



ANR Villes durables 2009



Projet de recherche « INOGEV »

Innovations pour une gestion durable de l'eau en ville



Connaissance et maîtrise de la contamination des eaux pluviales urbaines

**Caractérisation des sources de polluants atmosphériques et de leurs dépôts sur les surfaces :
Dépôt des polluants en milieu urbain sous forme particulaire par temps sec.**

Y. Roustan, N. Cherin, D. Hebert, P. Laguionie, B. Letellier, D. Maro, S. Percot, P. Rouspard, V. Ruban, C. Seigneur



IFSTAR



LGCIE



Cereca



Nantes Métropole

GRANDLYON



- Thèse de doctorat de Stéphane Percot
(soutenue le 09 novembre 2012)
- Thèse de doctorat de Pierre Roupsard
(soutenue le 21 janvier 2013)
- Thèse de doctorat de Nicolas Chérin
(en cours, soutenance prévue au printemps 2014)

- 1 Phénoménologie du dépôt sec pour les particules
- 2 Étude expérimentale de la vitesse de dépôt sec
- 3 Modélisation de la vitesse de dépôt sec
- 4 Applications dans INOGEV pour les métaux et les HAP

1 Phénoménologie du dépôt sec pour les particules

2 Étude expérimentale de la vitesse de dépôt sec

3 Modélisation de la vitesse de dépôt sec

4 Applications dans INOGEV pour les métaux et les HAP

Le dépôt sec des particules

Le dépôt sec correspond au transfert de masse de l'atmosphère vers les surfaces en l'absence de précipitation.

Ce processus de dépôt est moins "intense" que le dépôt humide, mais a lieu en permanence.

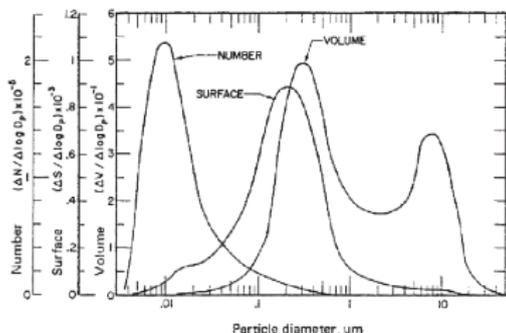
Pour les particules il résulte de l'action de multiples phénomènes physiques qui dépendent :

- des caractéristiques de l'écoulement atmosphérique à proximité de la surface.
- des caractéristiques des particules déposées.
- des caractéristiques de la surface de dépôt.

Le dépôt sec des particules

La sédimentation

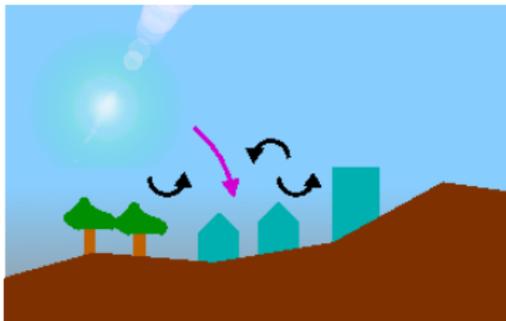
La vitesse de sédimentation traduit l'équilibre du poids et du frottement exercé par l'air sur les particules. Elle n'a un effet notable que pour les particules atmosphériques les plus massives.



Distributions en nombre, surface et volume des particules d'un aérosol atmosphérique urbain (Whitby, 1975).

La diffusion turbulente

La turbulence atmosphérique a un effet diffusif sur les concentrations. Si la surface capte des particules, un gradient se forme et la turbulence génère un flux vers celle-ci. Elle s'exerce de façon similaire sur toutes les particules pour lesquelles la sédimentation n'est pas prédominante.

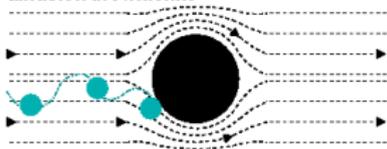


Le dépôt sec des particules

La diffusion brownienne

Le mouvement brownien traduit l'effet de l'agitation thermique de l'air sur les particules. Il génère une diffusion notable en l'absence de turbulence pour les particules les plus petites.

diffusion brownienne

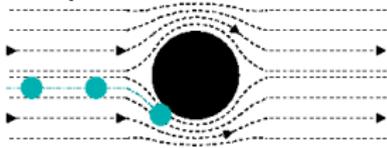


L'interception et l'impaction

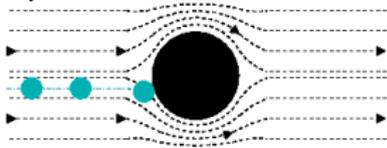
En proximité immédiate de la surface le fluide se comprime au contournement des aspérités. Les particules "portées" par l'écoulement peuvent alors entrer en contact avec la surface et être captées,

- de par leur taille, on parle d'interception
- de par leur inertie, on parle d'impaction.

interception



impaction



La thermophorèse

Un gradient de température dans l'écoulement peut générer un flux de particules des zones chaudes vers les zones froides.

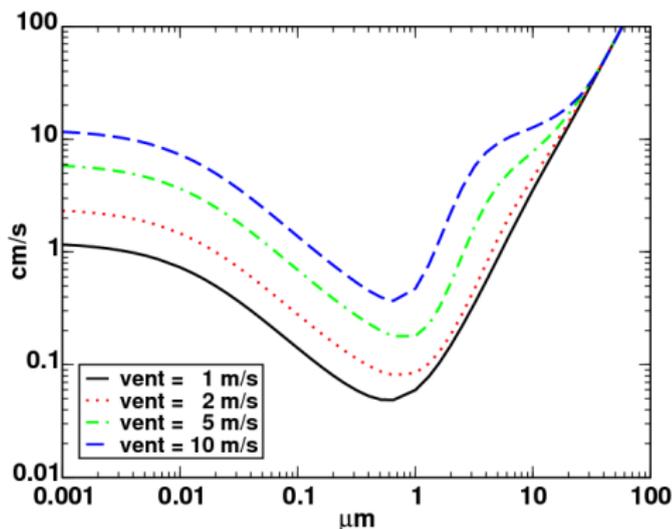
La vitesse de dépôt sec

Quantification du transfert de masse de l'atmosphère vers la surface

$$F_{\text{sec}} = v_d c$$

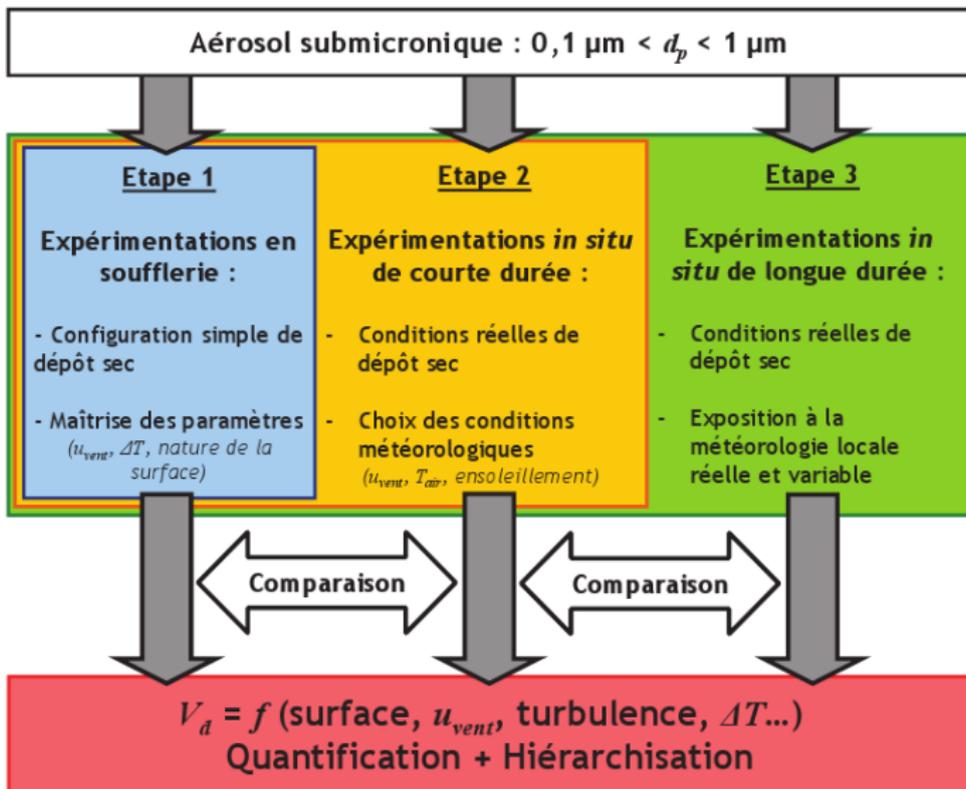
Phénomènes représentés

- sédimentation
- diffusion turbulente
- diffusion brownienne
- interaction avec la surface
 - ▶ interception (taille)
 - ▶ impact (inertie)
 - ▶ adhérence ou rebond



- 1 Phénoménologie du dépôt sec pour les particules
- 2 Étude expérimentale de la vitesse de dépôt sec
- 3 Modélisation de la vitesse de dépôt sec
- 4 Applications dans INOGEV pour les métaux et les HAP

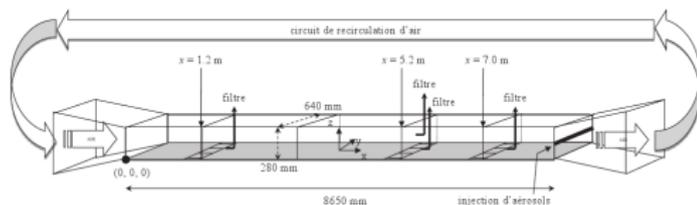
Étude du dépôt sec en soufflerie



Étude du dépôt sec en soufflerie

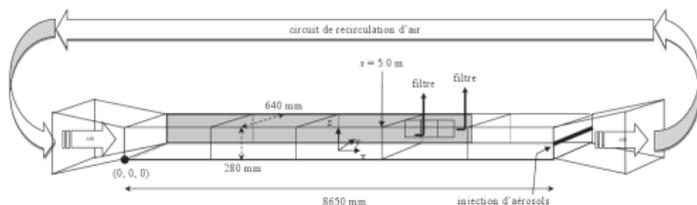
Traceur

Particules de fluorescéine de distribution monomodale, de diamètre aérodynamique médian de $0.3 \mu\text{m}$.



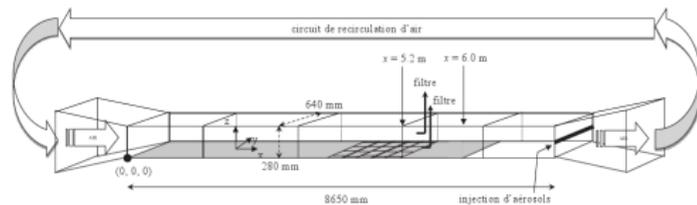
Première campagne

Trois matériaux étudiés positionnés sur des surfaces horizontales : verre, enduit de façade et herbe synthétique.



Deuxième campagne

Deux matériaux étudiés positionnés sur des surfaces verticales et des surfaces horizontales chauffées : verre et enduit de façade.



Étude du dépôt sec en soufflerie

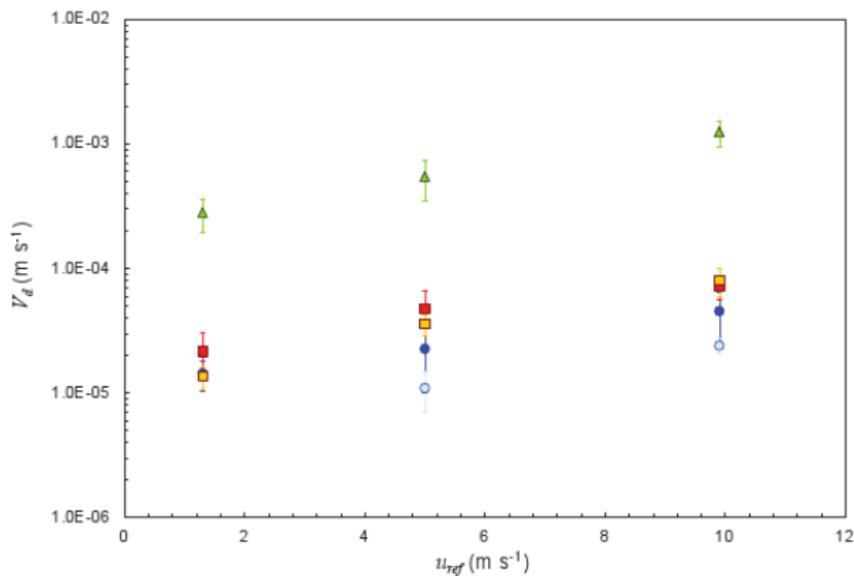


Figure II-14 : V_d moyennes pour chaque type de surface en fonction de u_{ref} .

Verre classique : \circ vertical, \bullet horizontal ;

enduit de façade : \square vertical, \blacksquare horizontal ;

herbe synthétique horizontale : \blacktriangle .

Étude du dépôt sec en soufflerie

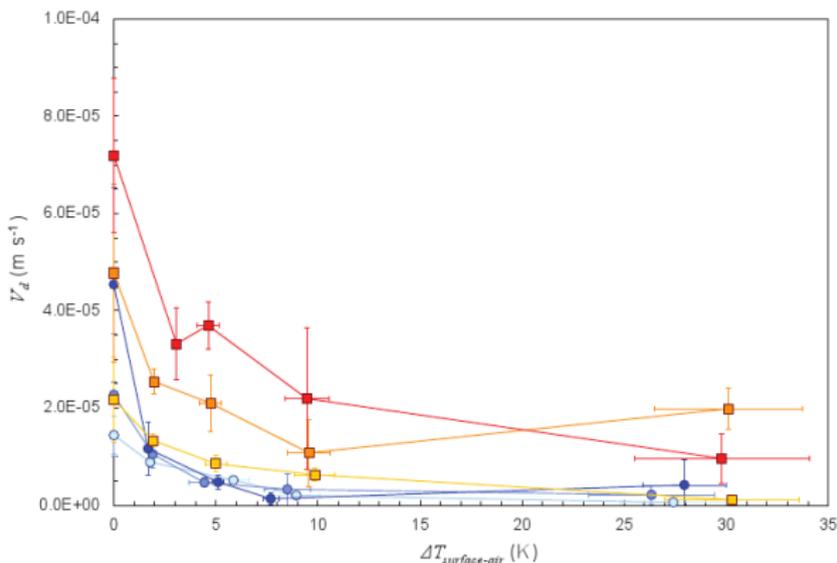


Figure II-23 : V_d et $\Delta T_{surface-air}$ moyens pour le verre classique et l'enduit de façade, et pour chaque u_{ref} .

Verre : ○ $u_{ref} = 1,3$ m s⁻¹, ● $u_{ref} = 5,0$ m s⁻¹, ● $u_{ref} = 9,9$ m s⁻¹ ;

enduit de façade : ■ $u_{ref} = 1,3$ m s⁻¹, ■ $u_{ref} = 5,0$ m s⁻¹, ■ $u_{ref} = 9,9$ m s⁻¹.

Étude du dépôt sec in-situ : campagnes de courte durée

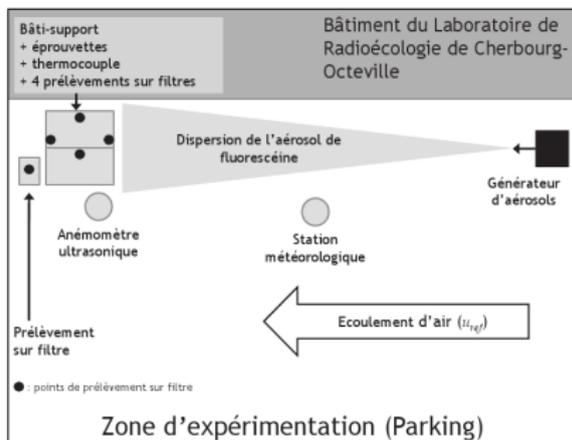
Traceur

Particules de fluorescéine de distribution monomodale, de diamètre aérodynamique médian de $0.3 \mu\text{m}$.

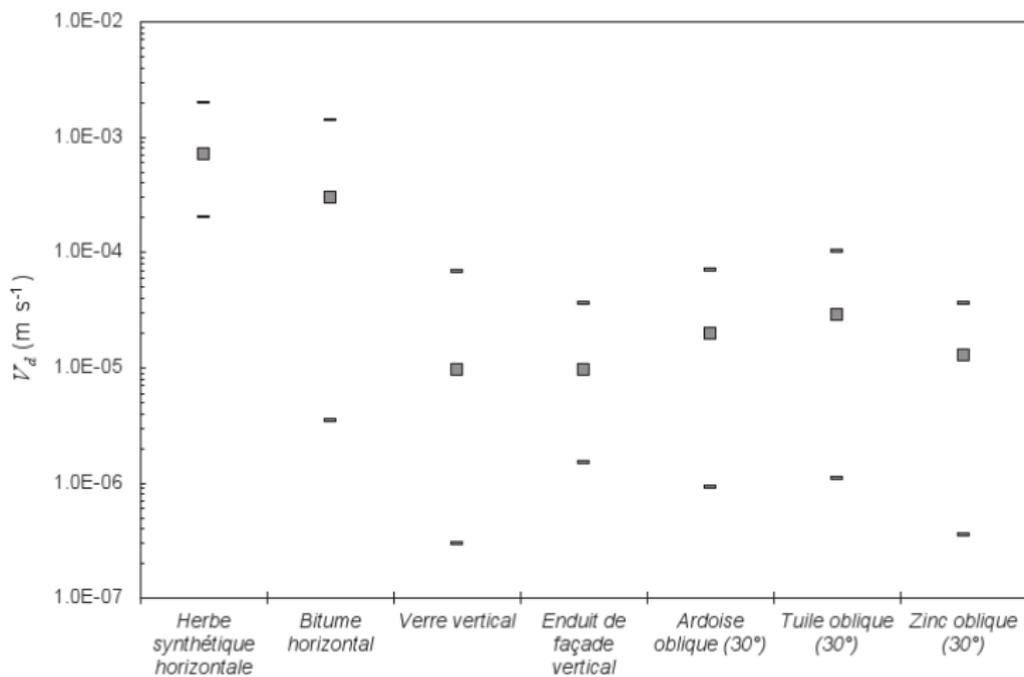


Expérimentation

Deux campagnes : décembre 2010 - janvier 2011, juillet - août 2011.
Sept matériaux : verre, enduit de façade, herbe, bitume, ardoise, tuile (terre cuite) et zinc.
Huit épisodes de 1 heure.



Étude du dépôt sec in-situ : campagnes de courte durée



Étude du dépôt sec in-situ : campagnes de courte durée

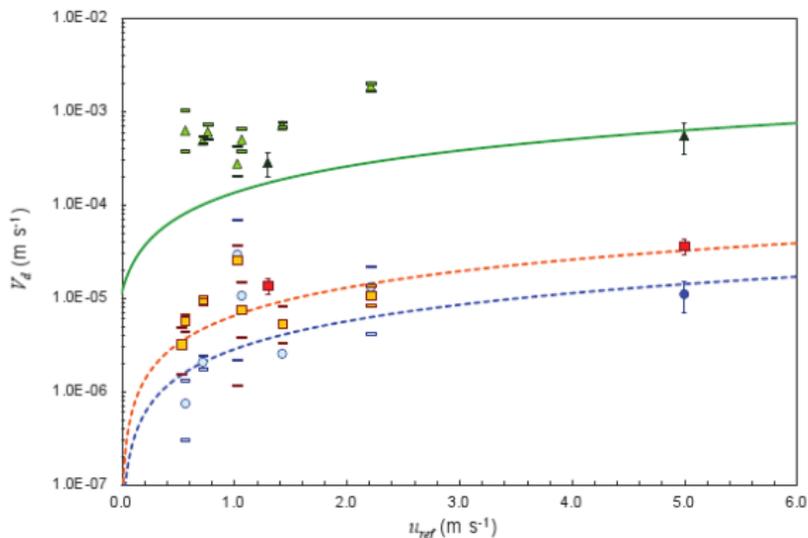


Figure III-12 : vitesses de dépôt sec moyennes, minimum et maximum, et ajustements sur les données de soufflerie pour le verre classique, l'enduit de façade et l'herbe synthétique en fonction de u_{ref} .

In situ : verre classique vertical : ○ V_d moyenne, = V_d minimum et maximum ;

enduit de façade vertical : □ V_d moyenne, — V_d minimum et maximum ;

herbe synthétique horizontale : ▲ V_d moyenne, — V_d minimum et maximum ;

soufflerie : ● verre classique vertical ; ■ enduit de façade vertical ;

▲ herbe synthétique horizontale ;

ajustements : --- verre classique vertical ; --- enduit de façade vertical ;

— herbe synthétique horizontale.

Étude du dépôt sec in-situ : campagne de longue durée

Traceur

béryllium 7 (^7Be),
radionucléide naturel fixé au
mode d'accumulation de
l'aérosol atmosphérique.

Expérimentation

16 mois à partir de septembre
2010. Les éprouvettes sont
exposées pour des durées de
l'ordre du mois.

Matériaux

Verre, enduit de façade, herbe,
bitume, ardoise, tuile (terre
cuite) et zinc.



Étude du dépôt sec in-situ : campagne de longue durée

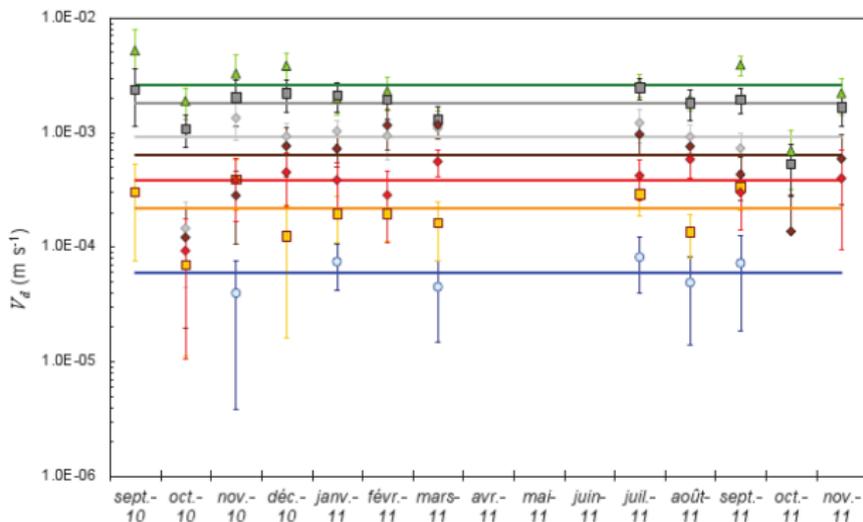


Figure IV-12 : vitesses de dépôt sec mesurées avec les éprouvettes urbaines pour chaque mois d'expérimentation et vitesses de dépôt moyenne pour chaque surface sur l'ensemble de la campagne expérimentale *in situ* de longue durée.

V_d mensuelles : surfaces horizontales : ▲ herbe synthétique, ■ bitume ;
 surfaces verticales : ○ verre classique, ■ enduit de façade ;
 surfaces obliques (30°) : ◆ ardoise, ◆ tuile, ◆ zinc ;

V_d moyennes : — herbe synthétique, — bitume, — verre classique, — enduit de façade,
 — ardoise, — tuile, — zinc.

Étude du dépôt sec in-situ : campagne de longue durée

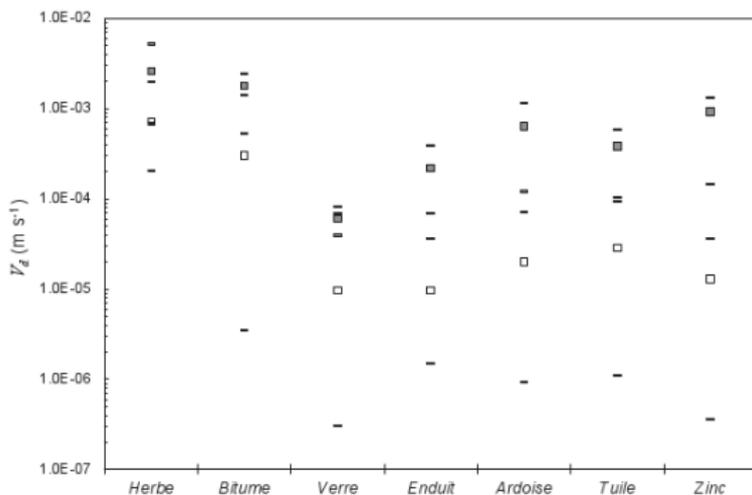


Figure IV-14 : vitesses de dépôt sec moyennes, minimum et maximum sur l'ensemble des données acquises avec chaque type de surface urbaine pour les expérimentations *in situ* de courtes durées et de longues durées.

in situ de longues durées : ■ V_d moyenne, = V_d minimum et maximum ;
in situ de courtes durées : □ V_d moyenne, = V_d minimum et maximum.

1 Phénoménologie du dépôt sec pour les particules

2 Étude expérimentale de la vitesse de dépôt sec

3 Modélisation de la vitesse de dépôt sec

4 Applications dans INOGEV pour les métaux et les HAP

Modélisation du flux de dépôt sec

Flux de dépôt sec

$$F_{\text{dépôt sec}} = v_d \times C$$

Formulation de la vitesse de dépôt pour les particules (Venkatram, 1999)

$$v_d = \frac{v_s}{(1 - e^{-R v_s})}$$

avec

$$R = R_a + R_s \approx \int_{z_{\text{lim}}}^z \frac{1}{K_{\text{turbulent}}} dz + \int_0^{z_{\text{lim}}} \frac{1}{D} dz$$

- R_a : flux gouverné par la diffusion turbulente.
- R_s : flux gouverné par la diffusion brownienne, l'interception, l'impaction, la thermophorèse, etc...
- v_s : vitesse de sédimentation.

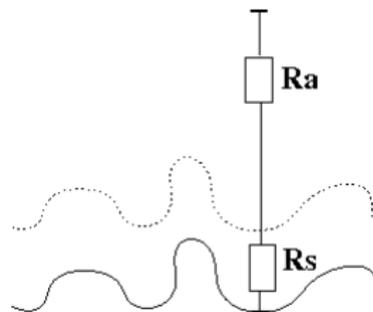


Schéma de résistances associé au dépôt de particules.

$$R v_s \gg 1 \Rightarrow v_d \sim v_s$$

$$R v_s \ll 1 \Rightarrow v_d \sim \frac{1}{R}$$

Approche par rugosité - Modèle de longueur de mélange de Prandtl

Analogie avec le libre parcours moyen (Prandtl, 1925)

$$K_t \propto u_t l_m$$

où u_t et l_m représentent la vitesse caractéristique et la longueur de mélange de l'agitation turbulente (\approx dimension des tourbillons).

Par analyse dimensionnelle :

$$K_t = l_m^2 \left| \frac{\partial \bar{u}}{\partial z} \right|$$

- 1 Hypothèse forte : Modèle applicable seulement au voisinage des parois
- 2 Paramétrisation empirique : Taille des tourbillons liée à l'éloignement à la paroi $\Rightarrow l_m = \kappa z$, avec $\kappa = 0.41$ la constante de Von Karman.

Présentation de la dynamique en milieu urbain

L'utilisation du modèle de Prandtl conduit aux profils de vitesses horizontales moyennes de vent suivants :

Surface lisse (ex : prairie $z_0 \approx \text{mm}$)

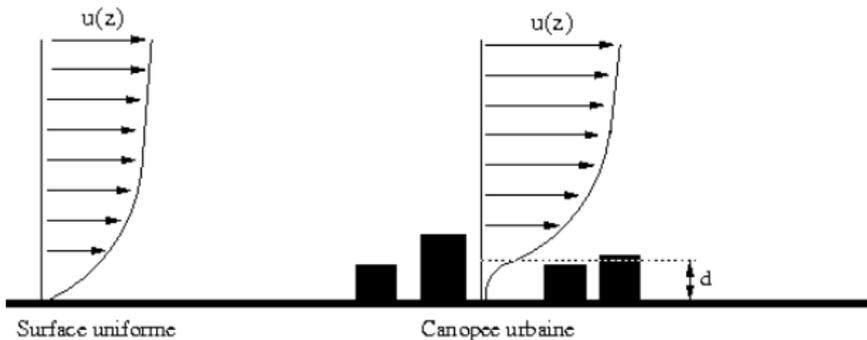
$$\forall z > z_0, \quad \bar{u}(z) = \frac{u^*}{\kappa} \ln \left(\frac{z}{z_0} \right)$$

$$\forall z < z_0, \quad \bar{u}(z) = 0$$

Surface rugueuse (ex : ville $d \approx 1-10\text{m}$)

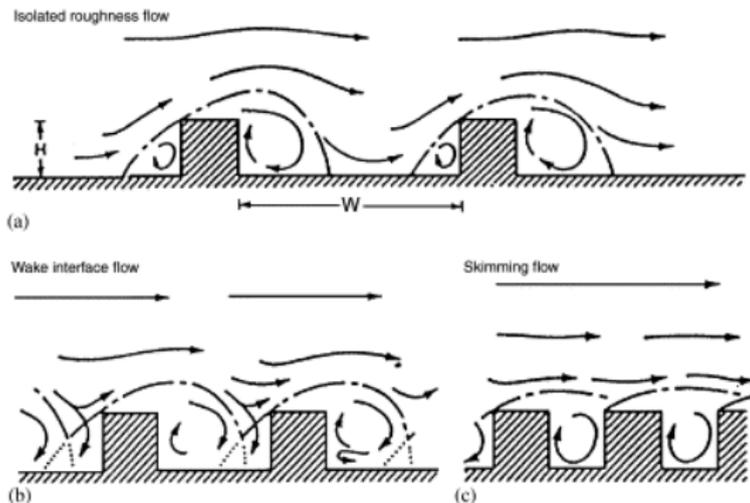
$$\forall z > z_0 + d, \quad \bar{u}(z) = \frac{u^*}{\kappa} \ln \left(\frac{z-d}{z_0} \right)$$

$$\forall z < d + z_0, \quad \bar{u}(z) = 0$$



Présentation de la turbulence en milieu urbain

En ville, les bâtiments génèrent de la turbulence :



Différents régimes d'écoulement selon la géométrie de la rue canyon (crédit Oke, 1988).

- 1 Turbulence fonction des facteurs de forme (densité, $h...$)
- 2 Loi de paroi dès lors inapplicable dans la rue, « proche » des rugosités.

Implémentation de la canopée urbaine - Les différents régimes possibles

Nouvelle longueur de mélange adaptée à la présence des bâtiments :

$$\frac{1}{l_m} = \frac{1}{\kappa \cdot z} + \frac{1}{l_c} \quad \text{avec} \quad l_c = f(h, d, \text{densité de bâtiments}, \dots) \quad (1)$$

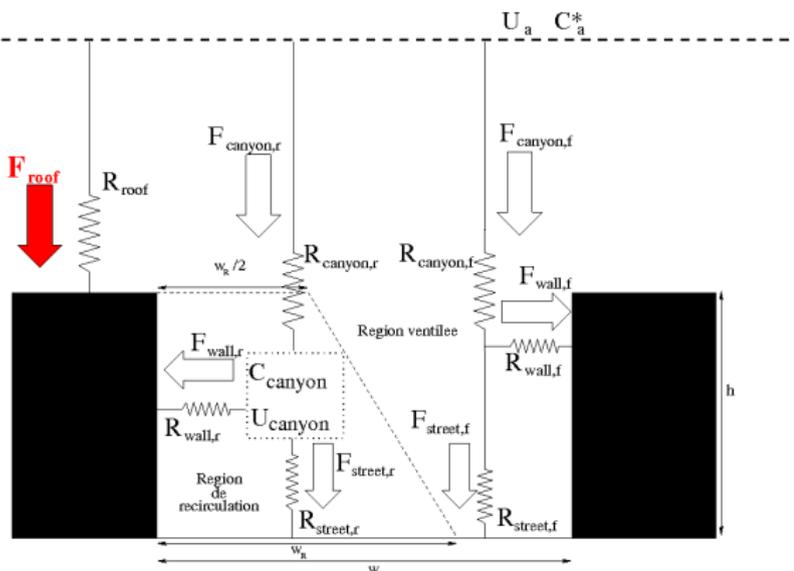


Schéma complet du canyon - Réseau de résistances et flux associés.

Implémentation de la canopée urbaine - Les différents régimes possibles

Nouvelle longueur de mélange adaptée à la présence des bâtiments :

$$\frac{1}{l_m} = \frac{1}{\kappa \cdot z} + \frac{1}{l_c} \quad \text{avec} \quad l_c = f(h, d, \text{densité de bâtiments}, \dots) \quad (1)$$

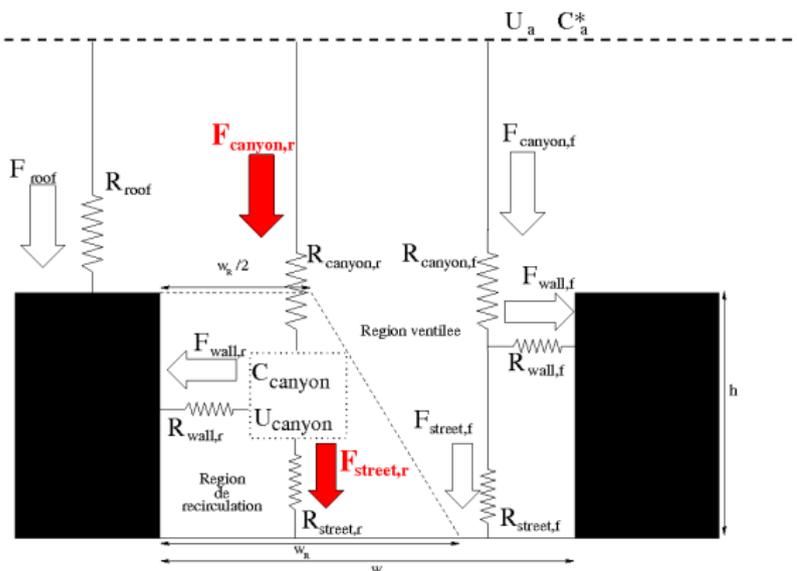


Schéma complet du canyon - Réseau de résistances et flux associés.

Implémentation de la canopée urbaine - Les différents régimes possibles

Nouvelle longueur de mélange adaptée à la présence des bâtiments :

$$\frac{1}{l_m} = \frac{1}{\kappa \cdot z} + \frac{1}{l_c} \quad \text{avec} \quad l_c = f(h, d, \text{densité de bâtiments}, \dots) \quad (1)$$

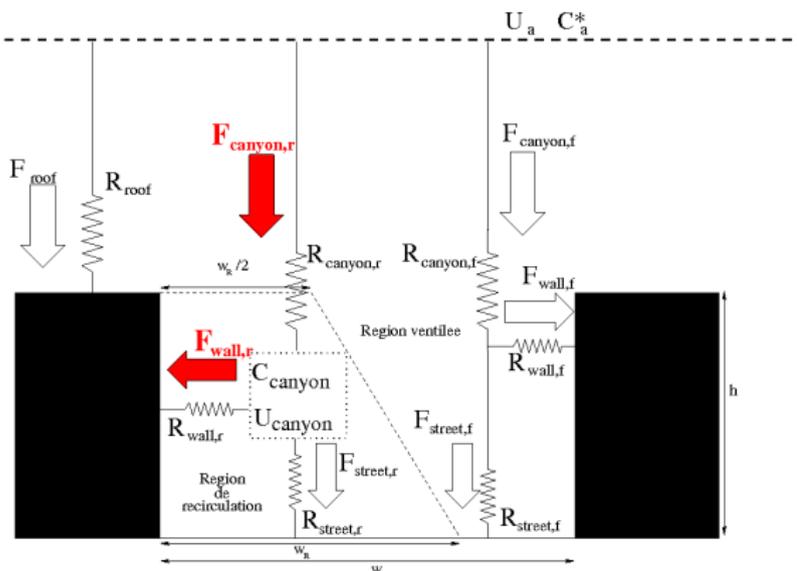
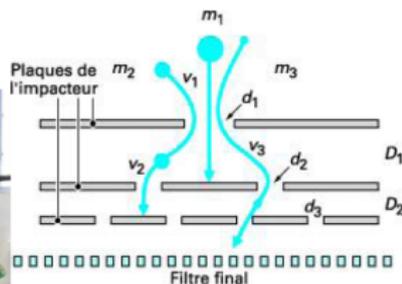


Schéma complet du canyon - Réseau de résistances et flux associés.

- 1 Phénoménologie du dépôt sec pour les particules
- 2 Étude expérimentale de la vitesse de dépôt sec
- 3 Modélisation de la vitesse de dépôt sec
- 4 Applications dans INOGEV pour les métaux et les HAP**

Validation du ^7Be en tant que traceur des polluants

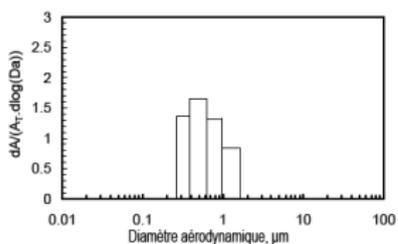
(a) Colonne LPI 13 plateaux



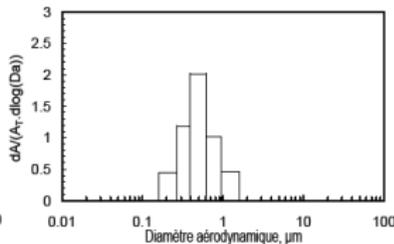
- D distance entre les plaques
 d diamètre d'ouverture de la buse
 m_i masse des particules
 v_i vitesse des particules

(b) Principe de fonctionnement LPI

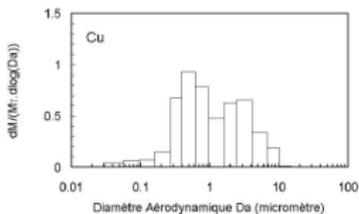
	17 juin - 2 juillet 10	6 juillet- 20 juillet 10	1 Septembre - 15 Septembre 11	28 septembre- 26 octobre 11	9 Janvier - 5 Février 12
Pression atmosphérique (hPa)		1014,41	1010,4	1016,31	
Humidité relative (%)	56	60,7	84	80,74	
Température (°C)	20	21	18	15	5
Précipitation (mm)	8,6	15,2	33,3	12,7	21,9
direction du vent (Deg)	N	S-SW	231,5	205	
Rafale (km h ⁻¹)	7,8	11,2	4,8	3,29	
Vitesse du vent (km h ⁻¹)	3,9	4,4	1,5	0,85	
Point de rosée	19,4	12,3	14,8	11,04	
Radiation solaire (wat m ⁻²)	401	393	172	120,52	
^7Be	✓	✓	—	—	—
ETM	✓	—	✓	—	—
HAP	—	—	—	✓	✓
Pesticides	—	—	—	✓	✓

Validation du ^7Be en tant que traceur des polluants

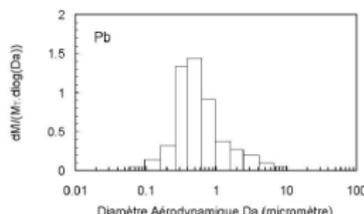
(a) Juin 2010



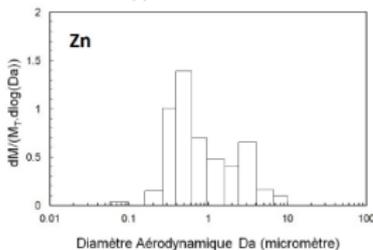
(b) Juillet 2010

Distribution granulométrique différentielle du ^7Be 

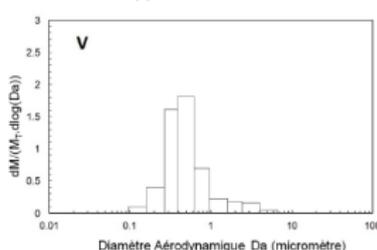
(a) Cu : Juin 2010



(b) Pb : Juin 2010

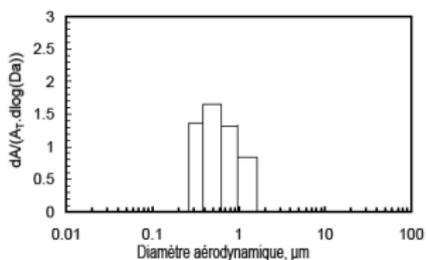


(c) Zn : Septembre 2011

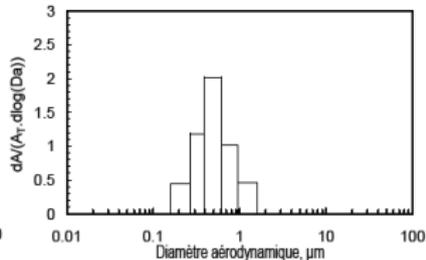


(d) V : Septembre 2011

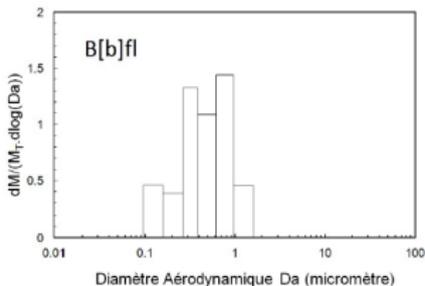
Spectres granulométriques des ETM

Validation du ^7Be en tant que traceur des polluants

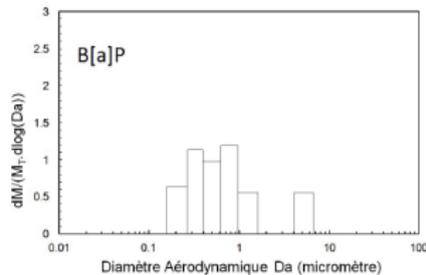
(a) Juin 2010



(b) Juillet 2010

Distribution granulométrique différentielle du ^7Be 

(a) BenzobFl : Septembre 2011



(b) BaP : Septembre 2011

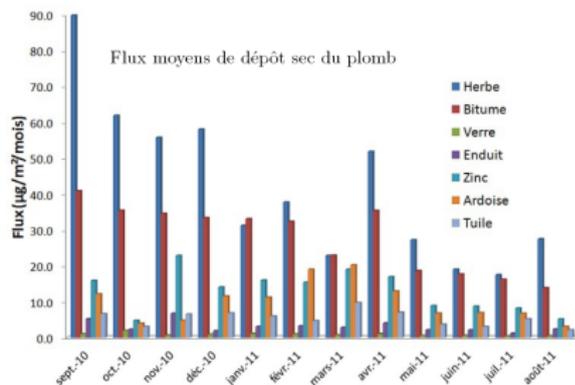
Spectres granulométriques des HAP

Estimation du dépôt sec à Nantes

Flux de dépôt sec atmosphérique calculés
toutes surfaces confondues ($\mu\text{g m}^{-2} \text{mois}^{-1}$)

	sept-10	oct-10	nov-10	déc-10	janv-11	févr-11
V	9	3	3	5	4	6
Cr	5	2	0	7	5	5
Ni	8	4	2	7	3	4
Cu	63	64	70	51	31	31
Zn	139	69	71	118	83	80
As	3	1	2	3	2	2
Cd	0	0	1	1	1	0
Pb	48	36	33	34	23	23

	mars-11	avr-11	mai-11	juin-11	juil-11	août-11
V	5	10	10	6	5	11
Cr	4	7	0	0	0	0
Ni	3	6	8	8	4	9
Cu	24	43	32	22	20	36
Zn	57	99	64	29	34	53
As	1	3	2	1	1	2
Cd	0	0	0	0	0	0
Pb	17	31	17	13	12	16

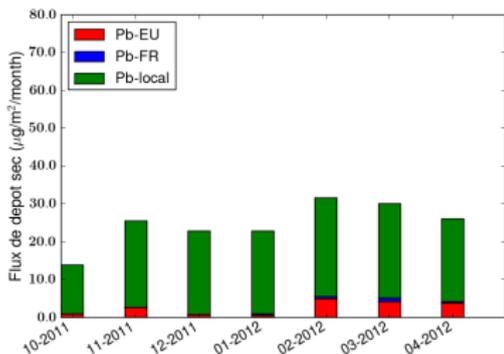


Modélisation du dépôt sec à Nantes, Paris et Lyon

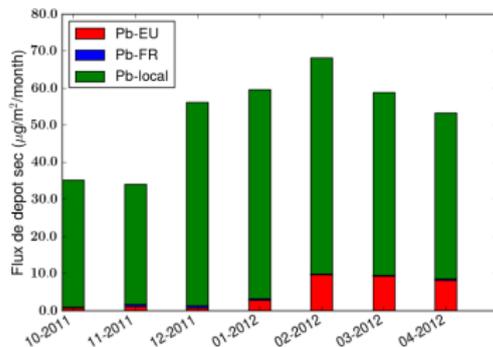
- ordre de grandeur cohérent avec l'estimation à partir des v_d expérimentales.
- contribution "locale" dominante

Flux sec mensuel de plomb pour les bassins versants (en $\mu\text{g}/\text{m}^2/\text{mois}$).

Nantes



Paris



Lyon

