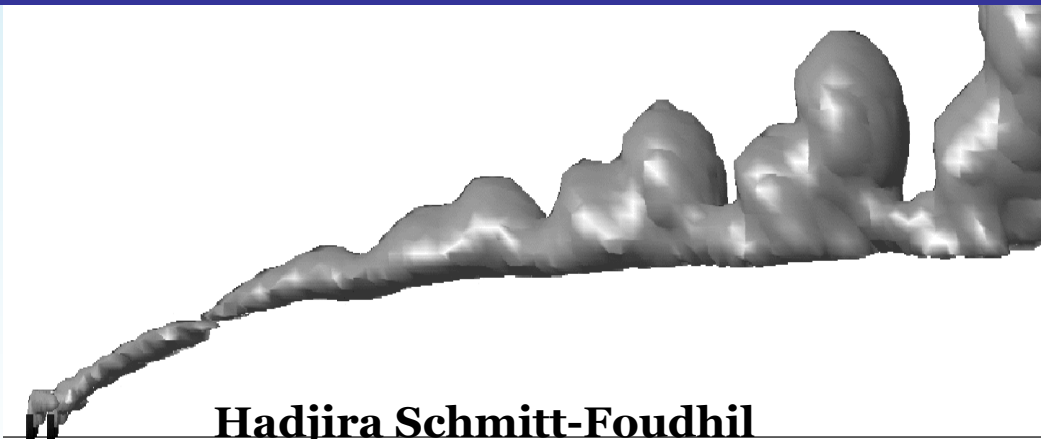


# Dispersion atmosphérique

Module environnement atmosphérique et qualité de l'air



**Hadjira Schmitt-Foudhil**



[hadjira.schmitt@enpc.fr](mailto:hadjira.schmitt@enpc.fr)



**23 novembre 2010**

## Simulation environnementale

### pollution atmosphérique

- **Objectif** : estimer quantitativement l'effet de perturbations introduites par des sources d'effluents et son niveau significatif
- **3 approches sont pratiquées pour l'étude des phénomènes de dispersion dans les basses couches**
  - Expérimentation *in situ* : campagnes de sondages, expériences de diffusion de traceurs
  - Simulation physique de la dynamique des phénomènes : canal hydraulique, soufflerie (conditions contrôlées)
  - Simulation mathématique numérique : modèles semi-empiriques de diffusion, modèles numériques de type stochastique ou déterministe
- Techniques **étroitement complémentaires** dont l'utilisation conjointe permet d'obtenir un degré de fiabilité plus grand

## Plan de l'exposé

- **Dispersion atmosphérique : considérations générales**
- **Analyse phénoménologique de la dispersion**
- **Modélisation de la dispersion**
  - Modèles physiques en conditions contrôlées
  - Modèles analytiques semi-empiriques
    - Gaussien de panache - plume
    - Modèle Gaussien à bouffées - puff
  - Modèles numériques
    - Modèle Lagrangien stochastique
    - Modèle Eulérien diffusif
  - Avantages et inconvénients
- **Exemples de simulations avec des codes CFD**

**Exercices**



## Transport de matière

- On s'intéresse au transport d'une « entité » ou « grandeur physique » **dans le fluide par le fluide**
  - Substance en suspension intrinsèque : certains polluants, colorant, vapeur d'eau (particules très fines non-décantantes)
  - Particules solides en suspension : pollen, sable, aérosols, métaux lourds (particules décantantes)
  - Mais également : quantité de mouvement, chaleur, etc.
- On définit la **concentration locale**

$$C(x_i, t) \equiv \frac{\text{masse de la substance}}{\text{volume du fluide (mélange)}}$$

- **De nombreuses unités usitées**
  - Particule/m<sup>3</sup> ; mol/m<sup>3</sup> ; µg/m<sup>3</sup> ; fraction massique  $m_{\text{esp}}/m_{\text{air}}$  ; partie par million ppm ; partie par billion ppb ; partie par trillion ppt
  - Exemples : particules biotiques en [spore.10<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>] - O<sub>3</sub> en [µg/m<sup>3</sup>] CO<sub>2</sub> en [ppm] et CFC en [ppt]

## Processus de transport

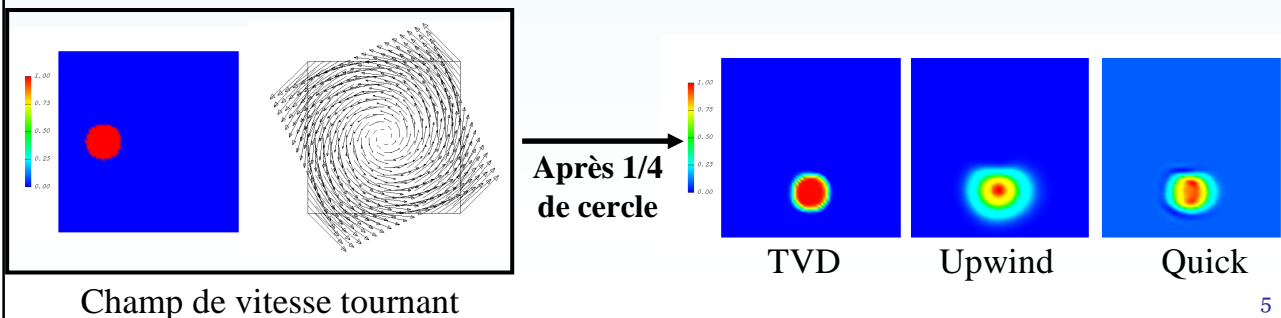
- **Par diffusion moléculaire : processus irréversible**

Loi de Fick : une substance dans un mélange a tendance à uniformiser sa répartition => il se forme un **flux des zones de forte concentration vers les zones de faible concentration**

$$q_j = -k_c \frac{\partial C}{\partial x_j} \equiv \text{flux}_{\text{suivant } j}$$

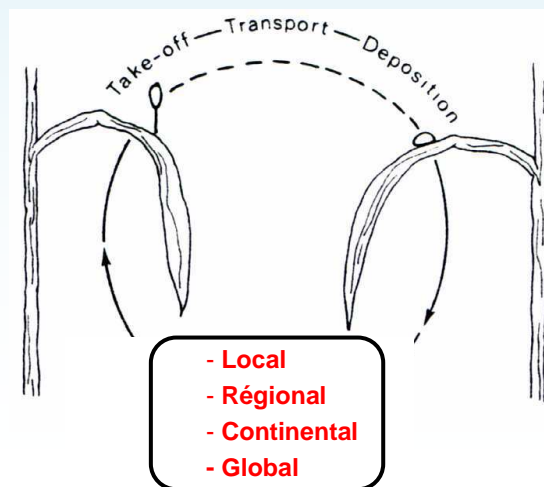
$k_c$  : diffusivité massique moléculaire [ $m^2 \cdot s^{-1}$ ]

- **Par convection par l'écoulement : processus réversible**



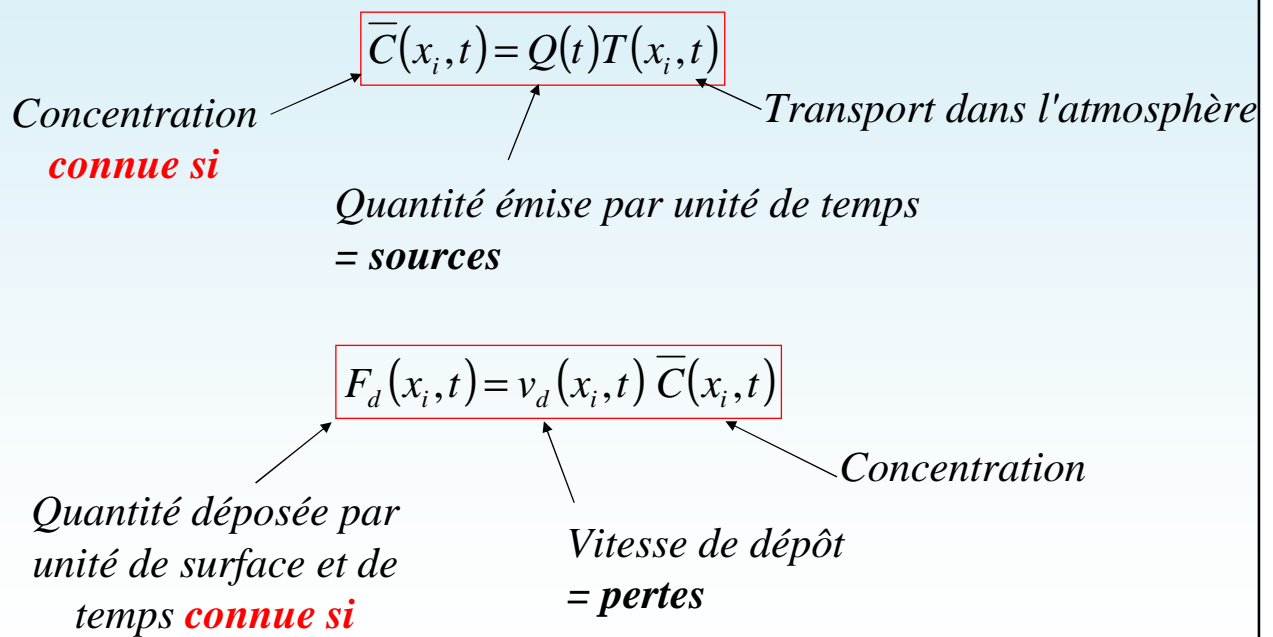
## Dispersion atmosphérique

- **La dispersion atmosphérique comporte 3 évènements importants**
  - Émission : rejet artificiel, libération « naturelle » (active), mise en suspension par l'écoulement (passive)
  - **Transport par le vent dans l'atmosphère**
  - Dépôt au sol et dans l'hydrosphère : sec ou humide



## Dispersion atmosphérique

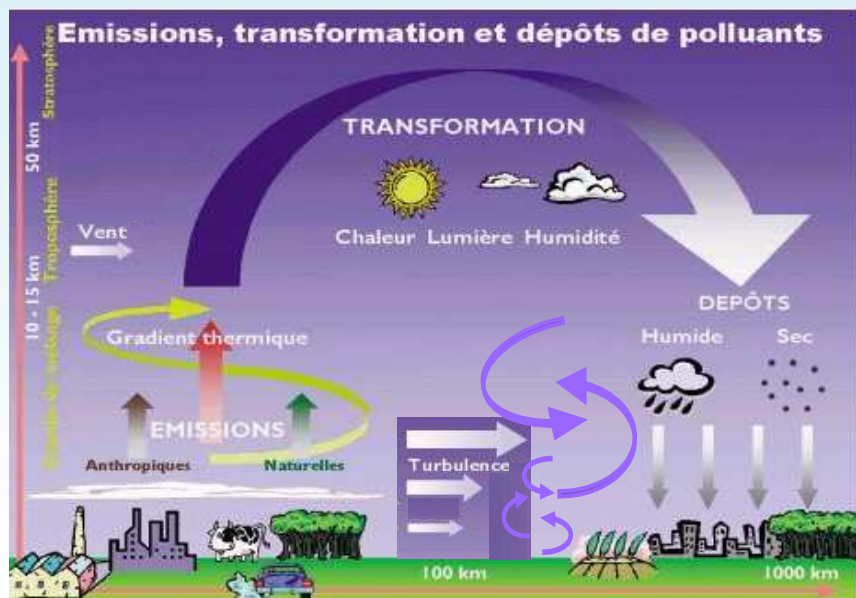
[Aylor, 1978]



# Dispersion atmosphérique

$$\bar{C}(x_i, t) = Q(t)T(x_i, t)$$

$$F_d(x_i, t) = v_d(x_i, t) \bar{C}(x_i, t)$$



**Difficulté d'appréhender tous ces processus qui sont interdépendants et très variables dans le temps et dans l'espace !**



## Dispersion atmosphérique

[Belot, 1976]

*Distance parcourue par une particule* →  $x = \frac{\bar{u} H}{v_s}$

← *Vitesse moyenne du vent* (pointing to  $\bar{u}$ )

← *Hauteur de la source* (pointing to  $H$ )

← *Vitesse de sédimentation de la particule* (pointing to  $v_s$ )

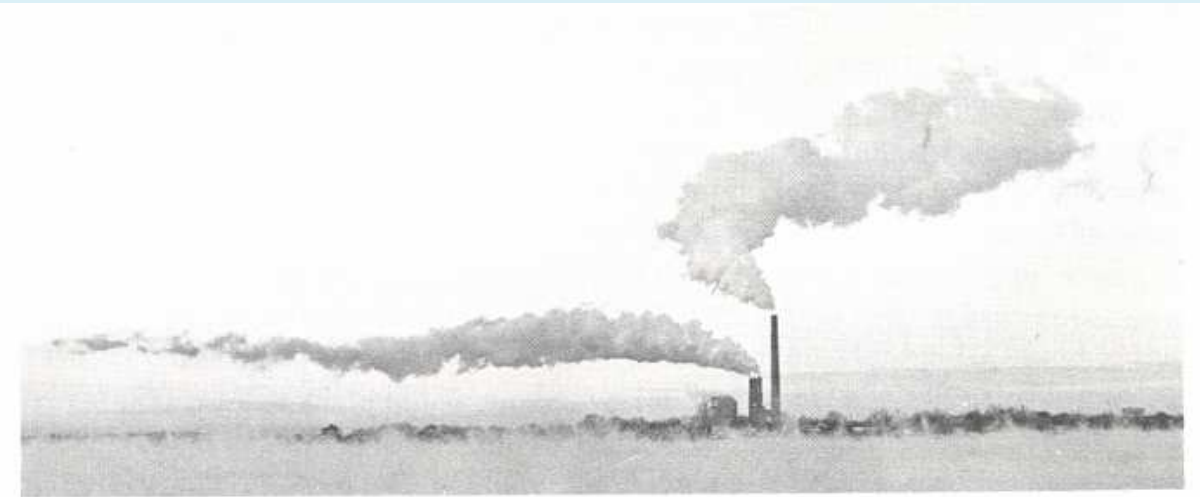
- $\bar{u}$  : rôle majeur du vent dans le transport atmosphérique
- $H$  : importance de la hauteur de la source  
=> une source élevée contribue à augmenter les distances de dispersion
- $v_s$  exprime le dépôt des particules par effet de gravité : le dépôt des particules lourdes a lieu plus rapidement à l'aval d'une source alors qu'il est plus étalé pour les particules fines  
=> potentiel de dispersion d'une particule

## Dispersion dans les basses couches

- **Facteurs « directs » affectant la dispersion dans les basses couches**
  - Conditions météorologiques : vitesse du vent, stabilité thermique de l'atmosphérique, turbulence
  - Structure du paysage : nature du sol (rugosités, couverts végétaux, surfaces humides), obstacles, reliefs, etc.
- **Facteurs « indirects » affectant la dispersion dans les basses couches**
  - Type de particules : lourde, légère, réactive...
  - Source : caractéristiques géométriques (hauteur, taille), intensité (vitesse d'éjection, quantité), température et composition du rejet, position

***dont la compréhension permet de réaliser des conditions favorisant la dispersion de polluants***

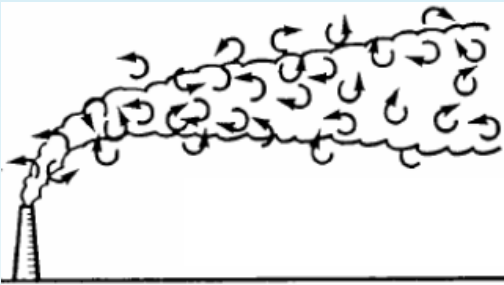
## Analyse phénoménologique de la dispersion de panaches



**Dispersion de panaches de cheminées avec différentes hauteurs de cheminées  
affectés par un cisaillement de vent (écoulement stratifié cisailé)**

*Dispersion de panaches de cheminées au-dessus du port de Beverly-Salem, Massachusetts  
(Ralph Turcotte, Beverly Times)*

## Turbulence et dispersion atmosphérique



- **Petits tourbillons** : accroissement régulier de la section du panache



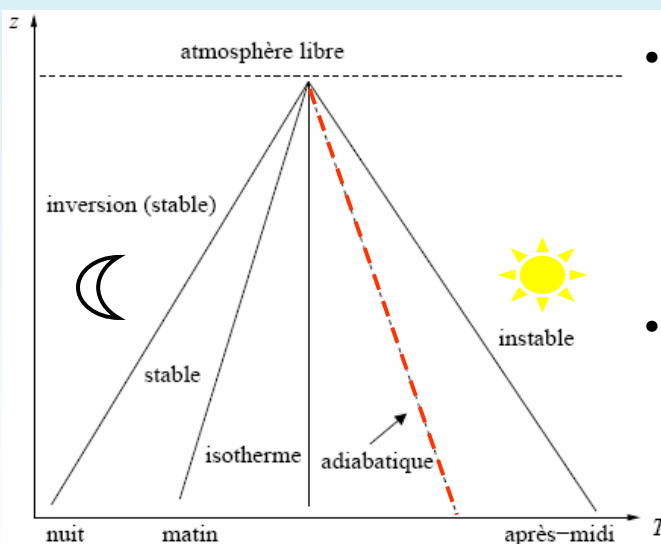
- **Grands tourbillons** : oscillations du panache



- **Contribution des tourbillons de différentes tailles**

## Evolution de la stabilité atmosphérique au cours d'une journée

Gradient de  $\theta$  = écart à une situation adiabatique



**Profil idéalisé de température et évolution de la stabilité de la CLA au cours d'une journée. La température au sol augmente en cours de journée puis diminue au cours de la nuit**

- $\frac{\partial \theta}{\partial z} > 0 \Rightarrow$  Atmosphère stable

$$\frac{\partial T}{\partial z} > \left( \frac{\partial T}{\partial z} \right)_{ad}$$

- $\frac{\partial \theta}{\partial z} = 0 \Rightarrow$  Atmosphère neutre

$$\frac{\partial T}{\partial z} = \left( \frac{\partial T}{\partial z} \right)_{ad}$$

- $\frac{\partial \theta}{\partial z} < 0 \Rightarrow$  Atmosphère instable

$$\frac{\partial T}{\partial z} < \left( \frac{\partial T}{\partial z} \right)_{ad}$$

## Stabilité atmosphérique et dispersion Nombre de Richardson

- Nombre de **Richardson de flux**

- Production thermique  $P_h$ , par effets de flottabilité

$$Ri_f = -\frac{P_h}{P_k}$$

- Production mécanique  $P_k$ , par effets de cisaillement

- Le degré de stabilité atmosphérique peut également être caractérisé en comparant le gradient vertical de température au gradient adiabatique => Nombre de **Richardson de gradient**

$$Ri = \frac{g}{T} \frac{\left( \frac{\partial \bar{T}}{\partial z} + \Gamma \right)}{\left( \frac{\partial \bar{U}}{\partial z} \right)^2}$$

$Ri < 0$  atmosphère instable

$Ri = 0$  atmosphère neutre

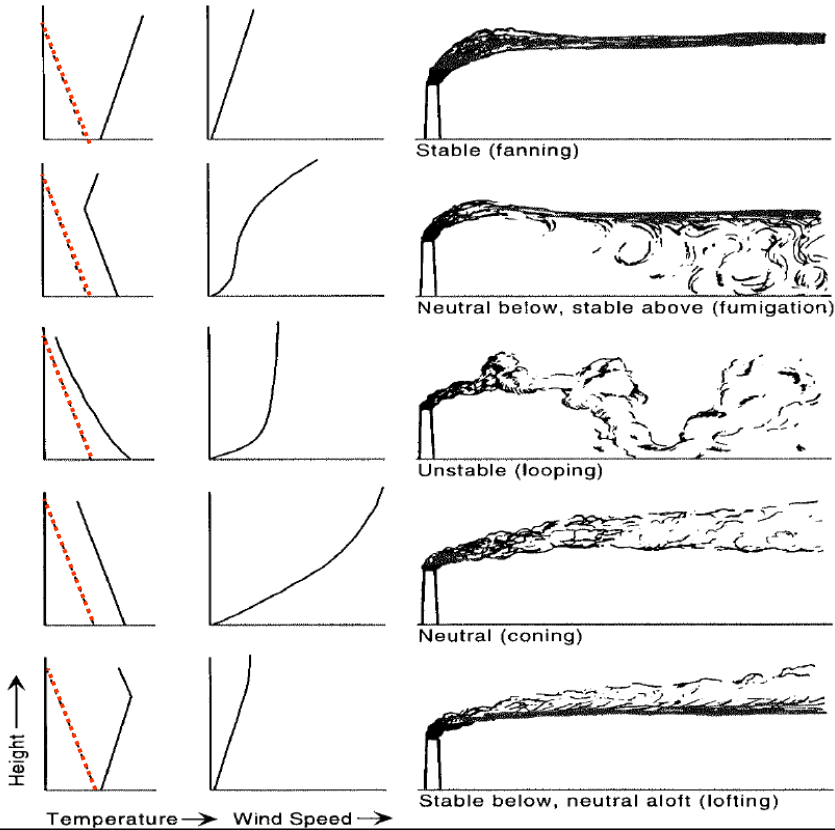
$Ri > 0$  atmosphère stable

- Exemple de calcul pour estimer Ri

$$Ri(z_m) \approx \frac{g}{T_m} \ln(z_2 / z_1) \frac{(\bar{T}_2 - \bar{T}_1)}{(\bar{u}_2 - \bar{u}_1)^2}$$

# Influence de la stabilité atmosphérique sur la dispersion d'un panache – Cycle de 24 h

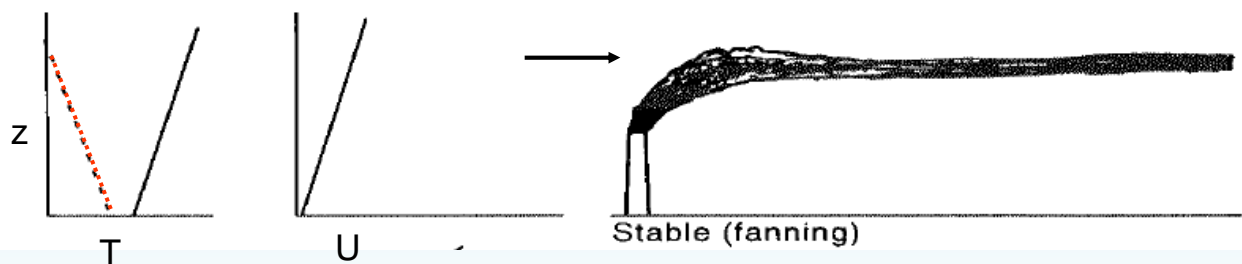
[Arya, 1988]



## Stabilité atmosphérique et dispersion

### Conditions de **forte stabilité** (vent modéré)

$$Ri > 0 \quad \frac{\partial T}{\partial z} > -1^{\circ}\text{C}/100\text{m} = -\Gamma_{ad}$$



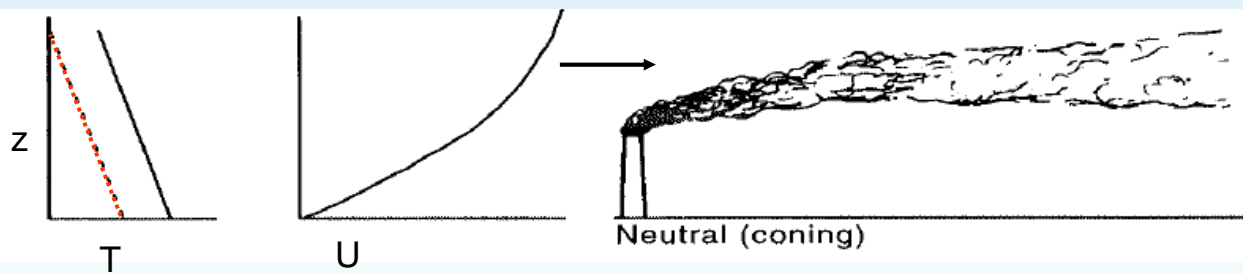
- Configuration nuit claire **ou** peu après le coucher du soleil **ou** peu après le lever du soleil
- Couche limite atmosphérique stable
- Les transferts turbulents sont beaucoup plus faibles dans la direction verticale que dans la direction transversale
- Le panache peut être animé de fluctuations latérales de grande période



## Stabilité atmosphérique et dispersion

### Conditions de **stabilité** neutre (vent fort)

$$Ri \approx 0 \quad \frac{\partial T}{\partial z} \approx -\Gamma_{ad}$$

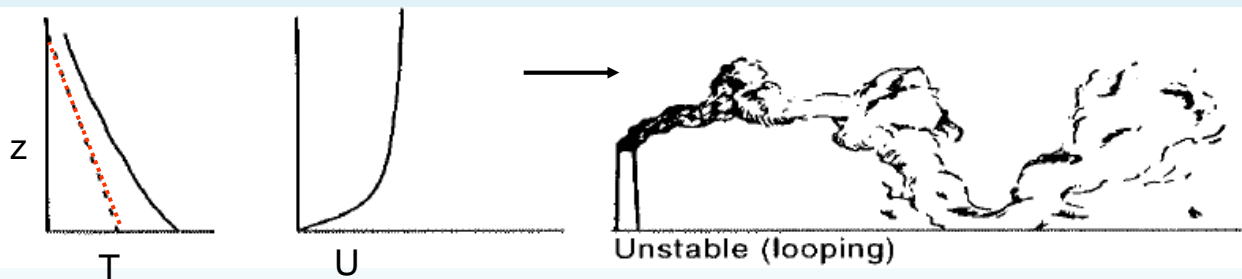


- Couverture nuageuse importante
- Couche limite atmosphérique neutre
- Turbulence d'origine dynamique

## Stabilité atmosphérique et dispersion

### Conditions de **forte instabilité** (vent faible)

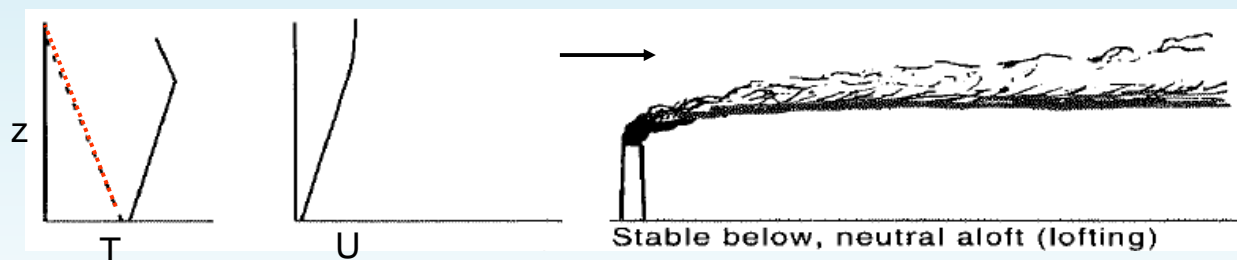
$$Ri < 0 \quad \frac{\partial T}{\partial z} < -1^{\circ}\text{C}/100\text{m} = -\Gamma_{ad}$$



- Panache en configuration ciel clair – rayonnement solaire intense
- Couche limite atmosphérique instable
- Polluants dispersés rapidement

## Stabilité atmosphérique et dispersion

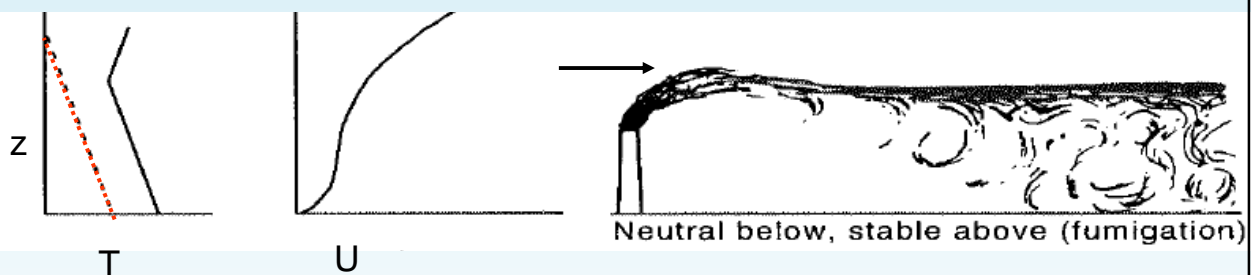
Conditions d'**inversion au-dessous** du sommet de la cheminée et **instabilité (ou neutralité) au-dessus**



- Couche stable à partir du sol qui s'observe souvent vers la fin de l'après-midi
- C'est un cas **très favorable** puisque la plus grande partie du panache est diffusée verticalement vers le haut, la diffusion vers le sol étant bloquée par la couche d'inversion

## Stabilité atmosphérique et dispersion

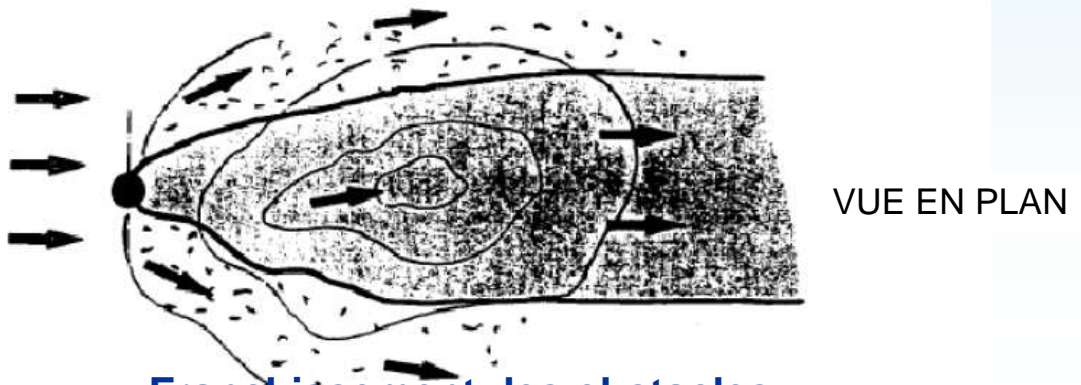
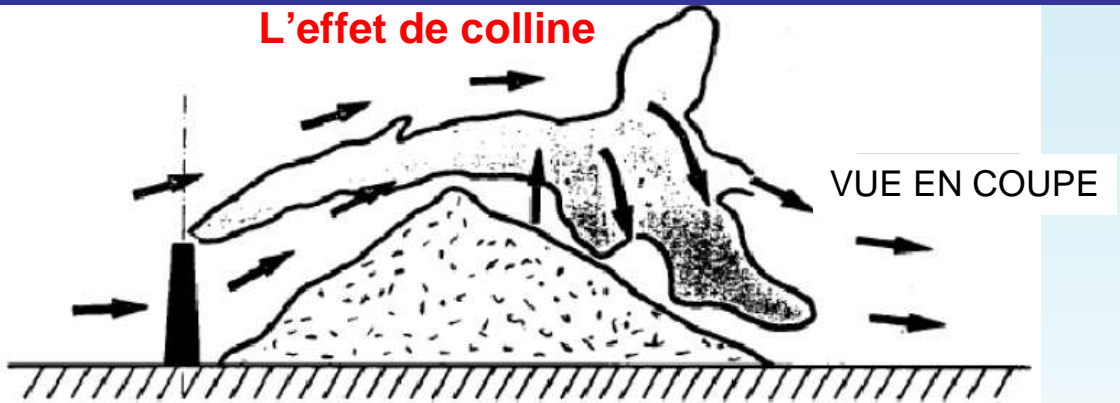
Conditions d'**inversion au-dessus** du sommet de la cheminée et d'**instabilité (ou neutralité) au-dessous**



- Couche instable à partir du sol qui s'observe souvent dans la matinée
- Lorsque la limite supérieure de la couche instable atteint le niveau du panache, les parties les plus basses sont diffusées vers le sol assez rapidement alors que la partie supérieure reste intacte
- A la limite, tout le panache sera situé dans la couche instable : c'est le cas du **trapping** où la limite inférieure de la couche stable joue le rôle d'un plafond fictif
- La couche d'inversion bloque les phénomènes d'ascendance
- Ces conditions sont **très défavorables** : condition de **fumigation**

## Effet de relief en atmosphère instable

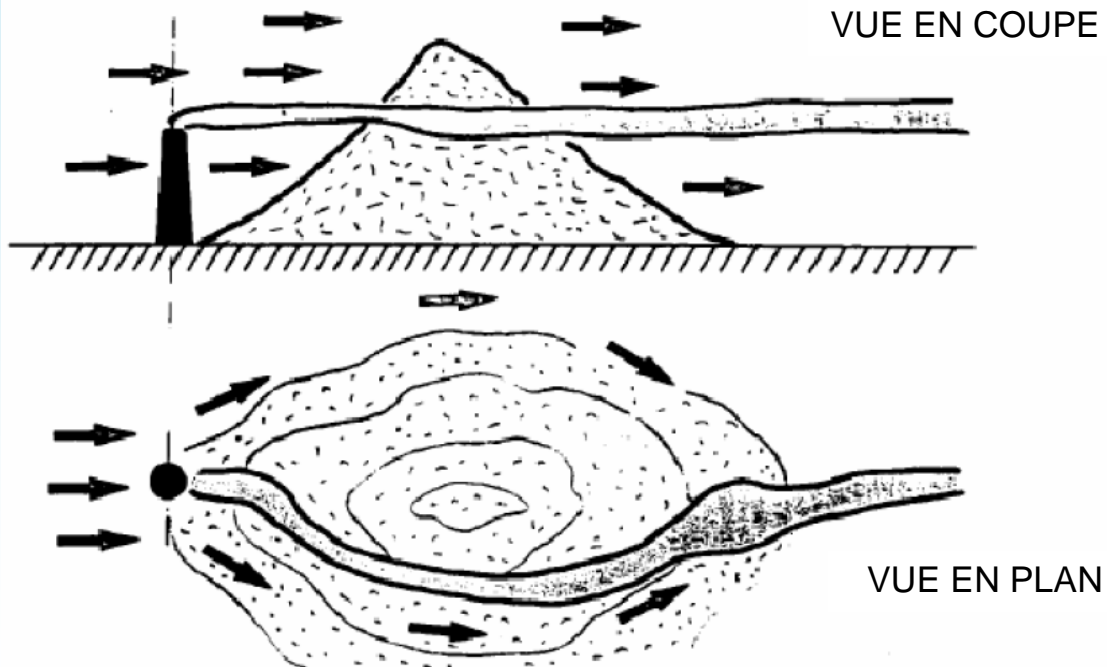
L'effet de colline



Franchissement des obstacles

## Effet de relief en atmosphère stable

### L'effet de colline

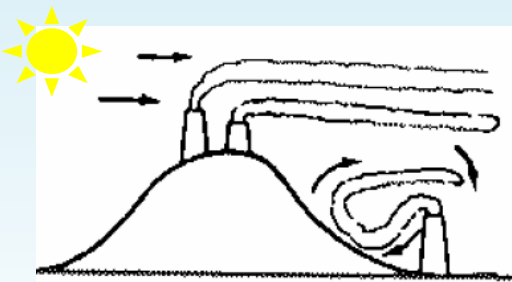


### Contournement des obstacles

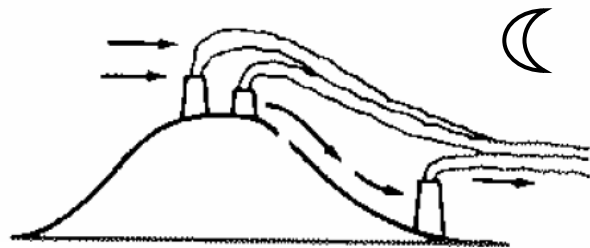
## Effet de relief et dispersion atmosphérique

### L'effet de colline

[Arya, 1988]



- *Accélération de l'écoulement au sommet et sur les côtés*
- *Zone tourbillonnaire à l'aval : vent de sens opposé à celui du vent incident*

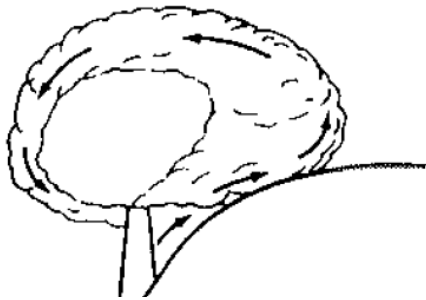


*Écoulement sans décollement*

## Effet de relief et dispersion atmosphérique

[Arya, 1988]

### L'effet de vallée



**Brise de vallée** : les pentes se réchauffent plus vite que les zones plates

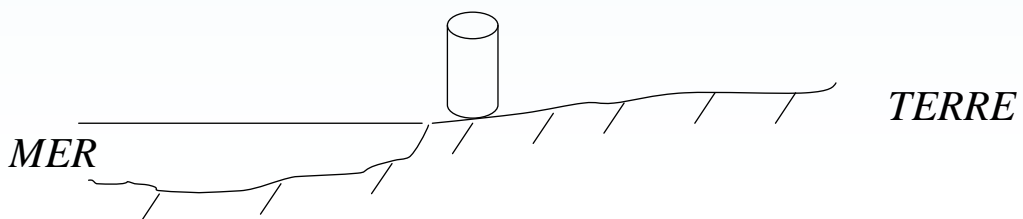
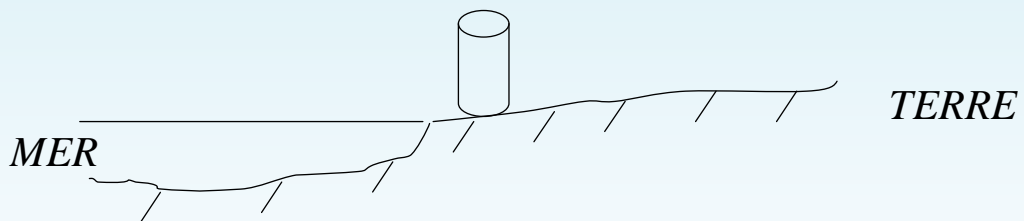


**Brise de montagne** : l'air froid s'écoule du sommet



## Ex6 : discontinuité de surface sur la météorologie et la dispersion de polluants (1)

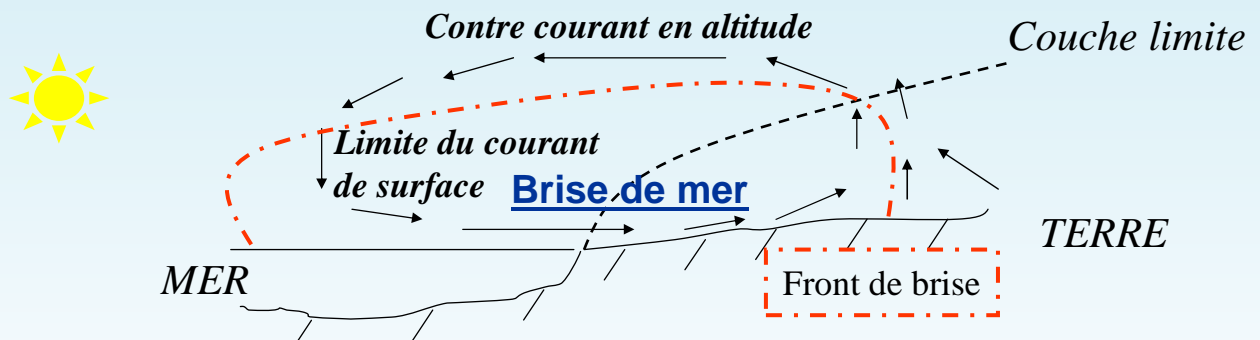
1. Expliquer les courants d'origine thermique (brise de mer **le jour** et de brise de terre **la nuit**)
2. Prévoir la dispersion d'un panache d'une cheminée



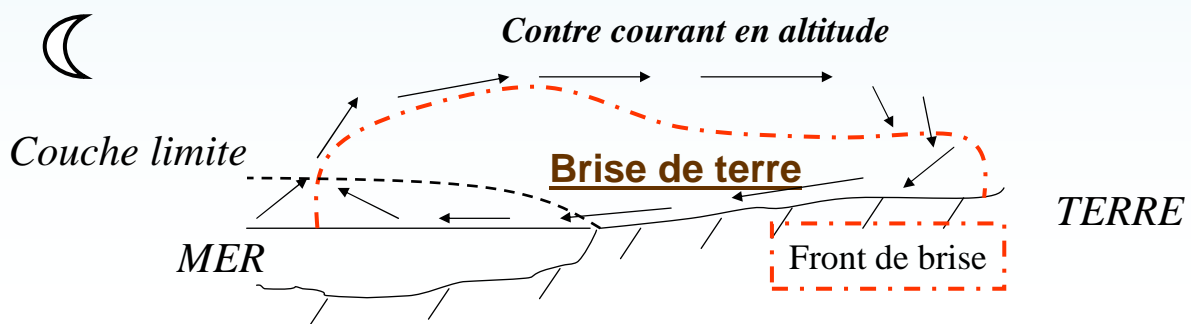
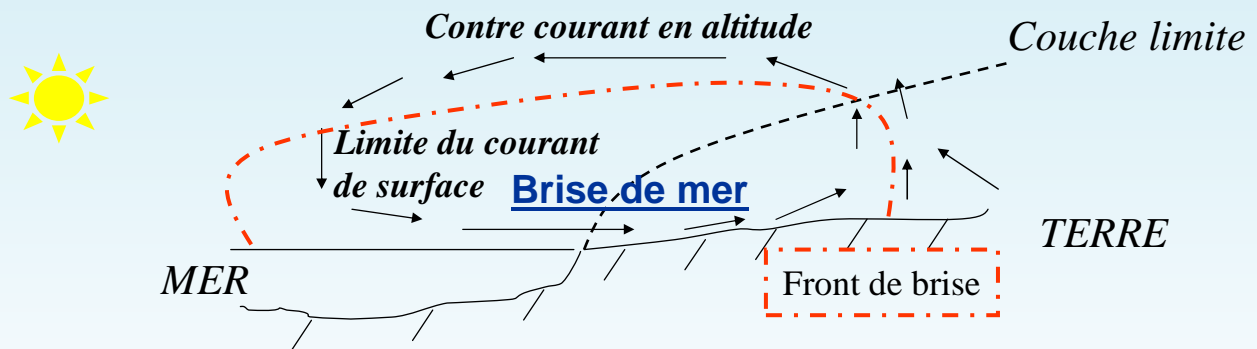
## Ex6 : Brise de mer – Brise de Terre (2)

- La journée, la terre se réchauffe plus vite que la mer
- Au-dessus de la terre, le flux de chaleur turbulent (positif) donne naissance à des courants ascendants
- L'air qui s'élève est remplacé par de l'air plus froid provenant de la mer : c'est la **brise de mer**
- La nuit, le phénomène s'inverse car la terre se refroidit plus vite que la mer : c'est la **brise de terre**
- Les phénomènes de brise sont limités dans l'espace et le courant de surface est compensé par un contre-courant en altitude

## Ex6 : Brise de mer – Brise de Terre (3)



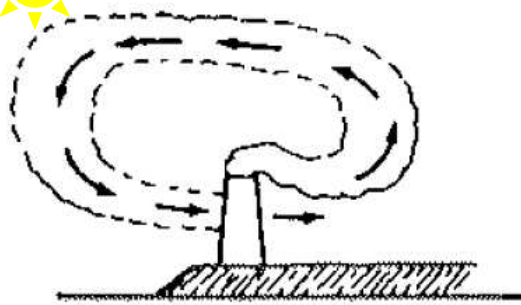
## Ex6 : Brise de mer – Brise de Terre (4)



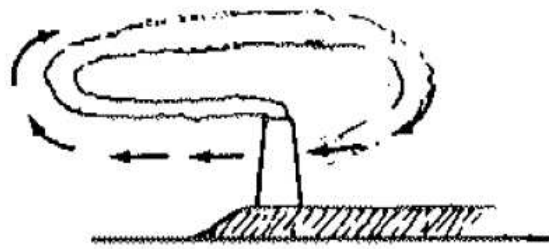
## Ex6 : Brise de mer – Brise de Terre (5)

**L'effet de discontinuité de surface**

[Arya, 1988]



Sea Breeze (daytime)



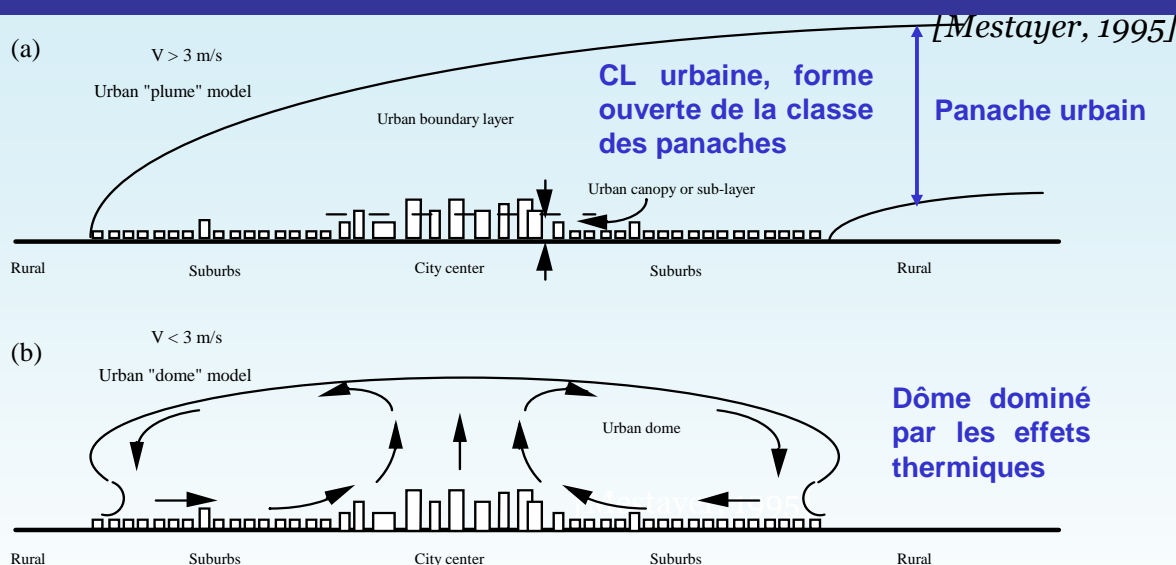
Land Breeze (nighttime)

(a) Land Sea Breeze

## Ex6 : Brise de mer – Brise de Terre (6)

- Les caractères de la brise dépendent de nombreux facteurs
  - La **différence de température entre l'eau et la terre**
  - La force et la direction du vent géostrophique
  - Le temps : le front de brise s'éloigne progressivement à l'intérieur des terres au cours de la journée
  - La rugosité du terrain, les pentes et la rugosité de l'eau, la courbure de la côte
  - Les conditions d'humidité au-dessus des terres

## Panache et dôme urbain

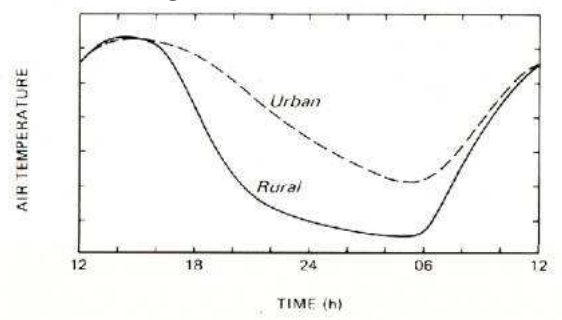
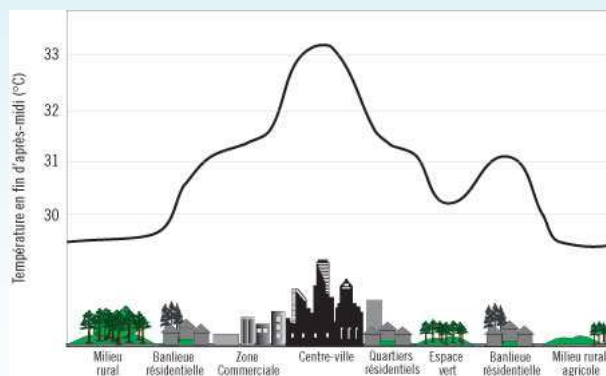


Existence d'un îlot de chaleur qui **subsiste la nuit**, tandis que le milieu rural environnant se refroidit (jusqu'à  $DT=12^\circ\text{C}$  en fonction du vent et du nombre d'habitants [Oke 1972])

- L'air chaud s'élève au-dessus de la ville
- Les polluants émis à la périphérie sont dispersés vers le centre-ville où s'installe une atmosphère fortement polluée

## Ilot de chaleur urbaine ICU

Les **îlots de chaleur urbains** désignent des élévations localisées des températures, particulièrement des températures maximales diurnes et nocturnes, enregistrées en milieu urbain par rapport aux zones rurales ou par rapport aux températures moyennes régionales



Activité anthropique (transport, chauffage...),  
urbanisation

- Diminution des vents
- Modification du bilan thermique de la surface





# Ilot de chaleur urbain ICU parisien

[<http://norois.revues.org/index1373.html>]

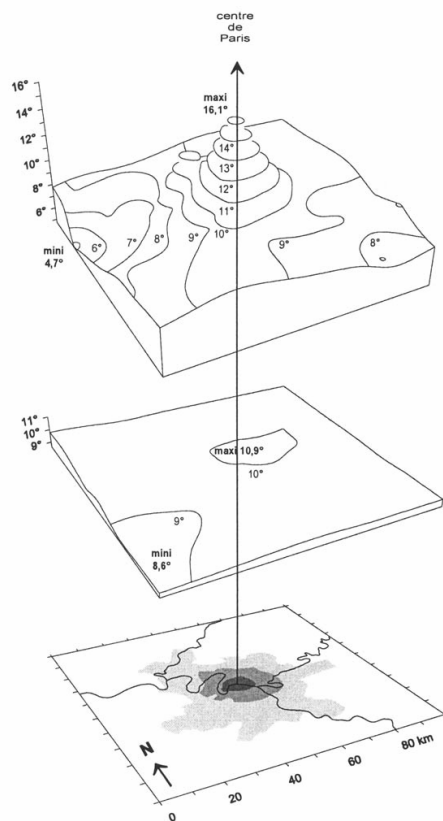


Fig. 1a

**Fort ICU** (maxi : +11,4°)  
Type de temps clair et calme  
(le 30 septembre 1997)

Fig. 1b

**Faible ICU** (maxi : +2,3°C)  
Type de temps couvert et venteux  
(exemple du 25 février 1997)

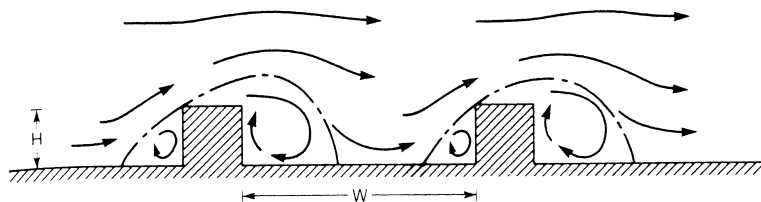
Fig. 1c

**Paris et son agglomération**  
(légende sur fig. 2)

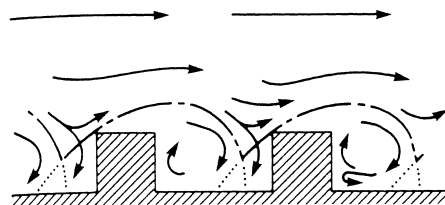
## Canopée urbaine

### 3 régimes fonction de la dimension des immeubles et de leurs rapprochements

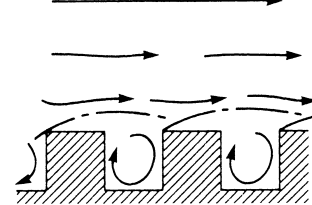
(a) écoulement à structures isolées



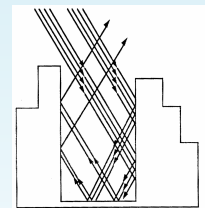
(b) écoulement à sillages perturbés



(c) écoulement rasant



[Oke, 1988]



- $H/W < 0.15$  : les zones de recirculation (2 tourbillons co-rotatifs) n'interagissent pas => écoulement à structures isolées
- $0.15 < H/W < 0.65$  : les zones de recirculation interagissent, les sillages sont perturbés et l'écoulement complexe
- $H/W > 0.65$  : l'écoulement extérieur peu affecté, une recirculation identique d'une rue à l'autre s'établit => régime affleurant, écoulement rasant

## Modélisation de la dispersion

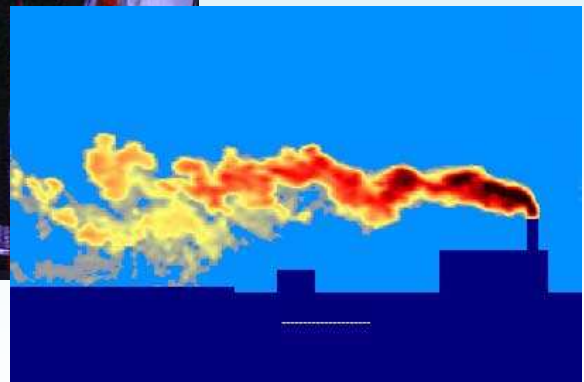
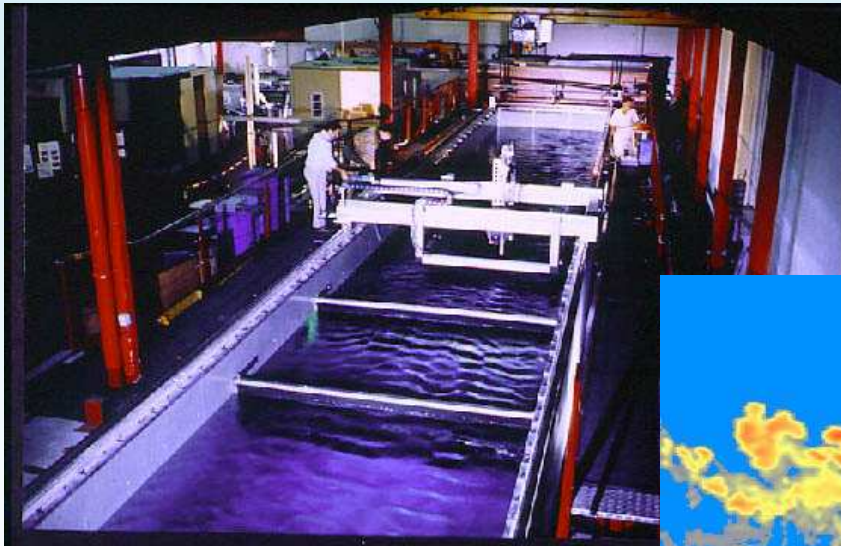
*[L. F. Richardson, 1922]*



*Représentation artistique de la prévision numérique du temps [Weather Prediction by Numerical Process, Richardson 1922] (photo Francois Schuiten)*

# Simulation en veine hydraulique

Groupe de Météorologie Expérimentale et Instrumentale

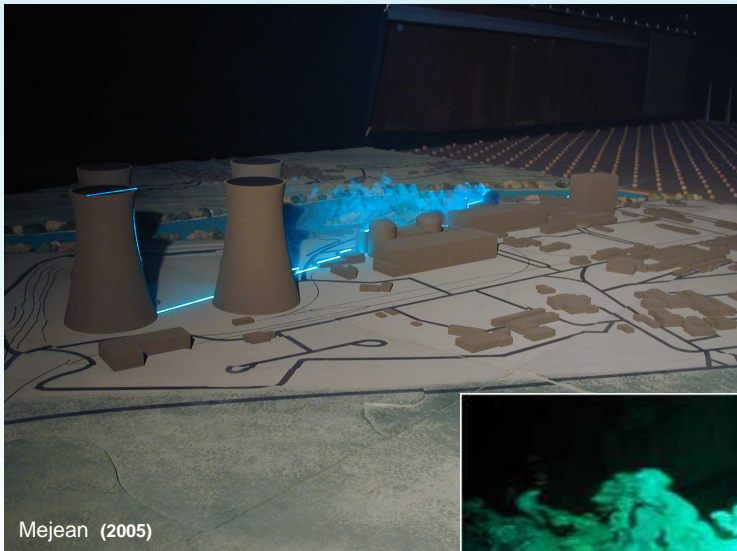


## Moyens de mesure et de traitement

- Chaînes anémométriques à films chauds
- Velocimètres à laser Doppler
- Conductimètres rapides
- Dispositifs de visualisation par plan laser

# Simulation en soufflerie

Maquette du site nucléaire du Bugey - ECL



Mejean (2005)

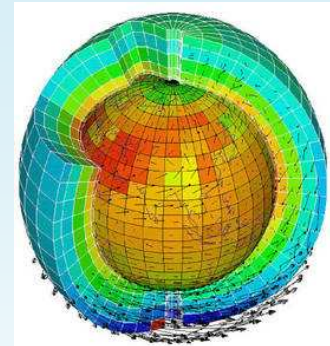


## Simulation numérique : principe général

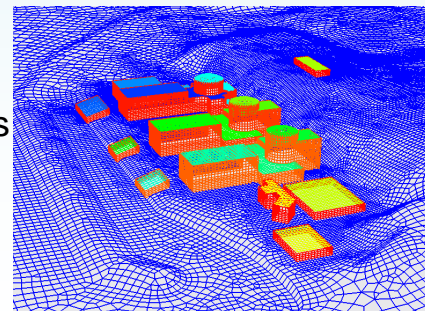
- Domaine découpé en volume de contrôle (maillage)
- Equations discrétisées et résolues dans chaque volume
- Conditions limites (interfaces sol / basses couches, émissions, ...)
- Conditions initiales (début du calcul)
- Pas de temps et durée de la simulation

=> **Solutions numériques : Champs  $U$ ,  $T$ ,  $P$ ,  $k$ ,  $C$ , etc.**

- Validations des modélisations physiques et des méthodes numériques
- Analyse de sensibilité et d'incertitudes
- Prévisions météorologiques, qualité de l'air, études d'impact



Maillage tri-dimensionnel d'un modèle de simulation du climat. Température et les flèches le vent.  
© LMD-IPSL



Maillage surfacique en zone bâtie sur le site de Flamanville.  
Code\_Sature - Cerea Edf r&d38

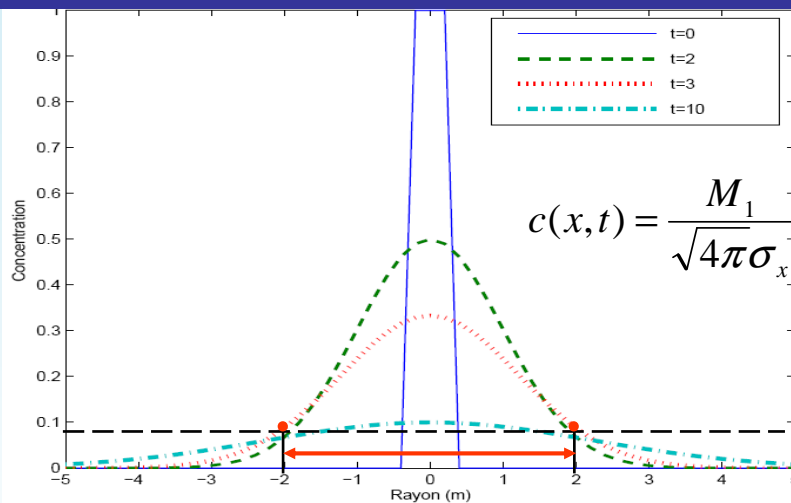
## Modèles Gaussiens : point de départ (1)

- Source ponctuelle de masse totale M introduite instantanément ( $M_1$  est la masse injectée M par unité de surface)
- Diffusion pure unidimensionnelle selon x dans un milieu infini et au repos : la solution exacte est

$$c(x,t) = \frac{M_1}{\sqrt{2\pi \times 2k_c t}} \exp\left(-\frac{x^2}{2 \times 2k_c t}\right)$$

- Cette relation décrit la diffusion de matière  $M_0$  qui s'étale selon une courbe gaussienne. La concentration maximale qui reste toujours à l'origine en  $x=0$  décroît avec le temps
- L'écart type  $\sigma_x(t) = \sqrt{2k_c t}$  de la distribution gaussienne correspond à une échelle d'étalement de la matière : c'est un indicateur de la dispersion => **coefficient de dispersion (m)**

## Modèles Gaussiens : point de départ (2)



Evolution de la répartition de la concentration  $c(x,t)$  pour une masse injectée instantanément en  $x=0$  dans un milieu au repos

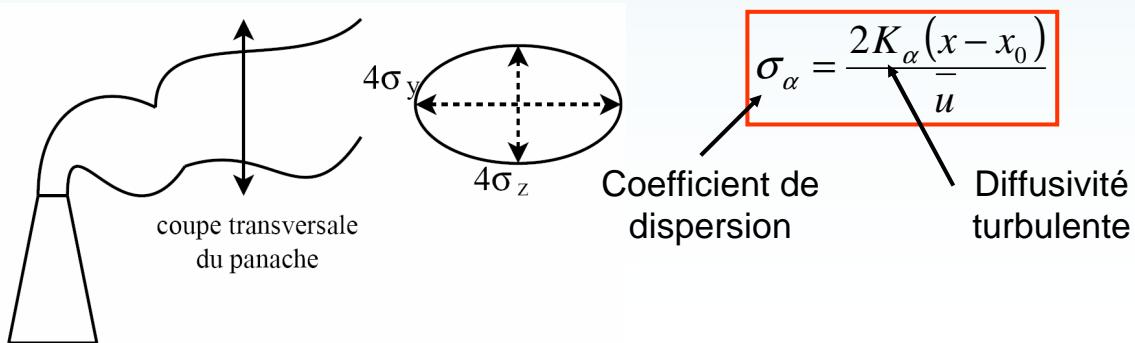
- Une source ponctuelle d'une grandeur extensive croit en formant un nuage toujours croissant dont la densité est décroissante
- Lorsque la concentration vaut 10 % de la concentration maximale  $\Rightarrow$  la largeur du nuage  $D \approx 4 \times \sigma_x$



## Modèle gaussien rectiligne ou modèle de panache gaussien (1)

- Source ponctuelle continue de débit massique constant  $Q$  [kg/s]
- Turbulence homogène dans l'espace et stationnaire dans le temps avec un champ de vent moyen uniforme
- Diffusivité turbulente dans la direction du vent (ici  $x$ )  $\ll$  convection (vents forts)

$$c(x, y, z, t) = \frac{Q}{2\pi \bar{u} \sigma_y \sigma_z} \exp\left(-\frac{(y - y_0)^2}{2\sigma_y^2}\right) \times \exp\left(-\frac{(z - z_0)^2}{2\sigma_z^2}\right) \quad x > x_0 \quad \bar{u} > 0$$

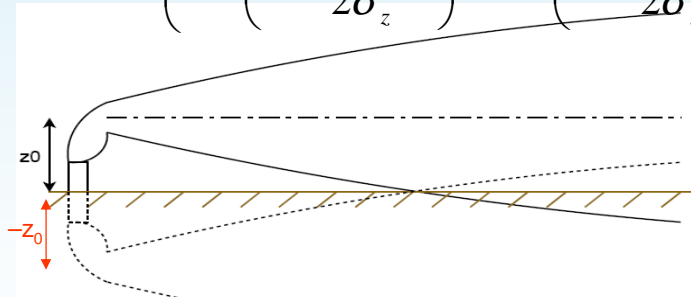


## Modèle gaussien rectiligne ou modèle de panache gaussien (2)

- Réflexion parfaite au sol (pas de perte) : source virtuelle placée en  $-z_0$

$$c(x, y, z, t) = \frac{Q}{2\pi \bar{u} \sigma_y \sigma_z} \exp\left(-\frac{(y - y_0)^2}{2\sigma_y^2}\right) \times$$

$$\dots \left( \exp\left(-\frac{(z - z_0)^2}{2\sigma_z^2}\right) + \exp\left(-\frac{(z + z_0)^2}{2\sigma_z^2}\right) \right) \quad x > x_0 \quad \bar{u} > 0$$

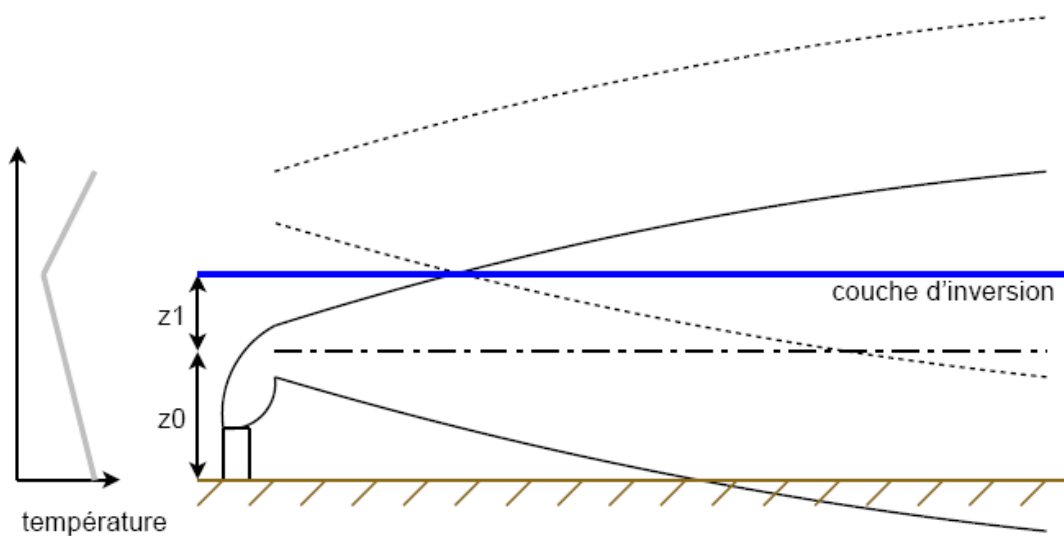


- La concentration combinée de plusieurs sources est la somme des solutions : c'est le **principe de superposition**
- On procède de manière similaire pour les réflexions sur la couche d'inversion qui se comporte comme un « plafond »

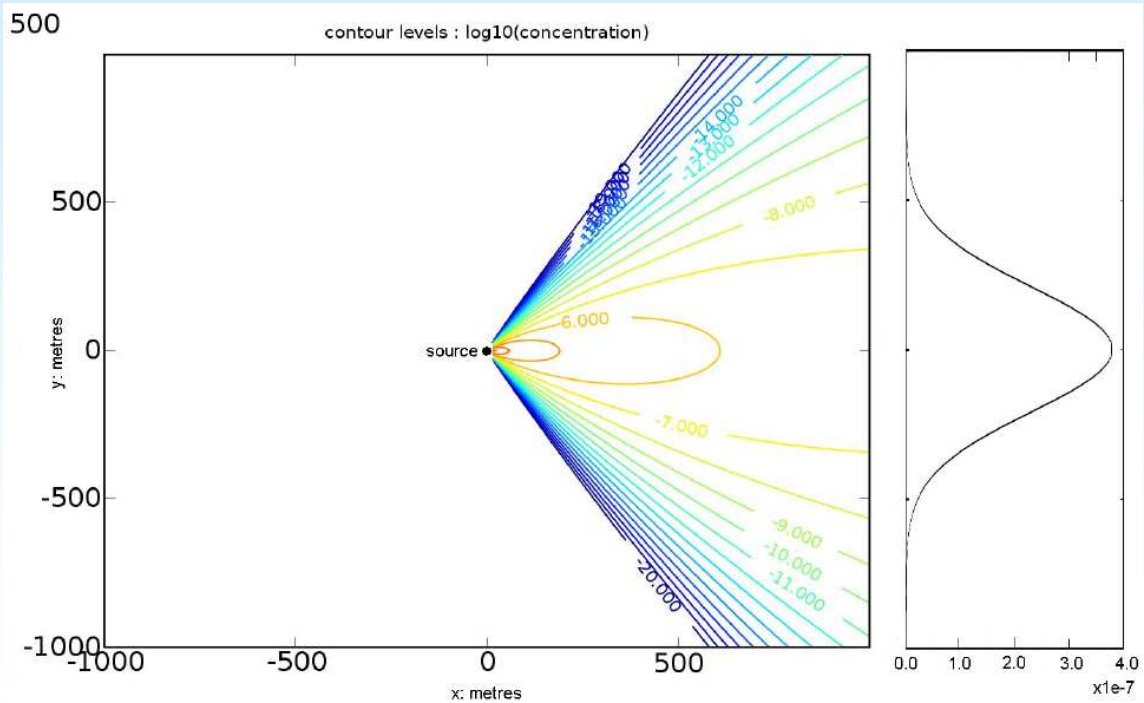
## Modèle gaussien rectiligne ou modèle de panache gaussien (3)

- Réflexion parfaite sur la couche d'inversion (pas de perte) :  
source virtuelle placée en  $z_0+2z_1$

$$c(\mathbf{x}) = \frac{q}{2\pi V_x \sigma_y \sigma_z} \exp\left(-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}\right) \left( \exp\left(-\frac{(z-z_0)^2}{2\sigma_z^2}\right) + \exp\left(-\frac{(z-z_0-2z_1)^2}{2\sigma_z^2}\right) \right)$$



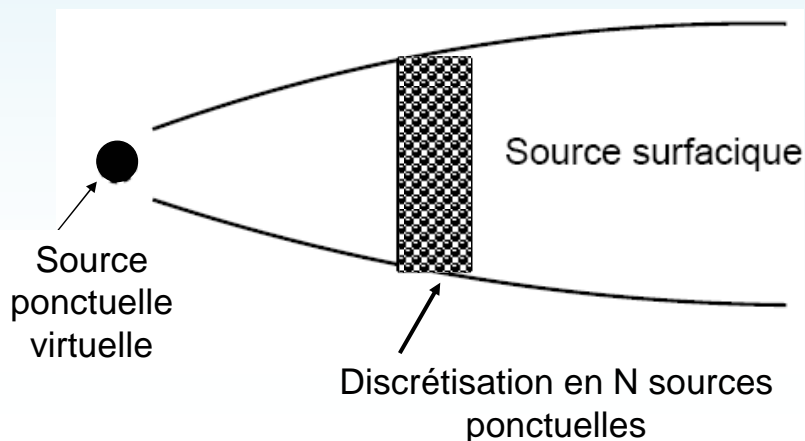
## Modèle de panache : exemple de calcul



**Modèle de panache (plume) dans le plan xy**

## Traitement de la dispersion pour des sources surfaciques

- Les modèles de panache de sources ponctuelles peuvent simuler la dispersion des émissions de sources surfaciques
  - Discrétisation de la source surfacique en N sources ponctuelles
  - En plaçant une source ponctuelle virtuelle en amont de la source surfacique telle que la dimension horizontale du panache au-dessus de la source surfacique soit égale à la largeur de cette dernière



## Classes de stabilité atmosphérique

### Exemple de la classification de Pasquill

- La stabilité atmosphérique intervient dans les processus turbulents
- Nécessité d'utiliser des tables
- Classes de Pasquill : méthode indirecte à partir des valeurs de vitesse du vent, du rayonnement solaire et de la nébulosité

Vitesse du vent à 10 m	JOUR			NUIT	
	Rayonnement solaire incident			Nébulosité	
[m/s]	Fort	Modéré	Faible	4/8 – 7/8	<3/8
< 2	A	A-B	B	F	F
2 - 3	A-B	B	C	E	F
3 – 5	B	B-C	C	D	E
5 - 6	C	C-D	D	D	D
>6	C	D	D	D	D

#### Classes de stabilité de Pasquill

A : très instable B : instable C : peu instable D : neutre E : stable F : très stable

## Classes de stabilité atmosphérique

### Exemple de la classification de Turner

- Classes de Turner : méthode indirecte à partir des valeurs de vitesse du vent, de l'index de radiation net NRI, variable avec l'altitude, l'azimuth et le taux d'ensoleillement (tabulation)

Vitesse du vent au sol (m/s)	NRI						
	4	3	2	1	0	-1	-2
0-1	1	1	2	3	4	6	7
2-3	1	2	2	3	4	6	7
4-5	1	2	3	4	4	5	5
6	2	2	3	4	4	5	6
7	2	2	3	4	4	4	5
8-9	2	3	3	4	4	4	5
10	3	3	4	4	4	4	5
11	3	3	4	4	4	4	4
>= 12	3	4	4	4	4	4	4

Classes de stabilité de Turner

1 : très instable 2 : instable 3 : peu instable 4 : neutre 5 : peu stable 6 : stable 7 : très stable

## Coefficients de dispersion empiriques de Briggs (1973) (1)

Briggs a synthétisé plusieurs expressions empiriques de coefficients de dispersion (Pasquill-Guifford et Brookhaven National Laboratory)

=> Les coefficients de dispersion de Briggs sont applicables à une grande plage de distance et pour un nombre varié de type de sources

Classe de Pasquill	$\sigma_y$ (m)	$\sigma_z$ (m)
A	$0.22x(1 + 0.0001x)^{-1/2}$	$0.20x$
B	$0.16x(1 + 0.0001x)^{-1/2}$	$0.12x$
C	$0.11x(1 + 0.0001x)^{-1/2}$	$0.08x(1 + 0.0002x)^{-1/2}$
D	$0.08x(1 + 0.0001x)^{-1/2}$	$0.06x(1 + 0.0015x)^{-1/2}$
E	$0.06x(1 + 0.0001x)^{-1/2}$	$0.03x(1 + 0.0003x)^{-1}$
F	$0.04x(1 + 0.0001x)^{-1/2}$	$0.016x(1 + 0.0001x)^{-1}$

**Coefficients de dispersion de Briggs pour le milieu rural**

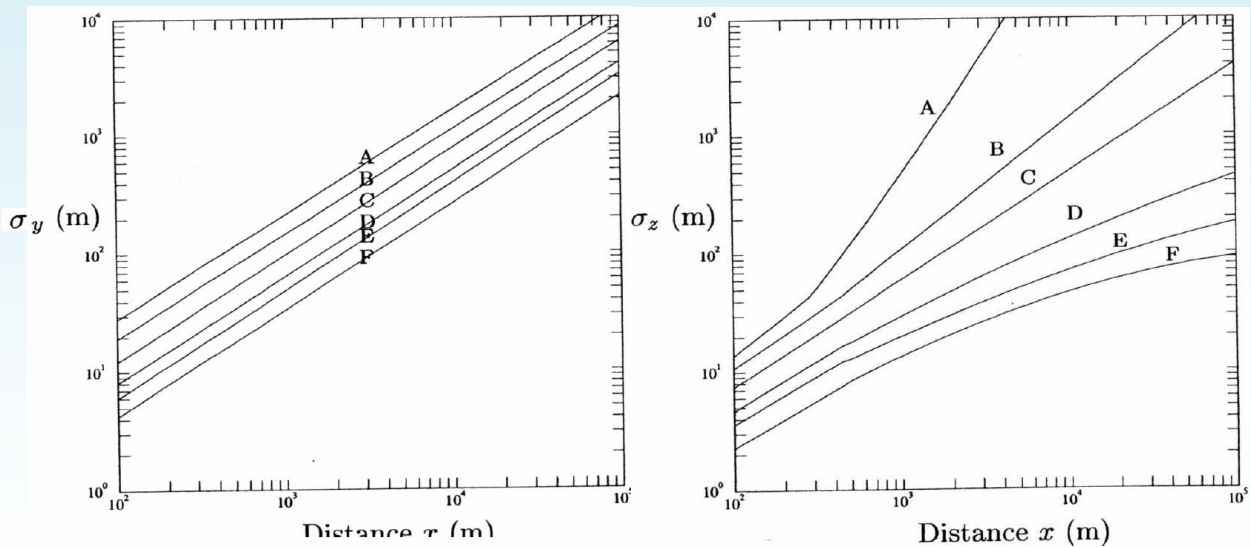
Classe de Pasquill	$\sigma_y$ (m)	$\sigma_z$ (m)
A-B	$0.32x(1 + 0.0004x)^{-1/2}$	$0.24x(1 + 0.001x)^{1/2}$
C	$0.22x(1 + 0.0004x)^{-1/2}$	$0.20x$
D	$0.16x(1 + 0.0004x)^{-1/2}$	$0.14x(1 + 0.0003x)^{-1/2}$
E-F	$0.11x(1 + 0.0004x)^{-1/2}$	$0.08x(1 + 0.0015x)^{-1/2}$

**Coefficients de dispersion de Briggs pour le milieu urbain**

**A : très instable**  
**B : instable**  
**C : peu instable**  
**D : neutre**  
**E : stable**  
**F : très stable**



## Coefficients de dispersion empiriques de Briggs (1973) (2)

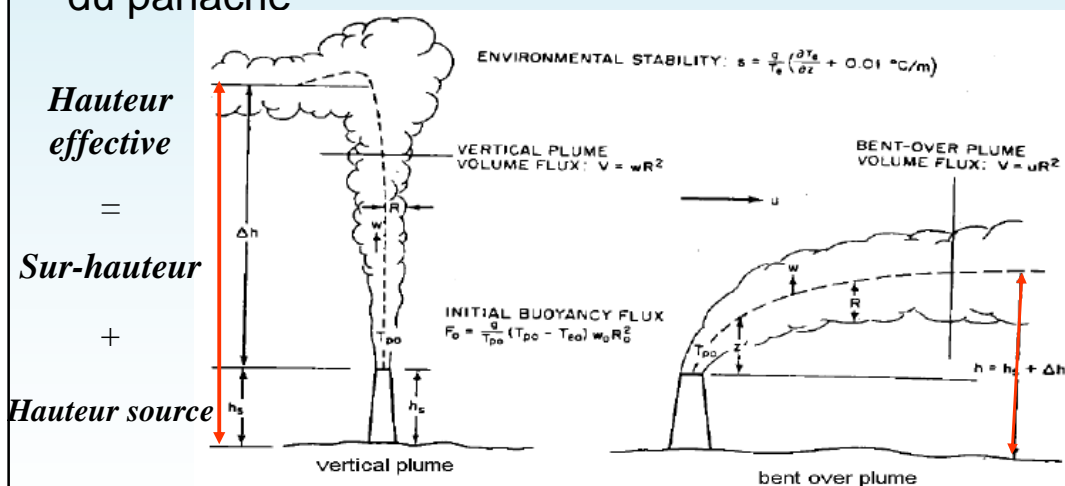


Abaques des coefficients de dispersion de Briggs en milieu urbain

A : très instable B : instable C : peu instable D : neutre E : stable F : très stable

## Sur-hauteur d'un panache chaud (1)

- On a vu l'importance de la hauteur de la source
- Dans le cas d'un rejet de cheminée, il apparaît une sur-hauteur qui résulte des forces de flottabilité dues à la chaleur du panache



Schematic drawing of thermally rising plumes.

Origin: Handbook on Atmospheric Diffusion, (1982) Hanna, Briggs and Hosker.

$h_s$ : stack height

$\Delta h$ : plume rise

$h = h_s + \Delta h$ : effective stack height

$$H_{\text{effective}} = \Delta H + H_s$$

## Sur-hauteur d'un panache chaud (2)

### Exemple de formules de Briggs (1972)

- **Classes de bonne diffusion A,B,C,D**

$$\Delta H = 38.71 \frac{(g w d^2 \Delta T / (4T_s))^{3/5}}{\bar{U}}$$

<b>A : très instable</b>
<b>B : instable</b>
<b>C : peu instable</b>
<b>D : neutre</b>
<b>E : stable</b>
<b>F : très stable</b>

$\Delta H$  : sur - hauteur [m]

$d$  : diamètre de la cheminée [m]

$w$  : vitesse de sortie des gaz [ $m.s^{-1}$ ]

$T_s$  : température des gaz à la sortie de la cheminée [K]

$\Delta T$  : écart de température entre l'air et  $T_s$  [K]

$\bar{U}$  : vitesse du vent à la hauteur de la cheminée [ $m.s^{-1}$ ]

$g = 9.81$  [ $m.s^{-2}$ ]

## Sur-hauteur d'un panache chaud (3)

### Exemple de formules de Briggs (1972)

- **Classes stables : E et F**

=> Le panache est gêné dans son élévation

$$\Delta H = 2.6 \frac{(g w d^2 \Delta T / (4T_s))^{1/3}}{s \bar{U}}$$

$$s = \frac{g}{T_{air}} \frac{\partial \theta}{\partial z} \left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial \theta}{\partial z} = 0.02 \text{ K / m pour la classe E} \\ \frac{\partial \theta}{\partial z} = 0.035 \text{ K / m pour la classe F} \end{array} \right.$$

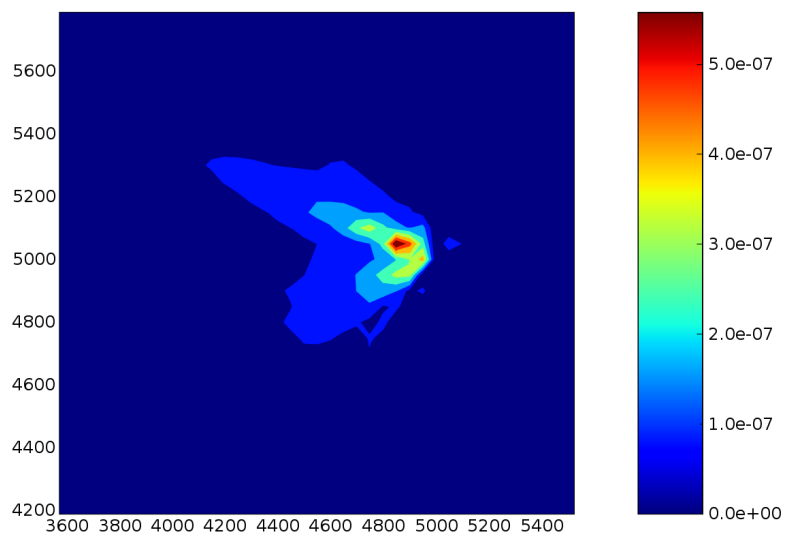
A : très instable  
 B : instable  
 C : peu instable  
 D : neutre  
 E : stable  
 F : très stable

- Calculs de sur-hauteur en fonction du vent et de la stabilité pour une cheminée d=2.7 m ; w=10.1 m/s Ts=353K Tair=298K

m/s	U=1.5	U=2	U=4	U=6	U=9.5	U=15
A-D	191 m	143 m	71 m	47 m	30 m	19 m
E	79 m	72 m	57 m	-	-	-
F	66 m	60 m	-	-	-	-

## Modèle gaussien de panache exemple de calcul

- Paramètres de dispersions de Briggs
- Réflexions au sol et sur la couche d'inversion
- Prise en compte de la surhauteur
- Différentes situations météorologiques



Plateforme Polyphemus - Cerea Edf r&d

## Modèle à bouffées

- Une bouffée ponctuelle est émise dans  $N_{\text{puff}}$  intervalles de temps successifs de durée  $\Delta t_{\text{puff}}$  et contient  $M = \Delta t_{\text{puff}} \times Q$
- Chaque bouffée évolue de manière indépendante selon un modèle gaussien
- La concentration en un point est calculée en sommant sur l'ensemble des bouffées  $i$

$$c(x, y, z, t) = \sum_{i=1}^{N_{\text{puff}}} \frac{Q_c \times \Delta t_{\text{puff}}}{(2\pi)^{3/2} \sigma_x^i \sigma_y^i \sigma_z^i} \exp\left(-\frac{(x - x_c^i)^2}{2\sigma_x^{i2}}\right) \exp\left(-\frac{(y - y_c^i)^2}{2\sigma_y^{i2}}\right) \exp\left(-\frac{(z - z_c^i)^2}{2\sigma_z^{i2}}\right)$$

$\sigma_\alpha^{i2} = 2K_\alpha(t - t_0)$  dépendent de l'age de la bouffée

$x_c^i, y_c^i, z_c^i$  coordonnées du centre de la bouffée  $i$  émise au temps  $t_i = i\Delta t_{\text{puff}}$

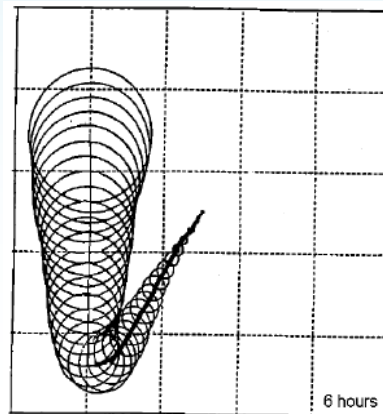
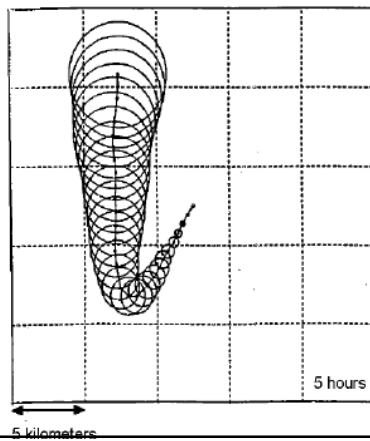
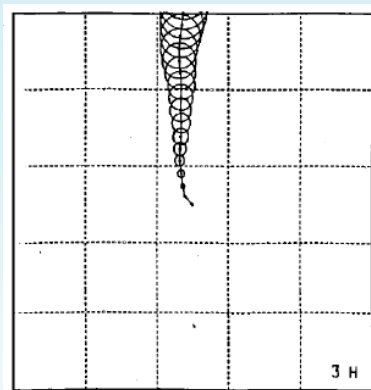
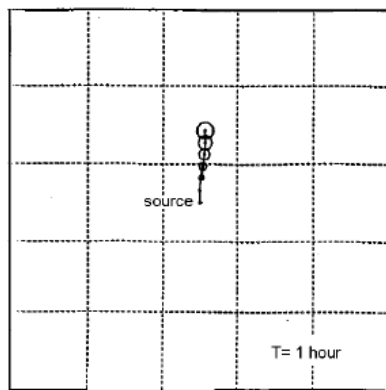
Si  $\bar{u}$  stationnaire  $x_c^i(t) = x_0 + \bar{u}(t - t_i); y_c^i = y_0; z_c^i = z_0$



- Un modèle à bouffées (Gaussian puff model) permet de représenter la variation des émissions et des champs météorologiques au cours du temps

## Modèle à bouffées

exemple de calcul : champs météorologiques variables en t



## Modèle Lagrangien Stochastique (1)

- Il ne s'agit plus de considérer un nuage de particules dans son ensemble mais chaque particule individuellement
- Cette approche consiste à suivre, au sens lagrangien, une particule individuelle dans son mouvement et à reconstituer sa trajectoire en tenant compte de l'interaction avec l'écoulement du fluide
- Phase fluide
  - Modèle dynamique, modèle de turbulence
- Phase particulaire
  - La trajectoire d'une particule est calculée par la résolution de son équation dynamique
- Le mouvement du fluide ayant une certaine mémoire ou persistance, la trajectoire est simulée par une marche **pseudo-aléatoire**



## Modèle Lagrangien Stochastique (2)

- Equation du mouvement d'une particule solide dans un écoulement non uniforme (à titre indicatif)

$$m_p \frac{d\vec{v}_p}{dt} = m_f \left( \frac{D\vec{u}}{Dt} \right)_{\vec{x}_p(t)} + (m_p - m_f) \vec{g} \quad \text{Force qui s'exerce sur un élément fluide qui serait à la place de la particule solide}$$

$$- \frac{1}{2} m_f \frac{d}{dt} \left\{ \vec{v}_p(t) - \vec{u}(\vec{x}_p(t), t) - \frac{d_p^2}{40} \nabla^2 \vec{u}(\vec{x}_p(t), t) \right\} \quad \text{Force qui résulte de la perturbation du champ de vitesse du fluide provoquée par la présence de la particule}$$

$$- 3\pi d_p \mu \left\{ \vec{v}_p(t) - \vec{u}(\vec{x}_p(t), t) - \frac{d_p^2}{24} \nabla^2 \vec{u}(\vec{x}_p(t), t) \right\}$$

$$- \frac{3\pi d_p^2 \mu}{2} \int_0^t \left( \frac{d}{d\tau} \left\{ \vec{v}_p(\tau) - \vec{u}(\vec{x}_p(\tau), \tau) + \frac{d_p^2}{24} \nabla^2 \vec{u}(\vec{x}_p(\tau), \tau) \right\} \right) \frac{d\tau}{\sqrt{\pi\nu(t-\tau)}}$$

- Hypothèses

- Particules sphériques et de tailles inférieures ou comparables aux échelles de Kolmogorov
- Masses volumiques plus grandes que celle du fluide  $\frac{\rho_p}{\rho} > 1000$
- Nombres de Stokes compris entre 0.01 et 100

## Modèle Lagrangien Stochastique (3)

- Equation du mouvement d'une particule solide

$$\frac{d\vec{v}_p}{dt} = \frac{\vec{u}(\vec{x}_p(t), t) - \vec{v}_p(t)}{\tau_p} f(\text{Re}_p) + \vec{g}$$

Vecteur vitesse de la particule  $\rightarrow$   $\frac{d\vec{v}_p}{dt}$   
 Vitesse instantanée du fluide localement *non perturbé* par la particule et vue par la particule le long de sa trajectoire  $\rightarrow$   $\vec{u}(\vec{x}_p(t), t)$   
 $\tau_p$  Temps de relaxation de la particule (force de traînée)  
 $\vec{g}$  Gravité

$u_i = \bar{U}_i + u'_i$   $\rightarrow$  Les fluctuations  $u'$  de la vitesse du fluide doivent être générées par un processus stochastique (selon un processus euléro-lagrangien)

- La position de la particule n'est fonction que de  $t$  dont la valeur est reliée à sa vitesse par  $\frac{dx_p}{dt} = \vec{v}_p$

## Modèle basé sur l'équation de Langevin (4)

- La fluctuation  $u'$  du fluide au pas de temps  $(t+\Delta T)$  est calculée par :
  - 1) un terme qui exprime la **mémoire** ou **persistance** du mouvement, fonction de  $u'$  à l'instant  $t$
  - 2) un terme **d'accélération aléatoire** pour rendre compte de la fluctuation turbulente
- En turbulence homogène :

$$u_i^{n+1} = \underbrace{u_i^n R_L(\Delta t)}_{\text{mémoire}} + \underbrace{\sigma_{u_i} \sqrt{(1 - R_L^2(\Delta t))} \xi^n}_{\text{partie aléatoire}}$$

*Ecart-type des fluctuations de vitesse* (pointing to  $\sigma_{u_i}$ )

*Fonction d'autocorrélation Lagrangienne fct de l'échelle de temps intégrale Lagrangienne  $T_L$  (mesure de temps de la persistance des structures tourbillonnaires)*

*Nombre aléatoire de moyenne nulle et d'écart-type égal à 1*

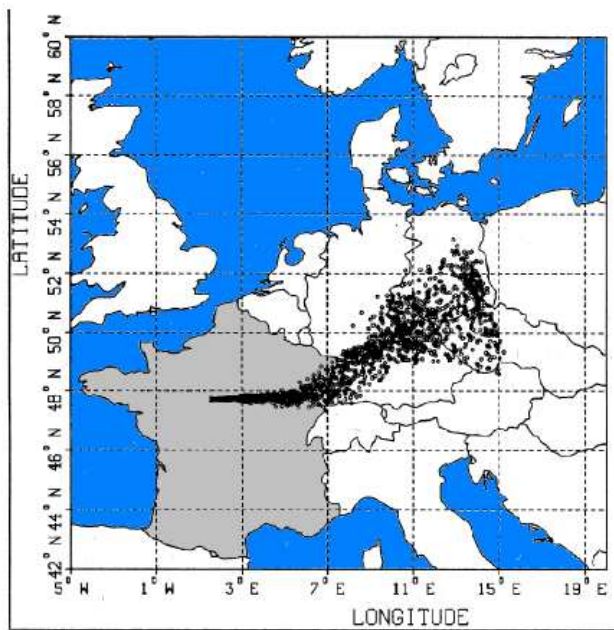
- Un traitement statistique d'un grand nombre de trajectoires permet d'obtenir la concentration moyenne, etc.

## Modèle Lagrangien Stochastique (5)

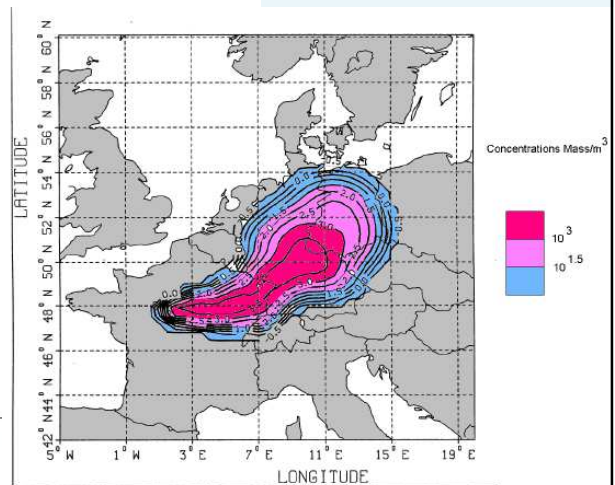
Simulation à l'échelle européenne

- Modèle basé sur une marche aléatoire
- Nuage de particules et champ de concentration

[Vendum]



Cloud of Particles after 24 hours  
Release: 1 part/minute



## Modèle Eulérien diffusif (1)

- **Hypothèses**

- Écoulement dilué  $R = \left( \frac{N_p V_p}{V} \right) \leq 0.001$
- Fluide incompressible
- Pas d'interaction fluide/particules, turbulence/particules
- Pour les particules pesantes  $0.1\mu m < d_p \leq 100\mu m$
- Le champ de concentration noté  $C$  est turbulent et admet une décomposition de Reynolds

$$C = \bar{c} + c'$$

## Modèle Eulerien diffusif (1)

- Équation de transport de la concentration ou équation turbulente d'advection-diffusion-réaction

$$\underbrace{\frac{\partial \bar{c}}{\partial t}}_{1} + \underbrace{\bar{u}_j}_{2} \frac{\partial \bar{c}}{\partial x_j} - \underbrace{v_s}_{3} \frac{\partial \bar{c}}{\partial x_j} \delta_{j3} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ k_c \frac{\partial \bar{c}}{\partial x_j} - \underbrace{\overline{c'u_j'}}_{4} \right] + \underbrace{\bar{S} - \bar{D} + \bar{R}}_{5}$$

1- Variation temporelle

2- Transport par advection : c est transportée par le fluide en mvt à la même vitesse

3- Vitesse de sédimentation : glissement des particules pesantes / particules fluides

4- Transport par diffusion moléculaire et diffusion turbulente (corrélation turbulente à modéliser)

5- Sources d'émissions - pertes par dépôt (sec et humide) + formations / pertes chimiques

## Modèle Eulerien diffusif (2)

- **Flux turbulent de masse**

Analogie entre les transferts de types diffusifs par agitation turbulentes et par agitations moléculaires

$$\overline{c' u'_j} = -k_{c_t} \frac{\partial \bar{c}}{\partial x_j}$$

$$k_{c_t} = \frac{\nu_t}{\sigma_c} \text{ diffusivité turbulente de la grandeur } c \text{ [m}^2 \cdot \text{s}^{-1}\text{]}$$

$\sigma_c$  : nombre de Prandtl – Schmidt

$$K = \begin{pmatrix} K_{xx} & 0 & 0 \\ 0 & K_{yy} & 0 \\ 0 & 0 & K_{zz} \end{pmatrix}$$

- **Diffusivité turbulente ou coefficient d'échange turbulent**

– K est un tenseur diagonal où seul  $K_{zz}$  est modélisé à partir de considérations physique et  $K_{xx} = K_{yy} = K_{zz}$  au mieux

– Modèles de turbulence isotrope ( $l_m$ , k-l...): K est un scalaire et le nombre de Schmidt est souvent pris à 1 (diffusion turbulente de la quantité de mvt == diffusion turbulente de la masse)

$$K = k_{c_t} = \nu_t$$

63

## Ex7 : panache Gaussien (1)

1- La concentration  $c$  [kg/kg d'air] d'un polluant passif est supposée régie par l'équation de diffusion ( $\nu_c$  coefficient, constant, de diffusion moléculaire)

$$\frac{dc}{dt} = \nu_c \frac{\partial^2 c}{\partial x_j \partial x_j}$$

Donner l'équation régissant la concentration moyenne au sein de la CLA (axiomes de Reynolds et fluide incompressible)

2- On cherche la solution stationnaire pour  $\bar{c}$ . On suppose :

- La diffusion moléculaire négligeable devant la diffusion turbulente
- Le vent est constant et parallèle à l'axe Ox (Oz axe vertical)
- La diffusion turbulente selon Ox est négligeable devant le transport par le vent moyen noté U
- Les flux turbulents du polluant selon Oy et Oz s'expriment au moyen des coefficients d'échanges  $K_y$  et  $K_z$

A) Ecrire l'équation stationnaire de  $\bar{c}$

B) En supposant  $K_y$  et  $K_z$  constants, trouver à quelles conditions sur  $\sigma_y, \sigma_z$  (supposés ne dépendre que de  $x$ ) la forme suivante est solution :



## Ex7 : panache Gaussien (2)

$$\bar{c} = \frac{A}{\sigma_y \sigma_z} \exp\left(-\frac{(y-y_o)^2}{2\sigma_y^2} - \frac{(z-z_o)^2}{2\sigma_z^2}\right) \quad A, y_o, z_o = \text{cstes}$$

$\sigma_y, \sigma_z$  sont les mesures des dimensions du panache selon Oy et Oz. Les dimensions visibles du panache contenant 95% de polluants sont de l'ordre de 4 fois ces paramètres.

C) On suppose une émission ponctuelle continue à un taux Q (kg/s) par une cheminée de hauteur h, située au point x=0, y=0. On retient dans ce cas la condition à la limite suivante :

$$\rho_o \bar{c}(x, y, z) \xrightarrow{x \rightarrow 0} \frac{Q}{U} \delta(y) \delta(z-h) \delta \text{ étant la distribution de Dirac}$$

a- Donner l'expression des coefficients de dispersion en fct de  $K_y, K_z, U, x$

b- Préciser la constante A en fct de U et Q

c- Préciser les constantes  $y_o$  et  $z_o$

3- On suppose de plus que pour tenir compte du sol non absorbant (en  $z=0$ ) qu'il y a une réflexion totale en introduisant une source fictive « image » en  $(0,0,-h)$

## Ex7 : panache Gaussien (3)

La concentration réelle est alors :

$$\overline{c_r}(x, y, z) = \overline{c_h}(x, y, z) + \overline{c_{-h}}(x, y, z)$$

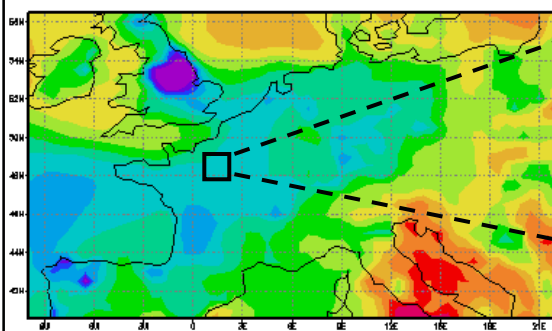
- A) Vérifier que le flux vertical de polluant est nul à la surface
- B) a- Calculer la concentration  $c_{\max}$  du maximum de pollution au sol et la distance à la cheminée  $x_{\max}$  à laquelle il se produit.  
b- Commenter ce résultat  
c- AN :  $h=30$  m,  $U=3$  m/s,  $Q=0.23$  g/s,  $K_z=3$  m<sup>2</sup>s<sup>-1</sup>,  $\sigma_z = 0.5\sigma_y$
- C) Donner l'allure des courbes de concentration, en  $x_{\max}$  et en une valeur de  $x$  intermédiaire

# Modèles 3-D de chimie transport (CTM)

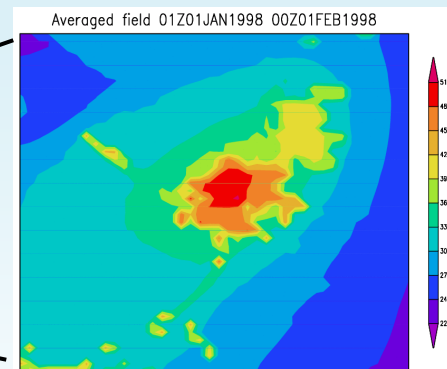
Calcul off-line, raffiné à l'échelle régionale (one-way)

[Foudhil, 2004]

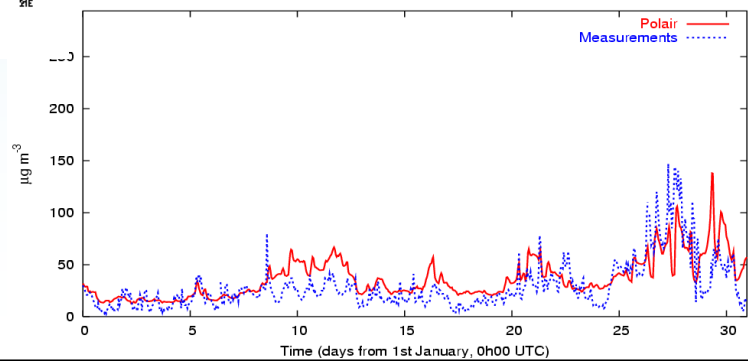
- Concentrations en PM10 [ $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ] sur Lille dans le cadre d'un plan de déplacement urbain



Plateforme Polyphemus, Cerea Edf r&d



/libre/foudhil/Lille\_98/Post\_Polair/OUT\_RES\_JANV98\_BC\_NO2/PM10.bin -- Marcq-en-Baroeul



## Modèle Gaussien de panache

### Avantages et inconvénients

<b>Avantages</b>	<b>Inconvénients</b>
Expressions analytiques	Source continue Pas d'obstacles, pas de relief
Simplicité de programmation	Champs de vent uniforme (en vitesse et direction)
Temps de calcul faible	
Littérature abondante pour les paramétrisations	La qualité des résultats dépend des paramétrisations

## Modèle à bouffées

### Avantages et inconvénients

Avantages	Inconvénients
Emissions qui varient dans le temps	Nombre de sources limité
Relative facilité d'implémentation dans des outils opérationnels	Champs météorologiques uniformes dans une même bouffée
Les champs météorologiques varient d'une bouffées à l'autre et dans le temps	Pas d'obstacles, pas de relief
Possibilité de rajouter des processus spécifiques (dépôt, décroissance)	Mais de manière approximative

69

## Avantages et inconvénients Modèle Eulerien- Lagrangien Stochastique (CFD)

Avantages	Inconvénients
Résolution des équations de la mécanique des fluides : prise en compte de champs de vents 3D, de terrains complexes	Complexité des modèles mathématiques
Sources continues et instantanées	Temps de calcul élevé
Faible diffusion numérique	
Simule la dispersion en champs proche	Difficultés de coupler des modèles de chimie pour les particules réactives

70

## Avantages et inconvénients Modèle Eulerien-Eulérien (CFD)

Avantages	Inconvénients
Résolution des équations de la mécanique des fluides	Complexité des modèles numériques
Prise en compte de l'ensemble des processus influençant la dispersion : écoulement, turbulence, obstacles, relief	Temps de calcul élevé Influence du maillage Précision dépendant de la méthode de résolution, du choix des modèles
Possibilités de coupler des modèles : chimie, aérosols	
<b>Ceci est vrai pour tous les modèles !!!!</b>	La modélisation de la turbulence est fondamentale mais reste difficile

## Une panoplie de modèles pour faire quoi au juste?

*[Sportisse, 2008]*

Type de modèle	Domaine de calcul	Application
<b>CFD réactive (on-line)</b>		
DNS	échelle très locale ~ 1 km	Recherche (turbulence)
LES	échelle très locale ~ 1 km	Recherche (turbulence)
RANS	échelle locale ~ 10 km	Environnement complexe (bâti...)
<b>Modèles off-line</b>		
Modèles gaussiens	échelle locale ~ 10 km	Risque industriel (impact local)
Modèles lagrangiens	échelle locale ~ 10 km échelle régionale ~ 100 km et échelle continentale ~ 1000 km	Risque industriel (radionucléides), biologique
Modèles de chimie-transport	échelle régionale ~ 100 km et échelle continentale ~ 1000 km	Prévision et impact (photochimie)
Modèles globaux	échelle globale ~ 10 000 km	Transport intercontinental
<b>Modèles on-line</b>		
CTM couplé	échelle continentale	Recherche (photochimie)
GCM	échelle globale	Impact climatique

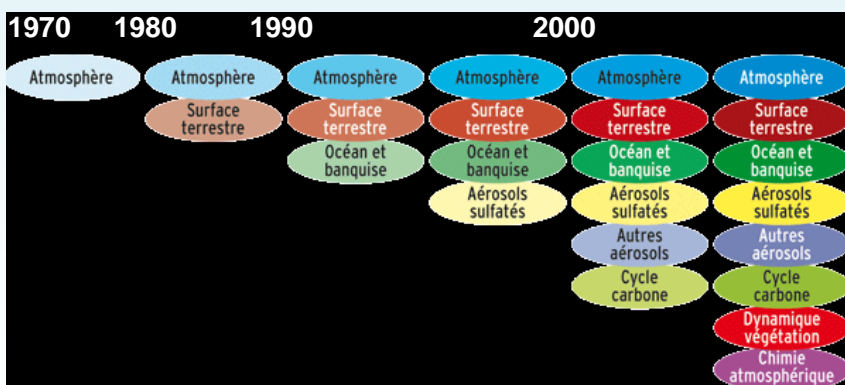
**Modèles numériques utilisés en qualité de l'air, échelles d'étude et application courante**

72



## Simulation numérique : nouvelle approche

- Prendre en compte les processus physiques, couplés entre eux, agissant sur (ou présents dans) le système
- Modélisation d'un enchaînement de phénomènes divers et d'ordres de grandeur très différents puisqu'il en intègre toute la connaissance, théorique, expérimentale et empirique, à différentes échelles, dans des briques élémentaires qu'il s'agit d'assembler

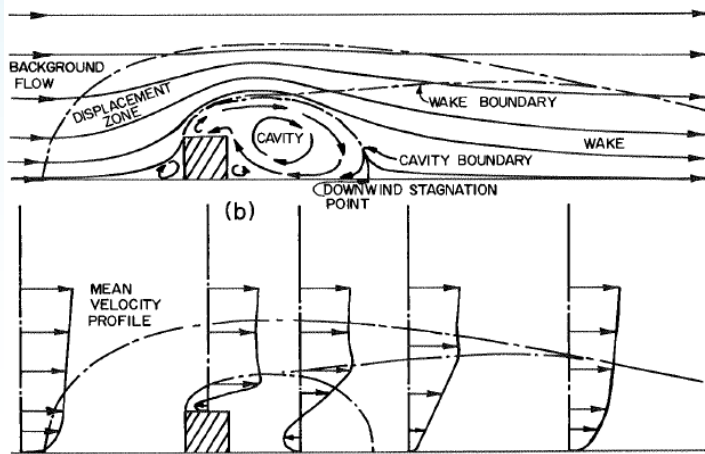
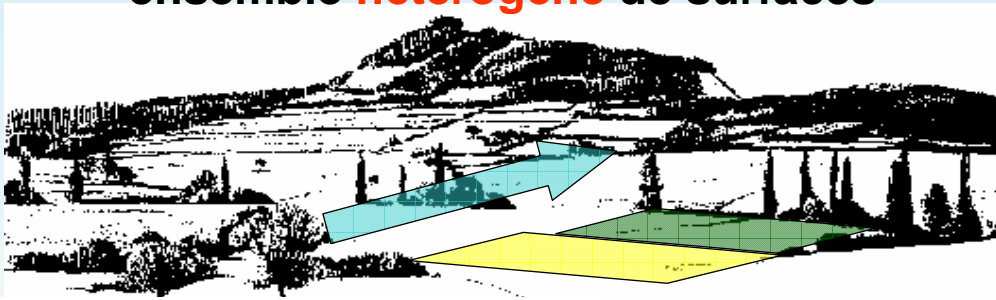


... **Couplages**  
*Modélisation multi-échelle,*  
*multi-physique*  
*Assimilation de données*

➔ Chaînes logicielles pour les applications environnementales

## CFD – exemples de simulations

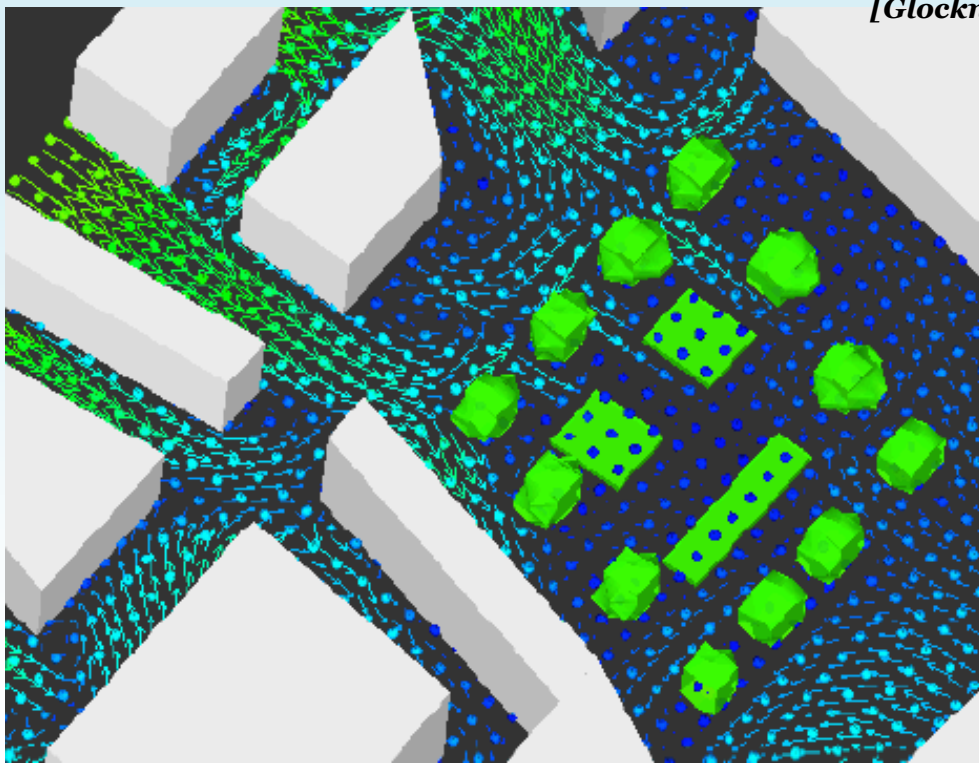
Ces processus s'exercent en terrain complexe ensemble **hétérogène** de surfaces



# Simulation 3D de la dispersion de polluants

Place Gambetta Bordeaux

[Glockner, 2003]



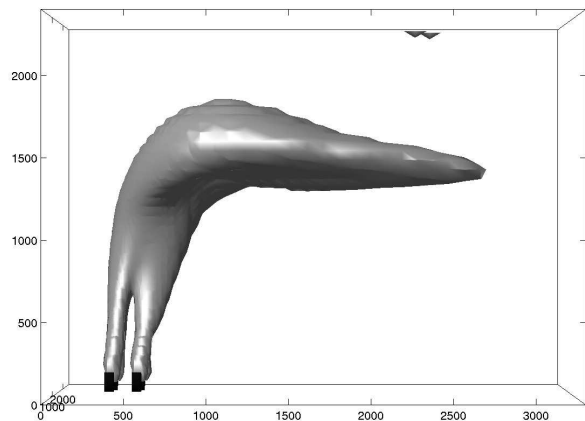
Code Thétis, laboratoire Transferts Écoulements Fluides Énergétique TREFLE

## Modélisation 3D de panaches humides

Centrale nucléaire du Bugey

[Bouzereau, 2004]

- Champs dynamique, thermique et turbulent issus du code (k-e), air humide
- Physique sophistiquée de la micro-physique nuageuse



**Le 12 mars 1980, photo 16h53 et croquis à 16h20. Simulation réalisée à 16h30**

(Code\_Saturne, Cerea Edf r&d)

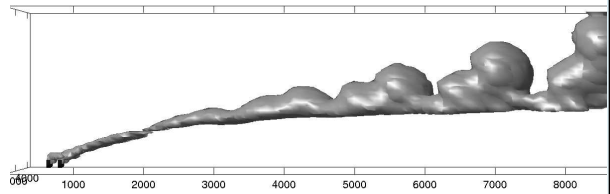
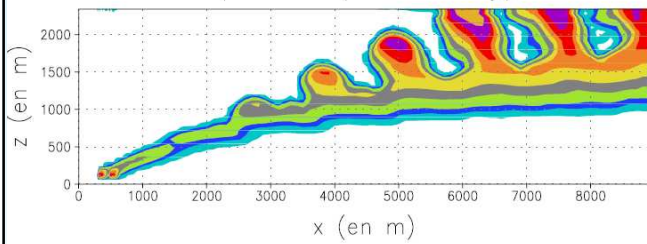
# Analyse de sensibilité

## Centrale nucléaire du Bugey

[Bouzereau, 2004]

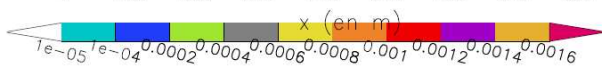
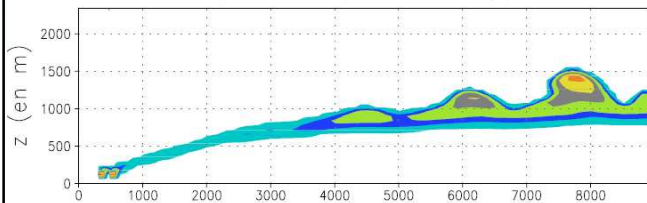
Bugey le 11 mars 1980 11h13  
Tests k-epsilon au rejet nu\_t=90 m2/s

ql 4509 (max. sur y)



Tests k-epsilon au rejet nu\_t=0.9 (bas)

ql 4510 (max. sur y)



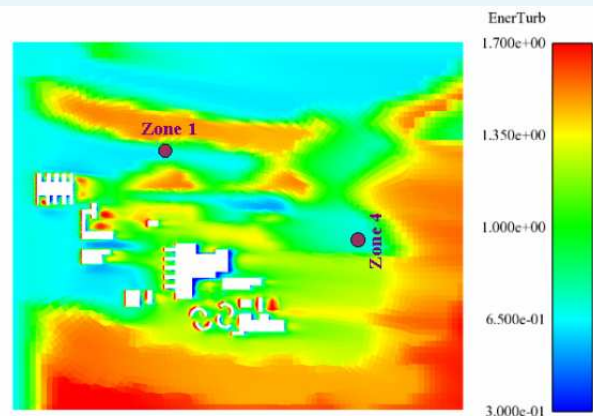
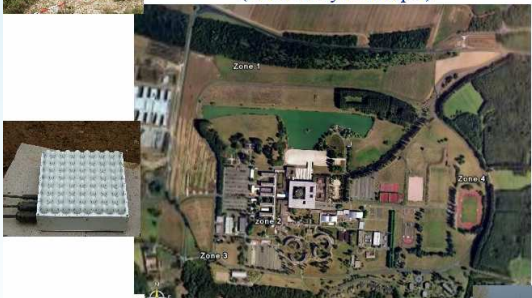
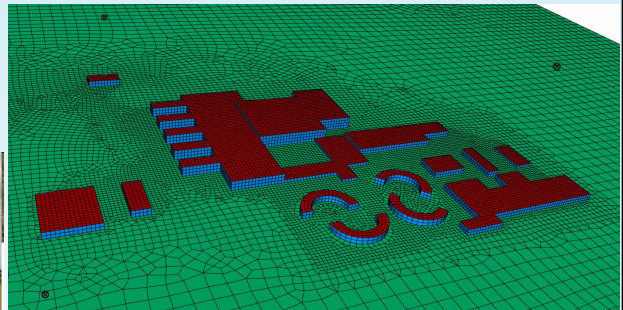
# Simulation 3D en terrain complexe

## Site du SIRT

**Site expérimental** : mesures de vent (radar, sodar, anémomètre sonique), température, humidité, rayonnement solaire



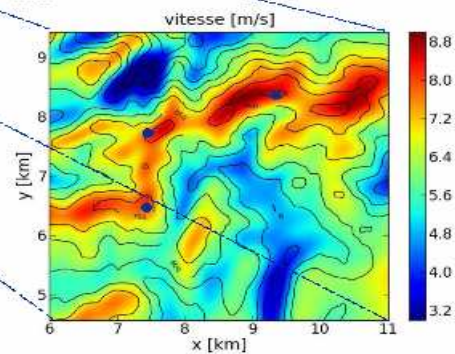
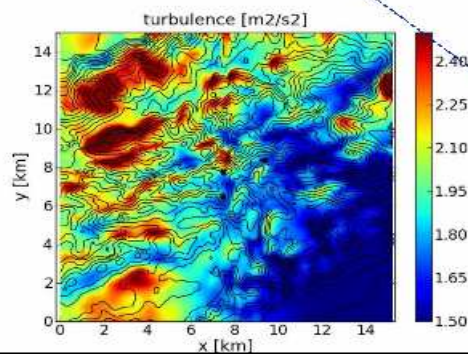
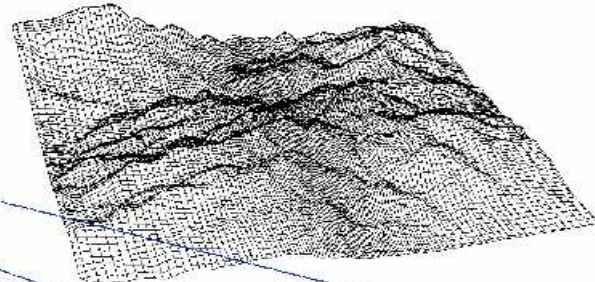
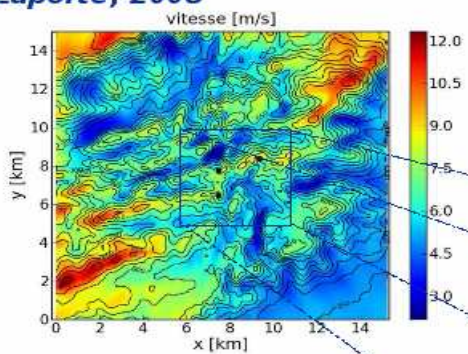
SIRTA (Palaiseau)  
(Ecole Polytechnique)



Turbulence générée par les bâtiments et par la canopée végétale (forêt), (Zaidi, 2009). Code\_Saturne CEREAdf r&d

# Estimation du potentiel éolien d'un site

## Wind potential estimate Laporte, 2008



Code\_Saturne CEREa Edf r&d

## Bibliographie indicative (1)

### • Livres

- G. DeMoor. Couche limite atmosphérique et turbulence – Les bases de la micrométéorologie dynamique. ENM
- G. DeMoor. Les théories de la turbulence dans la couche limite atmosphérique. Direction de la Météorologie, Boulogne (F.), 1983
- B. Sportisse. Pollution Atmosphérique, des processus à la modélisation. Springer-Verlag France, 2008
- G. Guyot. Climatologie de l'environnement. De la plante aux écosystèmes. Masson, Paris (F.), 1997
- S. Malardel. Fondamentaux de Météorologie. Cépaduès, 2009
- P. Chassaing. Turbulence en mécanique des fluides : analyse du phénomène en vue de sa modélisation à l'usage de l'ingénieur. Cépaduès-Édition, INP Toulouse (F.), 2000
- G. Coantic. La turbulence dans la couche limite atmosphérique : la turbulence en mécanique des fluides, Chap. IV. Bordas, Paris (F.), 1976
- S.P.S. Arya, Introduction to Micrometeorology. Academic Press, N Y
- R. Schiestel, Modélisation et simulation des écoulements turbulents, 1993

80



## Bibliographie indicative (2)

### • Livres

- Kaimal, J.C. and Finnigan, J.J, 1994: Atmospheric Boundary Layer Flows: their structure and measurement, Oxford University Press
- Oke, T.R., 1987 : Boundary Layer Climates, Routledge, New York

### • Thèses

- Développement d'un modèle numérique de dispersion atmosphérique de particules à l'échelle d'un paysage hétérogène, H. Foudhil 2002
- Représentation des nuages chauds dans le modèle météorologique Mercure : application aux panaches d'aéroréfrigérants et aux précipitations orographiques, E. Bouzereau 2004
- Dispersion et mélange turbulents de particules solides et de gouttelettes par une simulation des grandes échelles et une modélisation stochastique Lagrangienne. Application à la pollution atmosphériques, Ivana Vinkovic 2005
- Modélisation de la dispersion atmosphérique en milieu complexe et incertitudes associées, E. Demael 2007

## Bibliographie indicative (3)

- **Thèses**

- Application d'un code de CFD atmosphérique à l'estimation du productible éolien en terrain complexe, L. Laporte 2008

- **Simulations numériques et animations**

- Merci à C. Lebot du laboratoire TreFle pour les 4 simulations de l'expérience de Rayleigh-Bénard
- Merci à S. Glockner du laboratoire TreFle pour la simulation 3D de l'écoulement sur la place Gambetta

- **Supports de cours et illustrations**

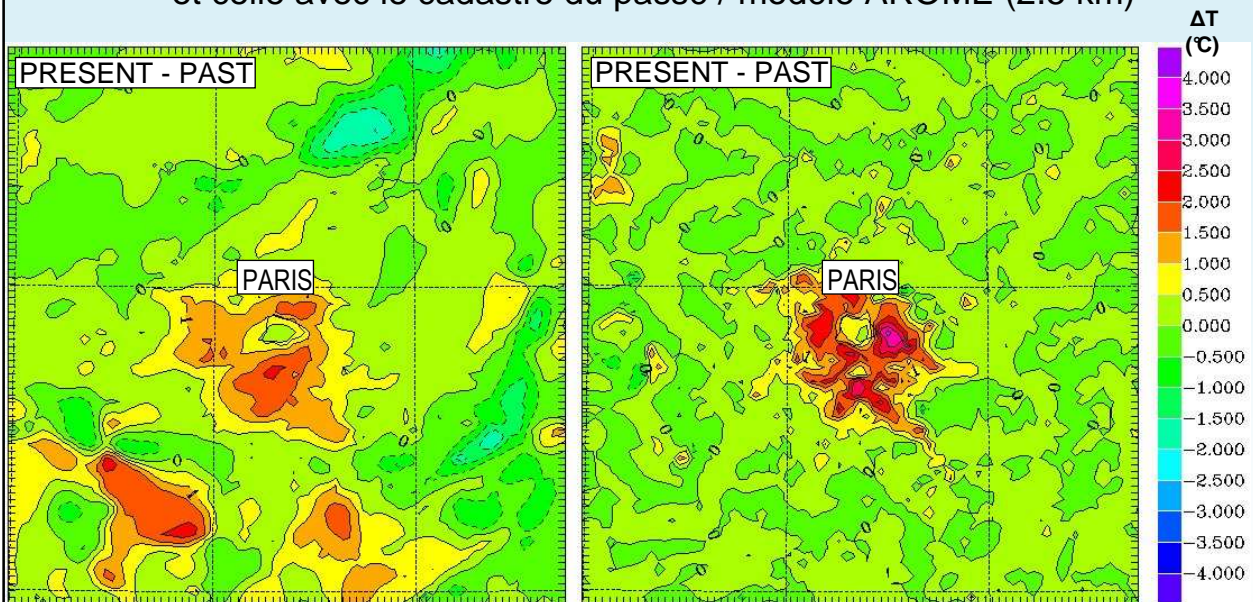
- Qualité de l'air et santé - Volet 3 - Notions de météorologie et dispersion de polluants, S. Lacours
- Merci à D. Vendum, M. Milliez, Y. Roustan, L. Musson-Genon, C. Seigneur et I. Bourdin-Korsakissok du laboratoire CEREAs
- De nombreux sites web



# Impact de l'urbanisation extra-muros

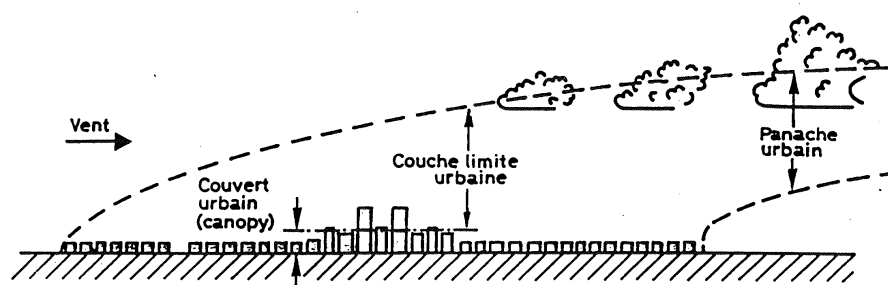
Épisode de canicule du 26 juillet 2006

Différence de température entre la simulation avec le cadastre actuel et celle avec le cadastre du passé / modèle AROME (2.5 km)



Impact sur la température de l'air nocturne    Impact sur la température de l'air diurne

## Dôme urbain et panache urbain



(a) Forme ouverte de la classe des panaches

Les bâtiments et les activités au sein d'une agglomération (transport, chauffage...) changent les caractéristiques thermiques de l'air. L'agglomération constitue un îlot de chaleur qui subsiste à la tombée du jour, tandis que la campagne environnante se refroidit. L'air chaud s'élève au-dessus de la ville, provoquant alors une dépression qui attire l'air plus frais des campagnes alentours. Les polluants émis à la périphérie de l'agglomération sont dispersés vers le centre-ville où s'installe une atmosphère fortement polluée

# Dispersion atmosphérique

$$\bar{C}(x_i, t) = Q(t)T(x_i, t)$$
$$F_d(x_i, t) = v_d(x_i, t) \bar{C}(x_i, t)$$

[Aylor, 1978]



## Structure du paysage

Écoulement moyen - advection

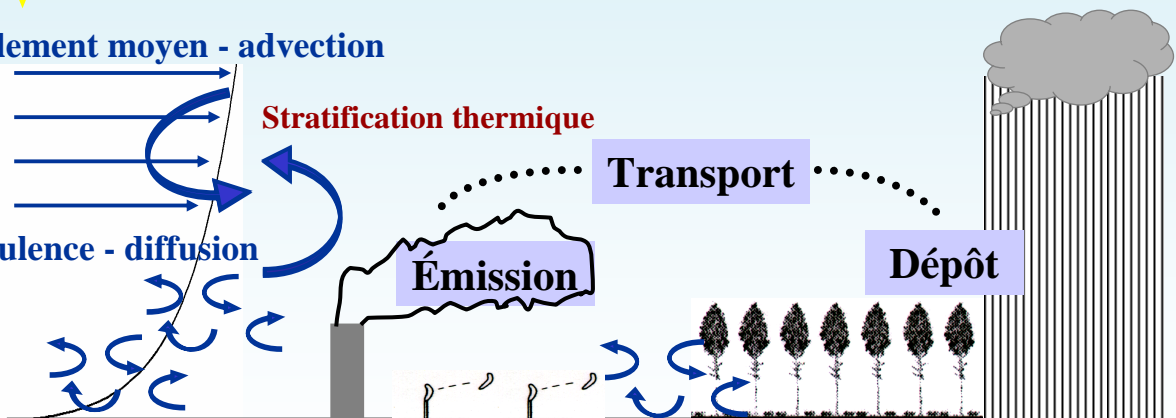
Turbulence - diffusion

Stratification thermique

Transport

Émission

Dépôt



**Difficulté d'appréhender tous ces processus qui sont interdépendants et très variables dans le temps et dans l'espace !**