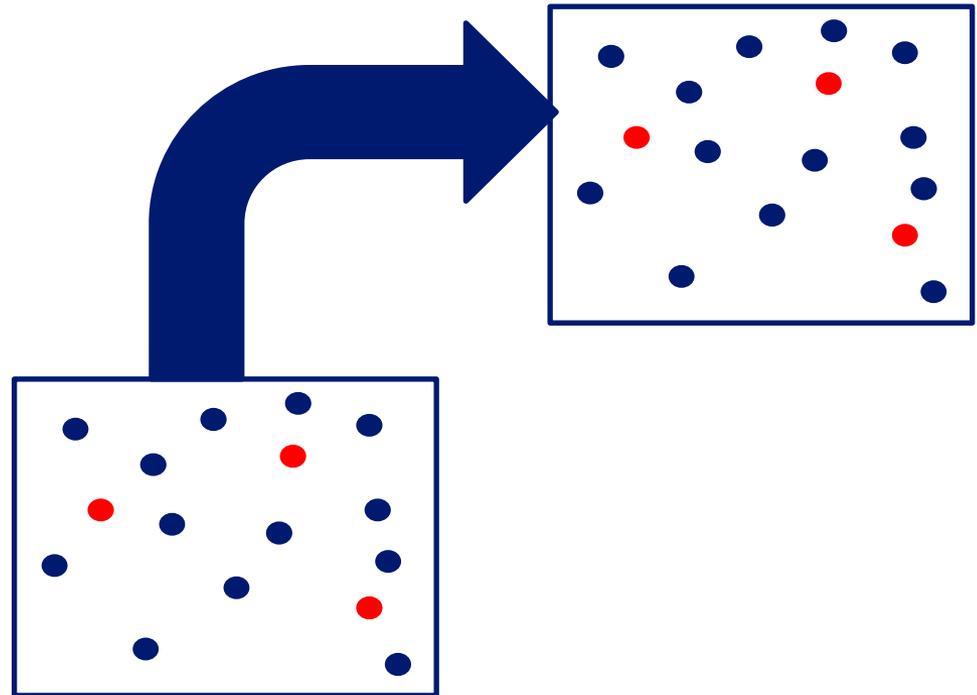
- **Entrées d'air :**
 - Depuis l'extérieur.
 - Depuis les autres volumes
 - Depuis un système de traitement
- **Sorties d'air :**
 - Vers l'extérieur
 - Vers les autres volumes
 - Vers le système de traitement
- **Productions internes**
 - Activités
 - Métabolisme
 - Ameublement ...
- **Interactions avec les matériaux**
 - Parois
 - Ameublement
- **Interactions entre polluants**



A chaque instant, la concentration des polluants dans chaque volume évolue

MODE DE TRANSPORT 1 : L'ADVECTION

- L'advection du gaz
 - Mouvement d'ensemble sous gradient de pression
 - Ecoulement visqueux (Dans une conduite, écoulement de Poiseuille)
 - Souvent le seul phénomène considéré en QAI.
 - Chaque composant contribue en proportion de sa fraction massique



- Le débit massique du gaz s'exprime le plus souvent sous la forme d'une loi débit-pression
- On obtient le débit de chaque polluant en multipliant le débit total par la fraction massique du polluant

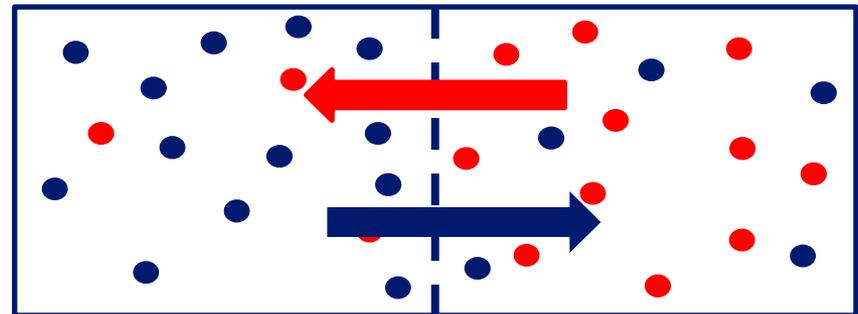
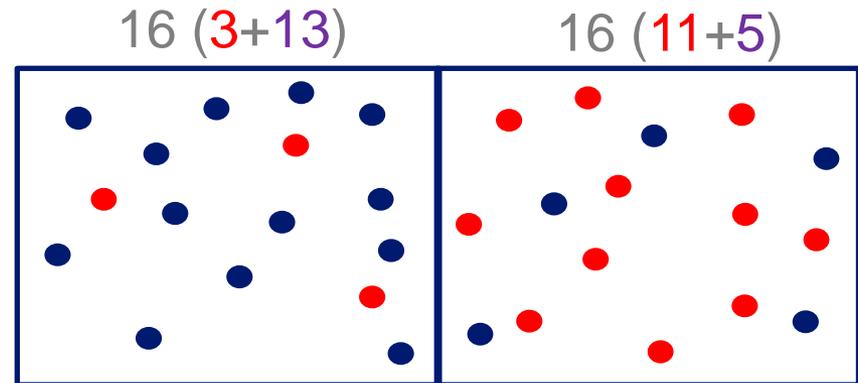
$$\dot{m}_g = K_g \Delta P_g^n$$

$$\dot{m}_i = \frac{C_i}{C_g} K_g \Delta P_g^n$$

MODE DE TRANSPORT 2 : DIFFUSION GAZEUSE

- La diffusion gazeuse

- Pour tous les composants du gaz
- Moteur : l'unification des compositions gazeuses
- Frein : les chocs (moléculaires, entre particules)
- Sans mouvement apparent du gaz
- Mouvement individualisé pour chaque composant du gaz.
- Ce mode de transfert existe même dans un gaz immobile.



- La représentation courante du flux diffusif ($\text{kg}/\text{m}^2.\text{s}$) intègre un gradient de masse volumique partielle.

$$\Phi_i = -D_i \vec{\nabla} C_i \quad D_i (\text{m}^2 / \text{s})$$

- La représentation la plus exacte (mais peu courante) intègre un gradient de fraction molaire ou massique

$$\Phi_i = -D_i^* \vec{\nabla} \frac{p_i}{p_g} \quad D_i^* (\text{kg} / (\text{m}.\text{s}))$$

MODE DE TRANSPORT GLOBAL

- Les deux modes de transport se combinent :
 - Réorganisation moléculaire et particulaire dans un gaz en mouvement.
- Mais encore une fois, la diffusion est très souvent ignorée en QAI.

$$\dot{m}_i = \frac{C_i}{C_g} K_g \Delta P_g^n - D_i S \frac{dC_i}{dx}$$

PRODUCTION INTERNE DE POLLUANTS

- **C'est un point important pour deux raisons :**
 - Définition des termes sources pour l'étude des pollutions intérieures.
 - Permet d'identifier les polluants qui peuvent être traités par dilution (renouvellement d'air).
- **Dans les études, on représente les productions sous forme de scénarios (souvent sous forme de paliers de production).**
- **La source de ces scénarios est le plus souvent un mix entre des mesures d'émissions (qui donne la valeur du palier en mg/h ou µg/h) et des comportements (qui donnent la durée des paliers).**
 - Pour la partie mesure : Renouvellement d'air fixé, mesure des concentrations et identification de la production par la méthode des gaz traceurs.
- **Par exemple :**
 - Emissions dues aux produits d'entretien
 - Emissions dues à la cuisine



RAPPORT
N° INERIS-DRC-11-115731-06669B-

22/11/2011

Deuxième rapport préliminaire en vue de
l'étiquetage des produits de grande
consommation

Classement des bougies et des encens en
fonction des émissions de composés
organiques volatils et de particules dans l'air
intérieur

LES INTERACTIONS ENTRE POLLUANTS

■ Polluants gazeux.

- Interactions chimiques.
- Un mode de représentation classique qui englobe cinétique et stoechiométrie.

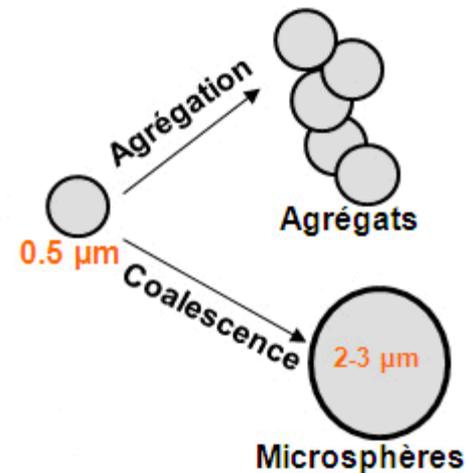
$$\dot{m}_i = \sum_{j=1}^{n_r} K_j \prod_{k=1}^{n_{comp}} C_k$$

■ Polluants particulaires inertes.

- Interactions physiques (coalescence/agrégation/division).
- Très peu étudié et abordé en pratique.

■ Micro-organismes.

- Interactions biologiques.
- Intégrant naturellement les problèmes de nourriture, de conditions de vie et de reproduction



LES INTERACTIONS ENTRE POLLUANTS

▪ Polluants gazeux.

- Interactions chimiques.
- Un mode de représentation classique qui englobe cinétique et stoechiométrie.

▪ Polluants particulaires inertes.

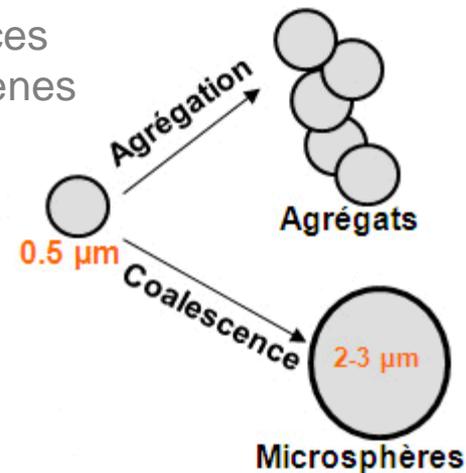
- Interactions physiques (coalescence/agrégation/division).
- Très peu étudié et abordé en pratique.

▪ Micro-organismes.

- Interactions biologiques.
- Intégrant naturellement les problèmes de nourriture, de conditions de vie et de reproduction

$$\dot{m}_i = \sum_{j=1}^{n_r} K_j \prod_{k=1}^{n_{comp}} C_k$$

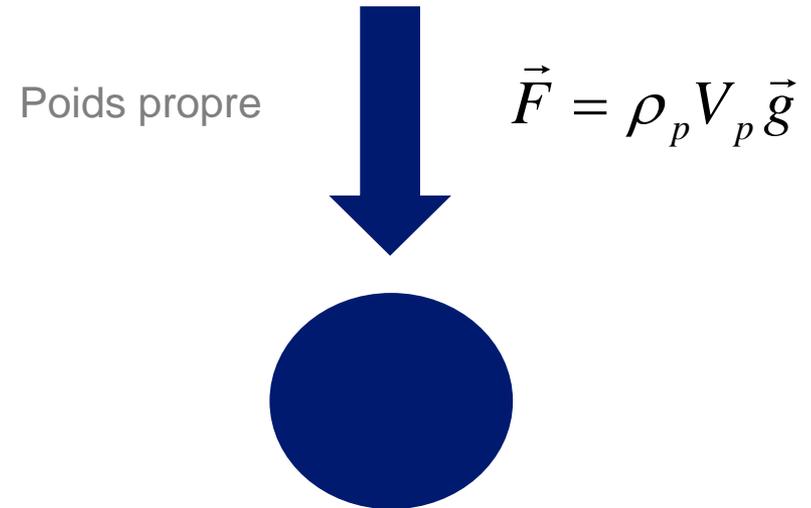
Et les combinaisons de tous ces phénomènes



Encore beaucoup à apprendre sur ces sujets

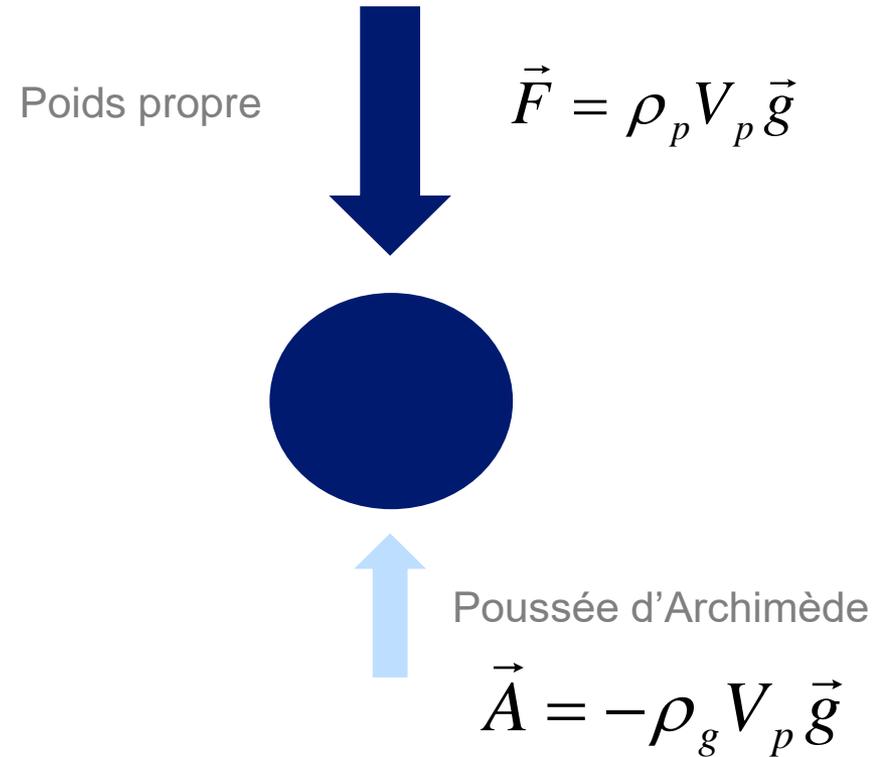
INTERACTIONS PARTICULES / MATÉRIAUX. VISION PHÉNOMÉNOLOGIQUE

- Particule en suspension dans l'air.



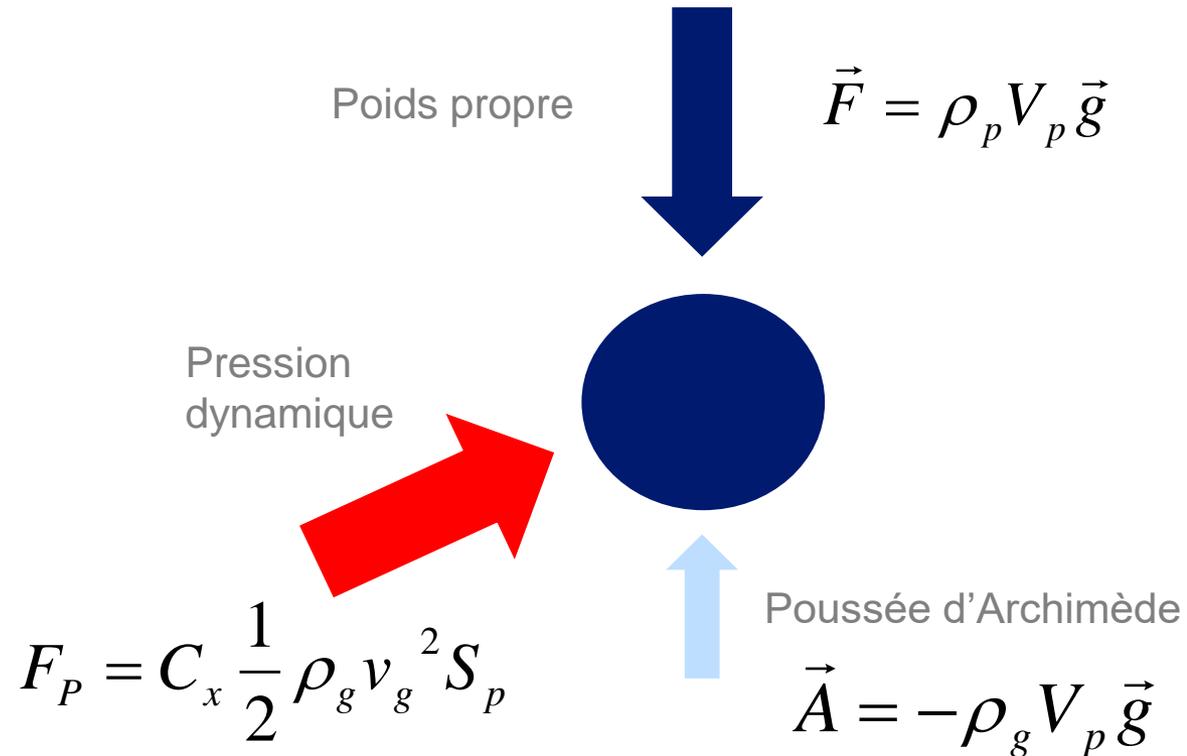
INTERACTIONS PARTICULES / MATÉRIAUX. VISION PHÉNOMÉNOLOGIQUE

- Particule en suspension dans l'air.



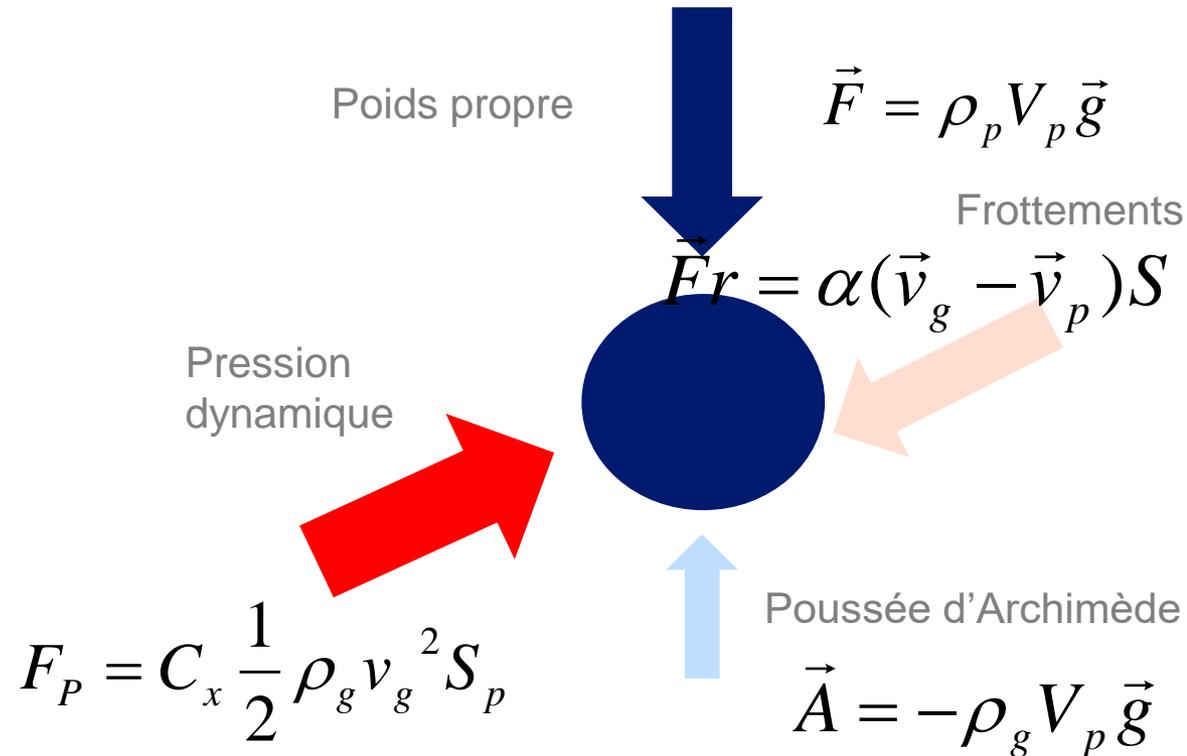
INTERACTIONS PARTICULES / MATÉRIAUX. VISION PHÉNOMÉNOLOGIQUE

- Particule en suspension dans l'air.



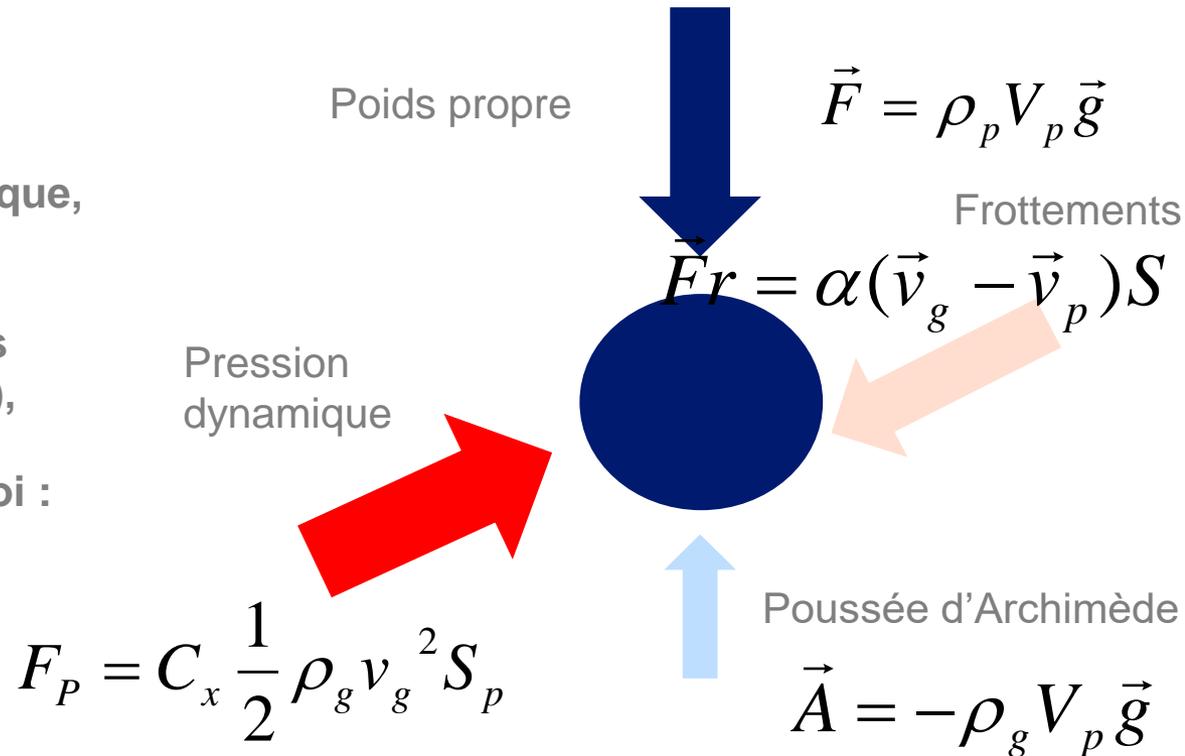
INTERACTIONS PARTICULES / MATÉRIAUX. VISION PHÉNOMÉNOLOGIQUE

- Particule en suspension dans l'air.



INTERACTIONS PARTICULES / MATÉRIAUX. VISION PHÉNOMÉNOLOGIQUE

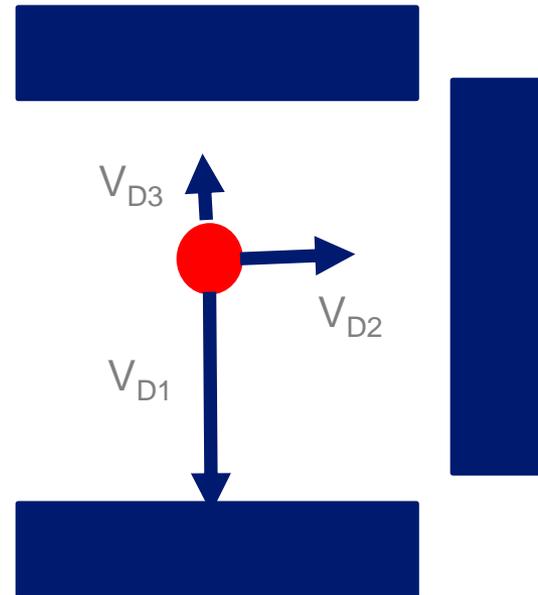
- Comportement de dépôt et de remise en suspension
- Un comportement fortement influencé par la taille (en pratique, le diamètre) de la particule,
- Par les conditions aérodynamiques locales (activités, aération, ...),
- Et par la disposition de la paroi :
 - Horizontale (type sol).
 - Horizontale (type plafond).
 - Verticale.
 - ... et toutes les orientations intermédiaires.



INTERACTIONS PARTICULES / MATÉRIAUX.

VISION PRATIQUE

- La modélisation pratique (que vous reverrez plus en détail plus tard) est basée sur la notion de dépôt des particules sur les surfaces
- On définit alors une vitesse de dépôt V_D qui ne dépend que de la taille des particules et de l'orientation de la parois (pour un type de local donné)
- Le flux de particules déposées par unité de surface ($-/m^2.s$) est le produit de la vitesse de dépôt et de la densité volumique de particules
- En pratique, le dépôt est assez bien étudié et l'on trouve des méthodes de mesure et des données bibliographiques pour caractériser ce paramètre.



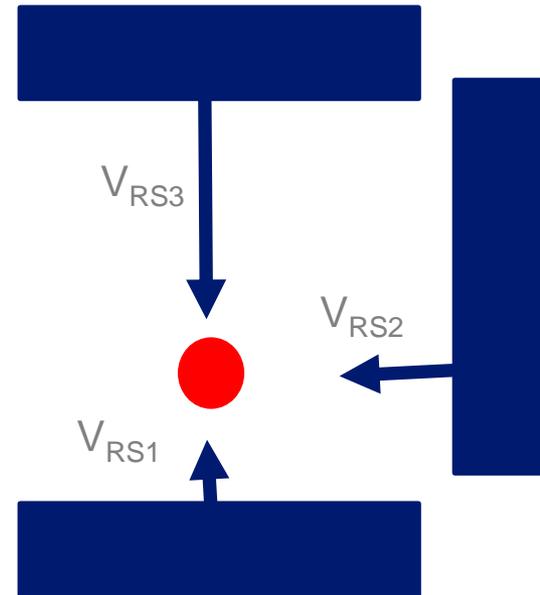
$$\Phi_p = v_D X_p \quad X_p (m^{-3})$$

En théorie la validité de ce modèle est limitée aux surfaces :

1. Lisses (pas de rugosité)
2. De même T que l'air (pas de convection)
3. Electriquement neutres (pas de champs électrique)

INTERACTIONS PARTICULES / MATÉRIAUX. VISION PRATIQUE

- La remise en suspension des particules est modélisée de façon symétrique au dépôt.
- Vitesse de remise en suspension V_{RS}
- Cette vitesse dépend de la taille des particules et de l'orientation de la parois.
- Mais elle s'exprime en s^{-1} (et non en $m.s^{-1}$) car on utilise là les densités surfaciques de particules déposées sur les surfaces



$$\Phi_p = v_{RS} X_{ps} \quad X_{ps} (m^{-2})$$

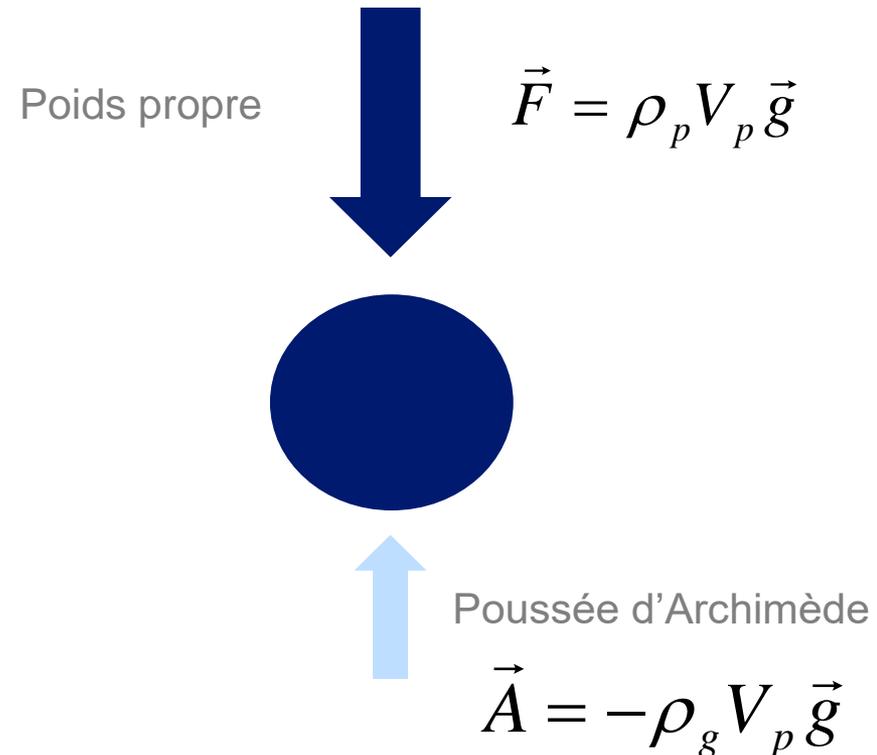
En pratique, la remise en suspension est beaucoup moins étudiée que le dépôt → manque cruel de données. → Le processus de dépôt est souvent jugé irréversible.

INTERACTIONS PARTICULES / MATÉRIAUX.

VISION PRATIQUE

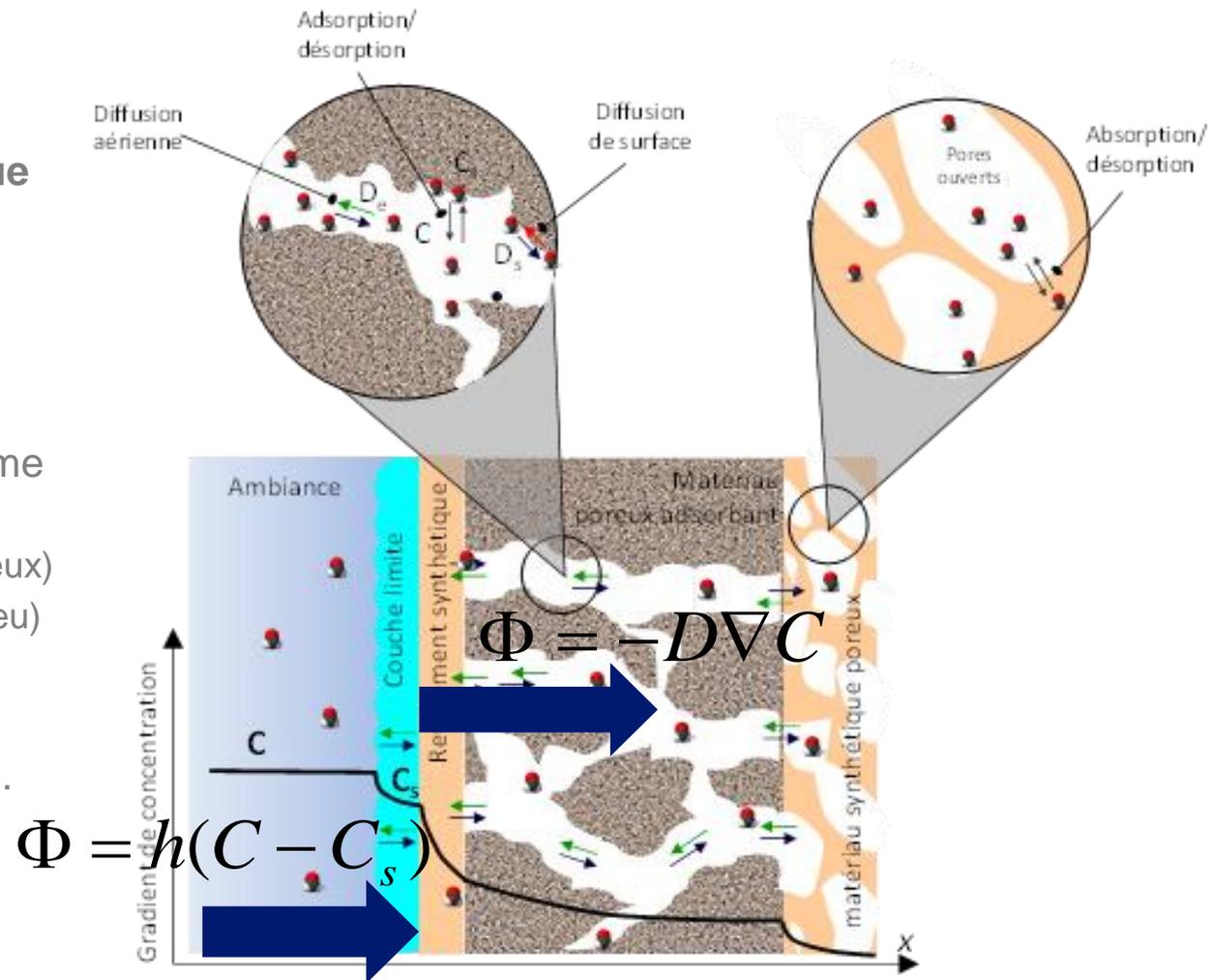
- Le flux net échangé depuis l'air vers le matériau est le bilan entre dépôt et remise en suspension
- Remarque :
 - En pratique la masse volumique des particules est comprise entre 1000 et 3000 kg/m³
 - Le poids l'emporte donc largement sur Archimède, et les particules tombent (sur les meubles, les planchers ...).
 - C'est pour cela qu'on ne cesse de faire les poussières.
 - A Paris elles viennent surtout de dehors et il y en a beaucoup.

$$\Phi_p = v_D X_p - v_{RS} X_{ps}$$



INTERACTIONS GAZ / MATÉRIAUX. VISION PHÉNOMÉNOLOGIQUE

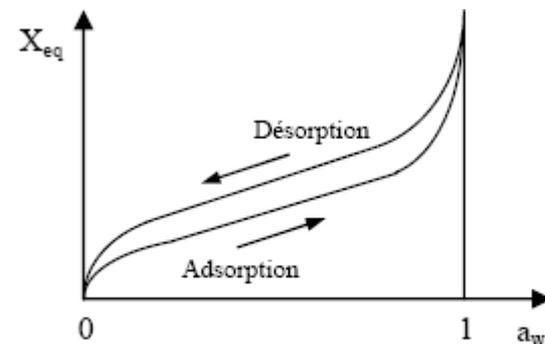
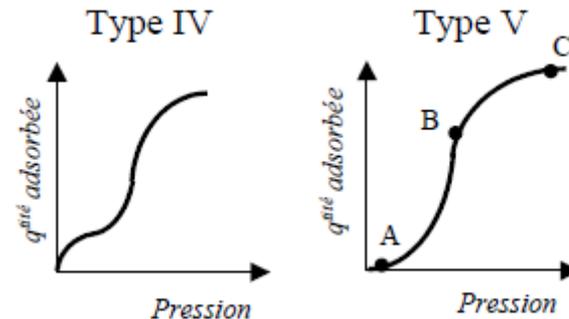
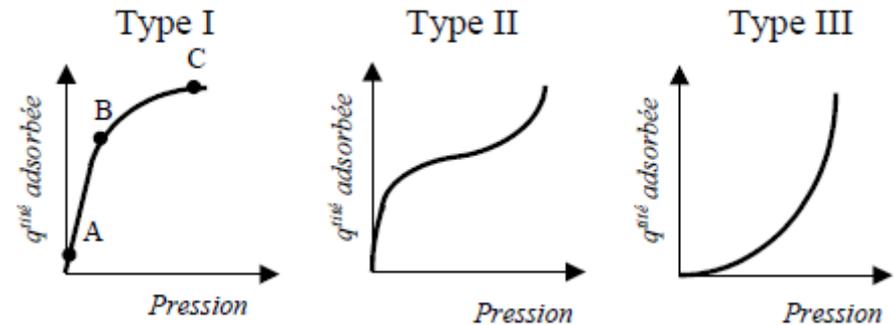
- Une vision aéraulique classique décrirait probablement :
 - Le volume d'air « loin » de la surface du matériau
 - Une couche limite
 - La surface du matériau lui-même qui peut :
 - Adsorber/Désorber (si milieu poreux)
 - Dissoudre/Dégazer (si autre milieu)
 - Le cœur du matériau qui peut diffuser les espèces adsorbée/dissoutes en surface.



INTERACTIONS GAZ / MATÉRIAUX. VISION PRATIQUE

■ L'équilibre de sorption

- Presque tous les gaz peuvent se fixer sur les surfaces internes des milieux poreux (forces de Van der Valls).
- Pour chaque couple (gaz, matériau) à température constante on peut définir une courbe d'équilibre reliant la pression partielle du gaz et sa masse adsorbée. → ISOTHERME DE SORPTION.
- Beaucoup de formes possibles.
- Il est très courant de trouver une différence nette entre isotherme d'adsorption et isotherme de désorption.

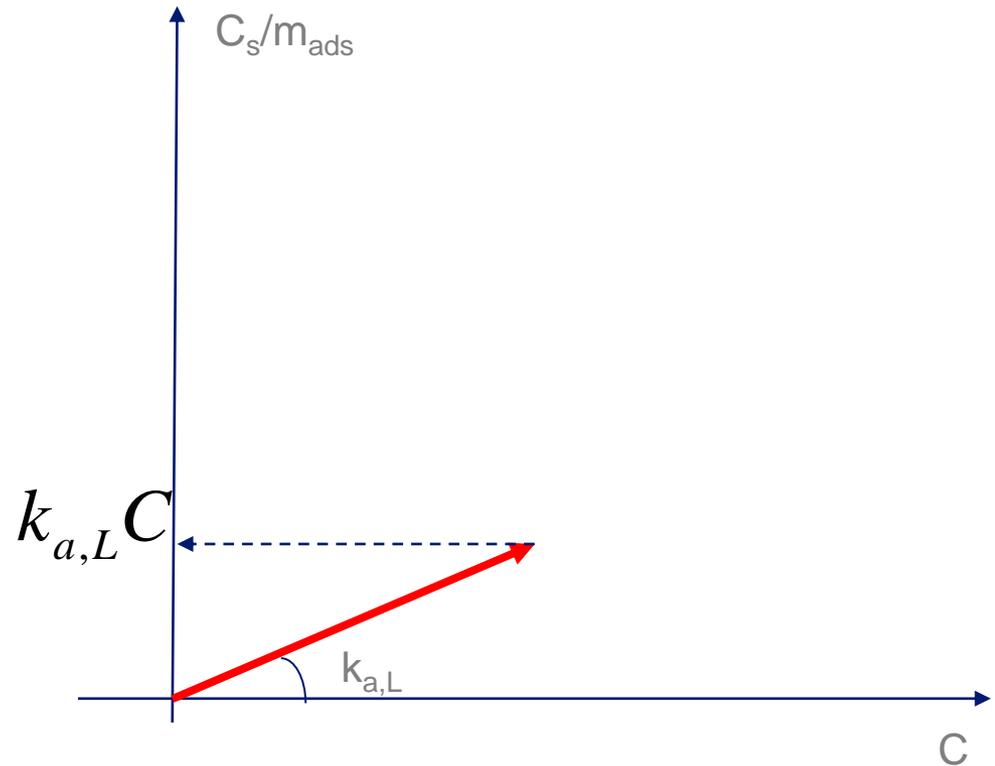


Isothermes d'adsorption et de désorption

INTERACTIONS GAZ / MATÉRIAUX. VISION PRATIQUE

▪ La théorie de Langmuir

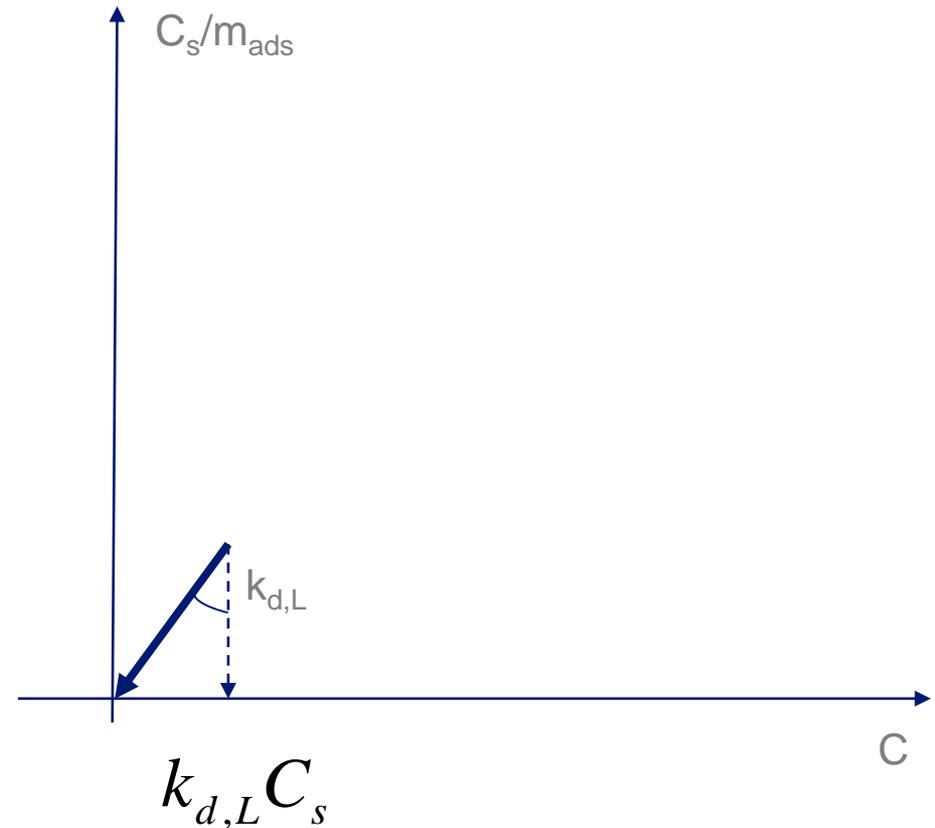
- Aux faibles concentrations, les isothermes de sorption peuvent être assimilées à des segments de droite.
- En matière de QAI, les concentrations des polluants sont toujours très faibles.
- On considère aussi que les polluants restent en surface (C_s en kg/m^2).
- On peut donc définir des relations d'équilibre linéaires entre :
 - La concentration des polluants dans l'air et la concentration surfacique en adsorption



INTERACTIONS GAZ / MATÉRIAUX. VISION PRATIQUE

▪ La théorie de Langmuir

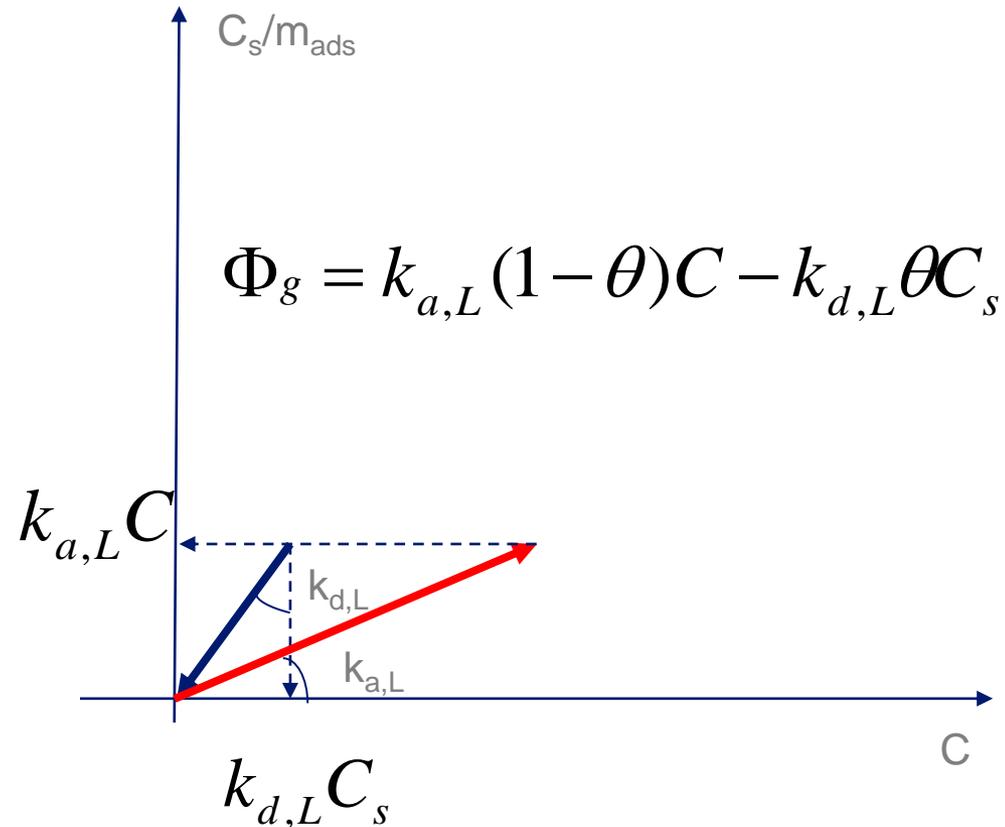
- Aux faibles concentrations, les isothermes de sorption peuvent être assimilées à des segments de droite.
- En matière de QAI, les concentrations des polluants sont toujours très faibles.
- On considère aussi que les polluants restent en surface (C_s en kg/m^2).
- On peut donc définir des relations d'équilibre linéaires entre :
 - La concentration surfacique et la concentration du polluant dans l'air en désorption



INTERACTIONS GAZ / MATÉRIAUX. VISION PRATIQUE

▪ Flux net échangé avec le matériau

- On nomme θ la proportion des sites de sorption occupés par une molécule de gaz adsorbée à la surface.
 - Les molécules ne peuvent s'adsorber que sur les sites libres (donc en proportion $1-\theta$)
 - Les molécules ne peuvent se désorber que depuis les sites occupés (donc en proportion θ)
- Le flux net échangé depuis l'air vers l'unité de surface de matériau correspond au bilan des équilibres de sorption et désorption.
- Que l'on exprime sous la forme pratique dite « modèle k_a - k_d »



$$\Phi_g = k_{a,L}(1-\theta)C - k_{d,L}\theta C_s$$

$$\Phi_g = k_a C - k_d C_s$$

QU'EN PENSEZ-VOUS?

LE MIRACLE FINAL POUR L'INTERACTION POLLUANTS/MATÉRIEAUX.

- Flux de particules :

$$\Phi_p = v_D X_p - v_{RS} X_{ps}$$

- Flux de gaz :

$$\Phi_g = k_a C - k_d C_s$$

SYNTHÈSE SUR LA CONCENTRATION D'UN POLLUANT INTÉRIEUR.

$$V \frac{dC}{dt} =$$

$$V \frac{dX}{dt} =$$

- Production interne

$$E(\text{kg} / \text{s})$$

$$E(- / \text{s})$$

- Flux entrants et sortants (advection et diffusion).

$$\sum_{ne/s} \frac{C}{C_g} K_g \Delta P_g^n \left[\begin{array}{c} + \\ D S \frac{dC}{dx} \\ - \end{array} \right]$$

$$\sum_{ne/s} \frac{X}{\rho_g} K_g \Delta P_g^n \left[\begin{array}{c} D S \frac{dX}{dx} \end{array} \right]$$

- Interactions aux parois.

$$\sum_{nmat} S(k_a C - k_d C_s)$$

$$\sum_{nmat} S(v_D X - v_{RS} X_s)$$

- Réactions chimiques/Coalescences-Agrégations.

$$\sum_{nréactions} K \prod_{k=1}^{n_{comp}} C_k \quad + / -$$

?