

A photograph of a busy city street with a fountain in the background. A yellow rounded rectangle is overlaid on the image, containing the text 'Pollution et aérocontamination'.

# Pollution et aérocontamination

*Atmosphère et air intérieur*

*2014-2015*

# Plan du cours

- L'industrie, les moteurs, certains dispositifs de traitement des déchets émettent des polluants et des GES dans l'atmosphère, affectant la santé humaine et les écosystèmes via la dégradation de la QA. Les efforts doivent être coordonnés afin que la ressource « air » reste disponible et de bonne qualité pour tous ses utilisateurs. Constat, gestion, phénomènes occurrents, observation et discussion des conséquences.

## Isabelle Coll

**Pollution aigüe: Contexte et éléments constitutifs de la pollution de proximité**

### I – le contexte

- ✓ *Problématique - Etat des lieux*
- ✓ *Historique*
- ✓ *Plans d'actions / Gestion*

### II – l'approche quantitative

- ✓ *Description phénoménologique du milieu de dispersion*
- ✓ *Ateliers d'observation (concentrations, gradients, transferts, micro-env<sup>ts</sup>)*
- ✓ *Représentation (modélisation)*

## Christian Seigneur

**Diffusion multi-milieux, exposition et réglementation**

- ✓ *Dépôts et impacts sur les systèmes*
- ✓ *Effets sanitaires (identification, calcul des risques, normes)*

## Olivier Ramalho

**Pollution intérieure: sources, concentrations, normes**

- ✓ *Spécificités des environnements intérieurs et transferts int-ext.*
- ✓ *Sources et réactivité. Niveaux de concentration et exposition*
- ✓ *Techniques de mesure et actions de réduction*
- ✓ *Valeurs limites. Point réglementaire*

# Pollution aigüe: Le contexte et les éléments constitutifs de la pollution de proximité en Europe et dans le monde

## I – PROBLÉMATIQUE ET ÉTAT DES LIEUX

*La population mondiale se concentre de plus en plus dans des villes de grande dimension qui font face à beaucoup de défis - économique, social, de santé et environnemental.*

***VOIR DOCUMENT 1***

# Pollution aigüe: Le contexte et les éléments constitutifs de la pollution de proximité en Europe et dans le monde

## **II – APPROCHE QUANTITATIVE**

Le milieu de dispersion et ses conséquences

Ateliers (gradients, transferts, environnements)

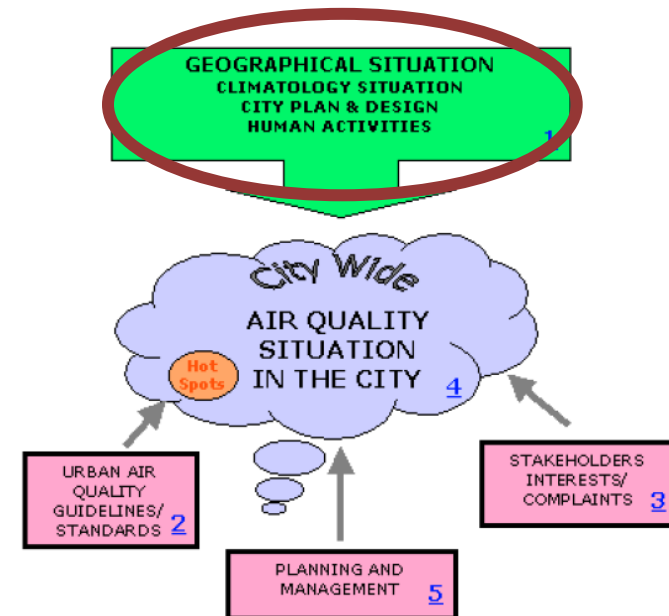
Représentation de la pollution

# Le milieu de dispersion et ses conséquences

*Dès qu'un polluant est émis dans l'atmosphère, celle-ci va avoir une influence multiple: elle est le siège de nombreuses réactions chimiques qui s'opèrent immédiatement, elle emporte au gré des vents les polluants les plus stables vers d'autres lieux; enfin elle peut au contraire bloquer la dispersion et la dilution des polluants émis et accélérer la concentration de la pollution dans les basses couches de l'atmosphère.*

*La ville complexifie fortement la répartition spatiale de la pollution qu'elle génère par des émissions fixes, mobiles et surfaciques : l'hétérogénéité des sources initie celle des émissions. La turbulence et le bâti imposent leur dispersion dans l'air urbain. Ensemble, ils façonnent des gradients de concentration locaux. Les possibilités de diffusion sont différentes selon les modèles de rues et la présence d'espaces verts.*

- **La turbulence atmosphérique**
- **Le rôle des éléments du milieu atmosphérique**
  - Les villes : géographie et exposition aux pollutions
  - Les nuages
  - Bâti et climat urbain
  - Conception et aménagement urbains



# La turbulence atmosphérique

## • Le concept de turbulence

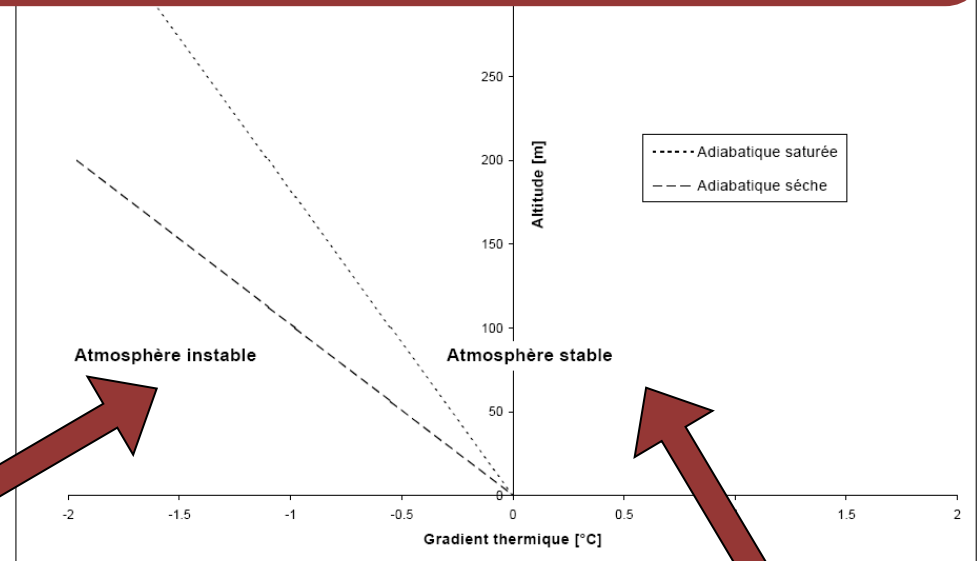
La turbulence atmosphérique à petite échelle a deux origines distinctes :

→ la première d'origine « **thermique** », due à la distribution de température dans l'atmosphère ;

## LA NATURE DU SOL, SON ABSORPTION DU RAYONNEMENT SOLAIRE... DEFINISSENT LA TURBULENCE THERMIQUE

Un volume d'air élémentaire déplacé vers le haut se détend du fait de la baisse de pression et se refroidit selon une adiabatique (sèche ou humide).

L'évolution de la température de l'atmosphère avec l'altitude peut s'écarter de ces conditions.



Si le gradient de température de l'atmosphère est inférieur au gradient thermique de l'adiabatique alors l'atmosphère favorise les déplacements de gaz et peut être qualifiée d'instable

Si le gradient de température de l'atmosphère est supérieur au gradient thermique de l'adiabatique alors l'atmosphère favorise les déplacements de gaz et peut être qualifiée de stable

# La turbulence atmosphérique

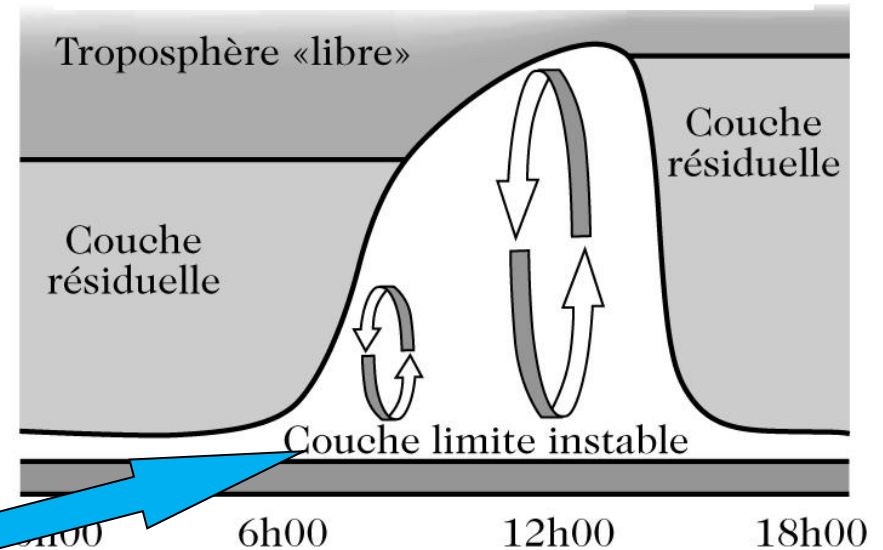
## • Le concept de turbulence

La turbulence atmosphérique à petite échelle a deux origines distinctes :

- la première d'origine « **thermique** », due à la distribution de température dans l'atmosphère ;
- la seconde d'origine « **mécanique** » générée par le cisaillement du vent en contact avec le sol.

Près de la surface terrestre les molécules du fluide en contact direct avec la surface sont contraintes au repos tandis qu'à une certaine distance, le fluide se déplace librement : c'est l'atmosphère libre. La région de transition est appelée la couche limite. Le cisaillement de vitesse à la surface peut y générer le développement de tourbillons turbulents

Temps de réponse court # 1h  
Epaisseur entre 100m et quelques km



Importants échanges de matière, de quantité de mouvement, et d'énergie.

Une partie de ces échanges est d'origine moléculaire (viscosité, conduction) mais la plupart est le résultat de transports turbulents de petite échelle impliquant des « paquets » de molécules. Ils sont aussi bcp plus efficaces.

Les mouvements turbulents sont irréguliers, quasiment aléatoires, impliquant un spectre continu d'échelles temps-espace. Les tourbillons turbulents sont d'une importance cruciale pour le maintien de l'équilibre énergétique de la surface et de la quantité de mouvement.

# La turbulence atmosphérique

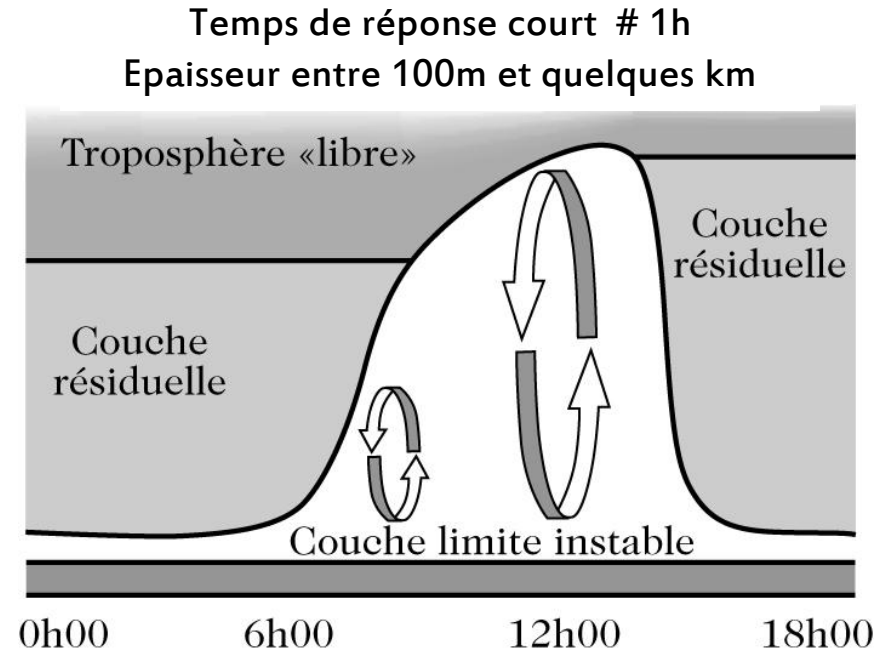
## • Le concept de turbulence

La turbulence atmosphérique à petite échelle a deux origines distinctes :

- la première d'origine « **thermique** », due à la distribution de température dans l'atmosphère ;
- la seconde d'origine « **mécanique** » générée par le cisaillement du vent en contact avec le sol.

**L'instabilité de flottabilité (thermique)** peut piloter la turbulence (développement de fluctuations, remous turbulents).

Si la couche est stable thermiquement, l'instabilité est maintenue uniquement par production mécanique de turbulence liée à **l'instabilité dynamique** due au cisaillement vertical de vent.





# La turbulence atmosphérique

Vitesse du vent à 10 m	JOUR			NUIT	
	Rayonnement solaire incident			Nébulosité	
[m/s]	Fort	Modéré	Faible	entre 4/8 et 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

Classification de Pasquill (1974) : Une classification de la stabilité atmosphérique peut être effectuée au travers des classes de Pasquill qui varient de A à F et peuvent être associées à des conditions météorologiques données.

Méthode plus complexe (1954) : La longueur de Monin-Obukhov permet aussi de qualifier l'importance relative de la turbulence mécanique et de la turbulence convective, à une altitude donnée. A des altitudes très petites devant L, la turbulence mécanique prédomine. A des altitudes plus grandes que L c'est l'inverse.

# La turbulence atmosphérique

L [m]	Stabilité
$L \leq -10^5$	Neutre
$-10^5 \leq L \leq -100$	Instable
$-100 < L < 0$	Très instable
$0 < L < 10$	Très stable
$10 \leq L \leq 10^5$	Stable
$10^5 \leq L$	Neutre

Si  $h$  est la hauteur de la couche limite, alors on peut définir des critères de stabilité de l'atmosphère

$h/L < 0$  Atm instable

$h/L \approx 0$  Atm neutre

$h/L > 0$  Atm stable

Valeurs typiques de  $L$   
 Plus  $L$  est négatif, plus le vent diminue rapidement avec l'altitude dans la couche limite et inversement

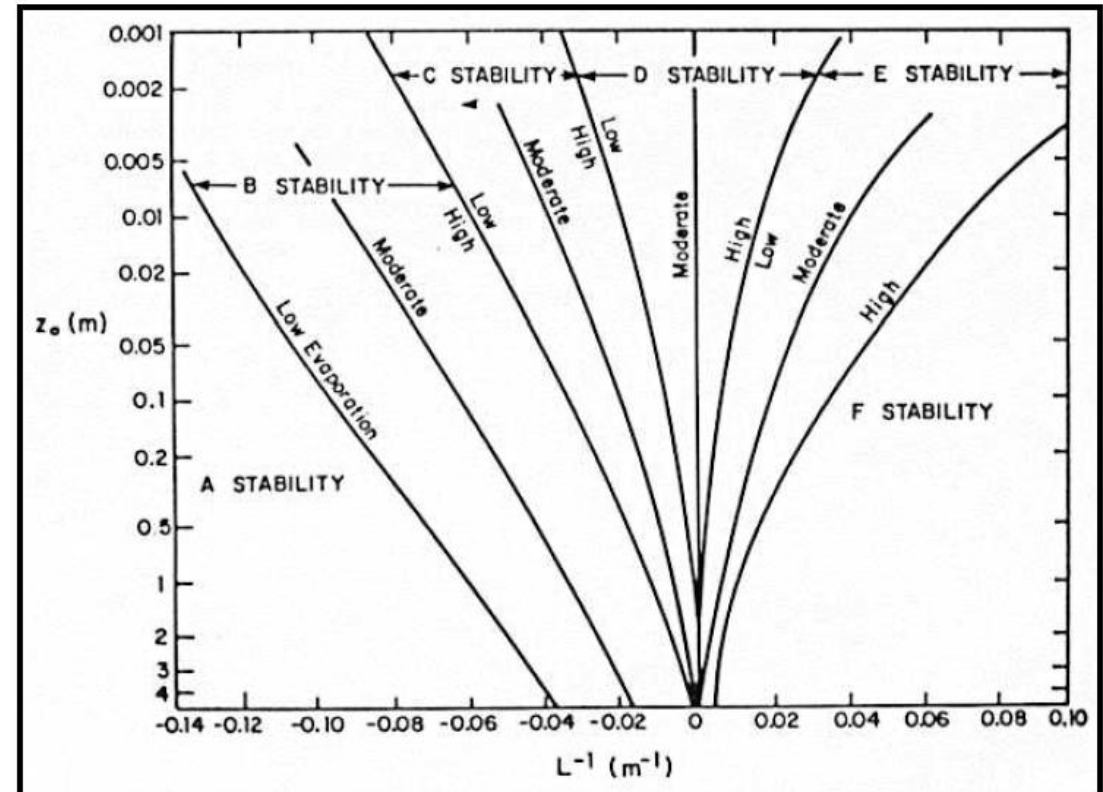


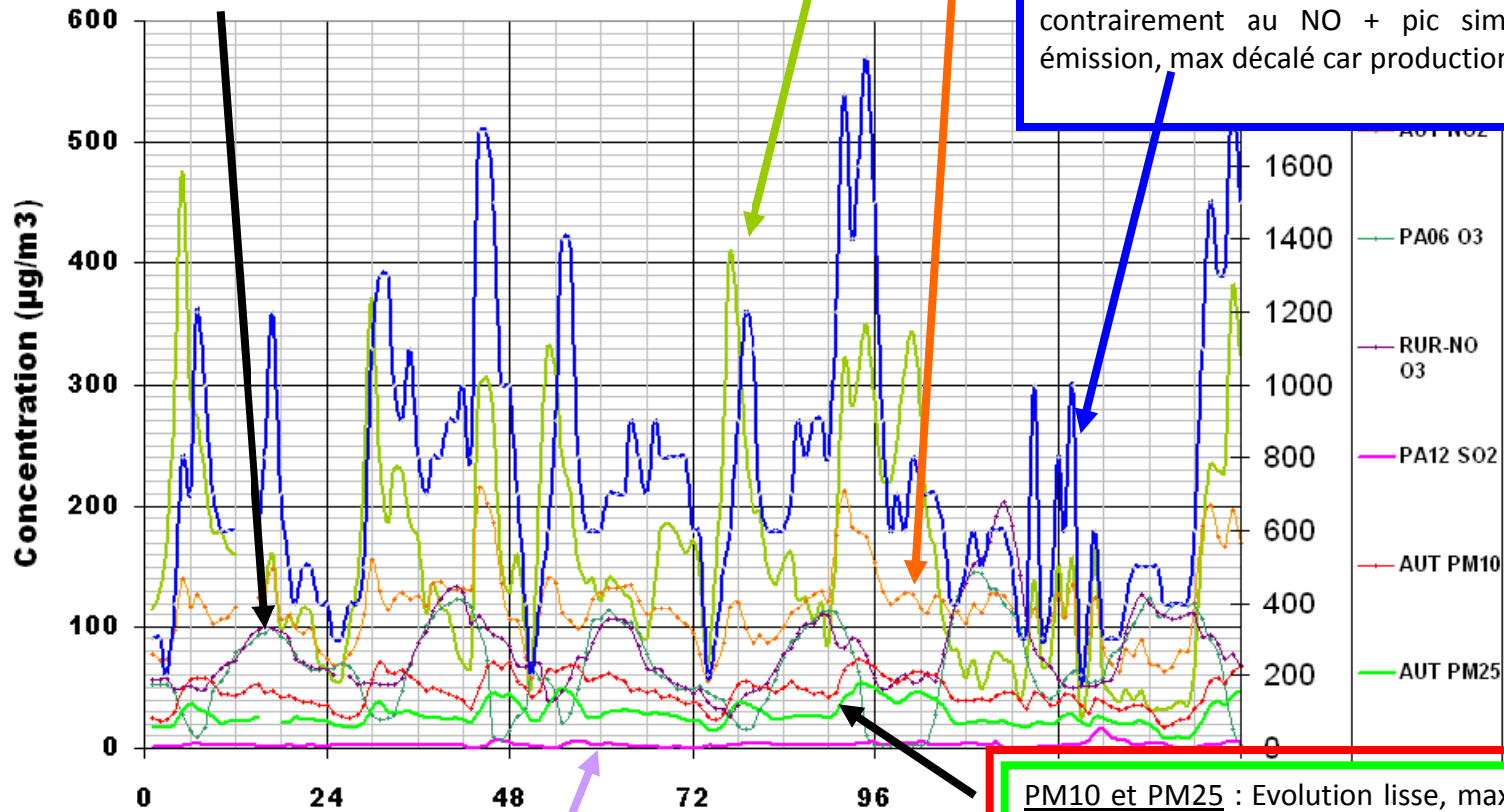
Figure 7 : Relation entre la longueur de Monin-Obukhov  $L$  et la rugosité  $z_0$  pour différentes classes de stabilité de Pasquill.

# Exercice : un épisode à légènder...

O<sub>3</sub> : Evolution lisse, maximum en milieu de journée, bdf autour de 30ppbv (60µg/m<sup>3</sup>) plus élevé en rural, pic + fort en rural, courbe similaire entre sites urbain de fond et rural

NO et NO<sub>2</sub> : pic matinal et en fin de journée, évolutions similaires mais courbe plus accidentée pour NO avec maxima plus forts et bdf plus faible en journée

CO : Evolution semblable à NO car sources intenses mais concentrations très élevées (quelques centaines de ppbv) et bdf qui reste élevé en journée contrairement au NO + pic simultané car même émission, max décalé car production secondaire!



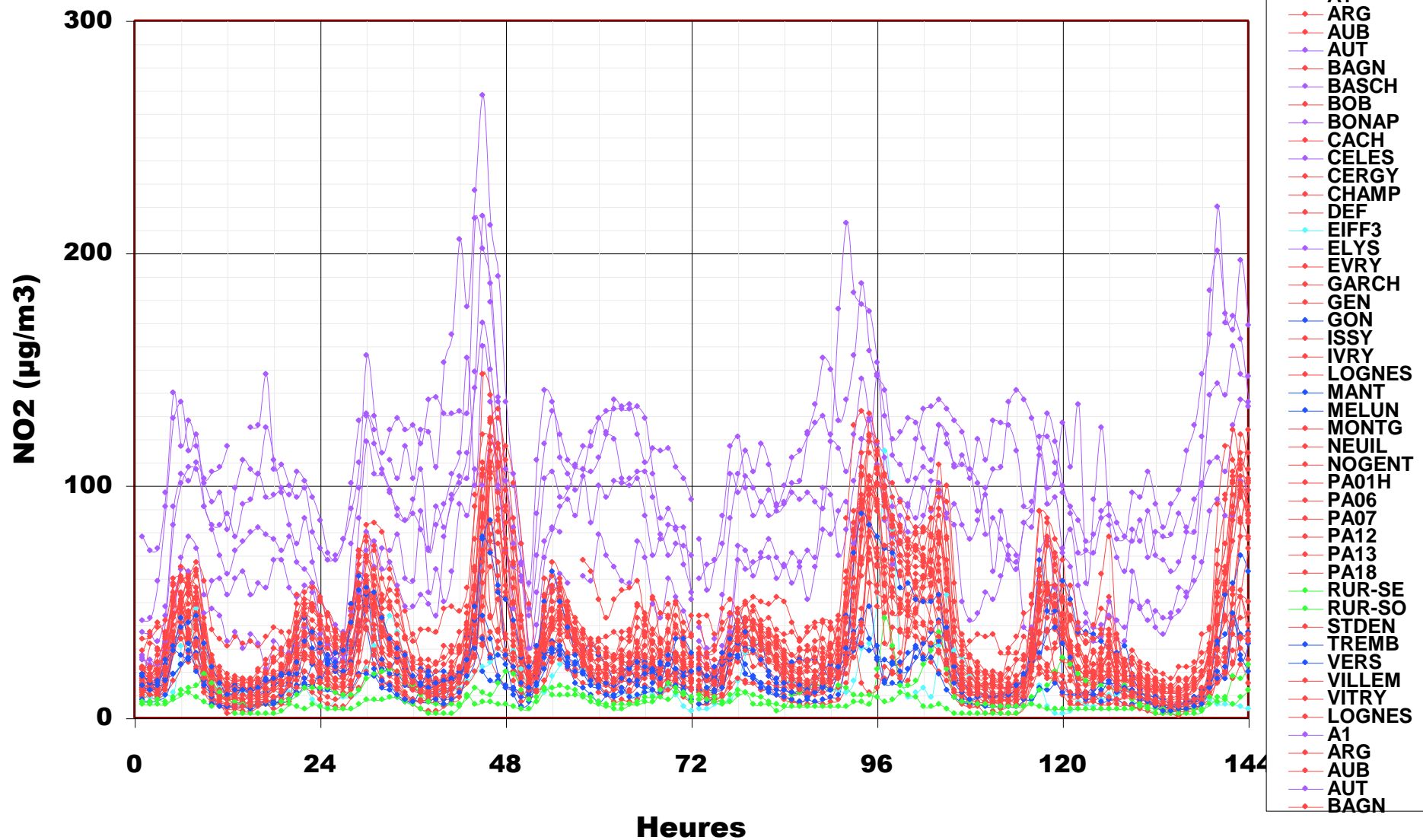
SO<sub>2</sub> : Bruit de fond nul, peu de variations, pointes rares.

PM<sub>10</sub> et PM<sub>25</sub> : Evolution lisse, maxima matin et soir (primaire), bdf plus faible pour les PM<sub>25</sub>



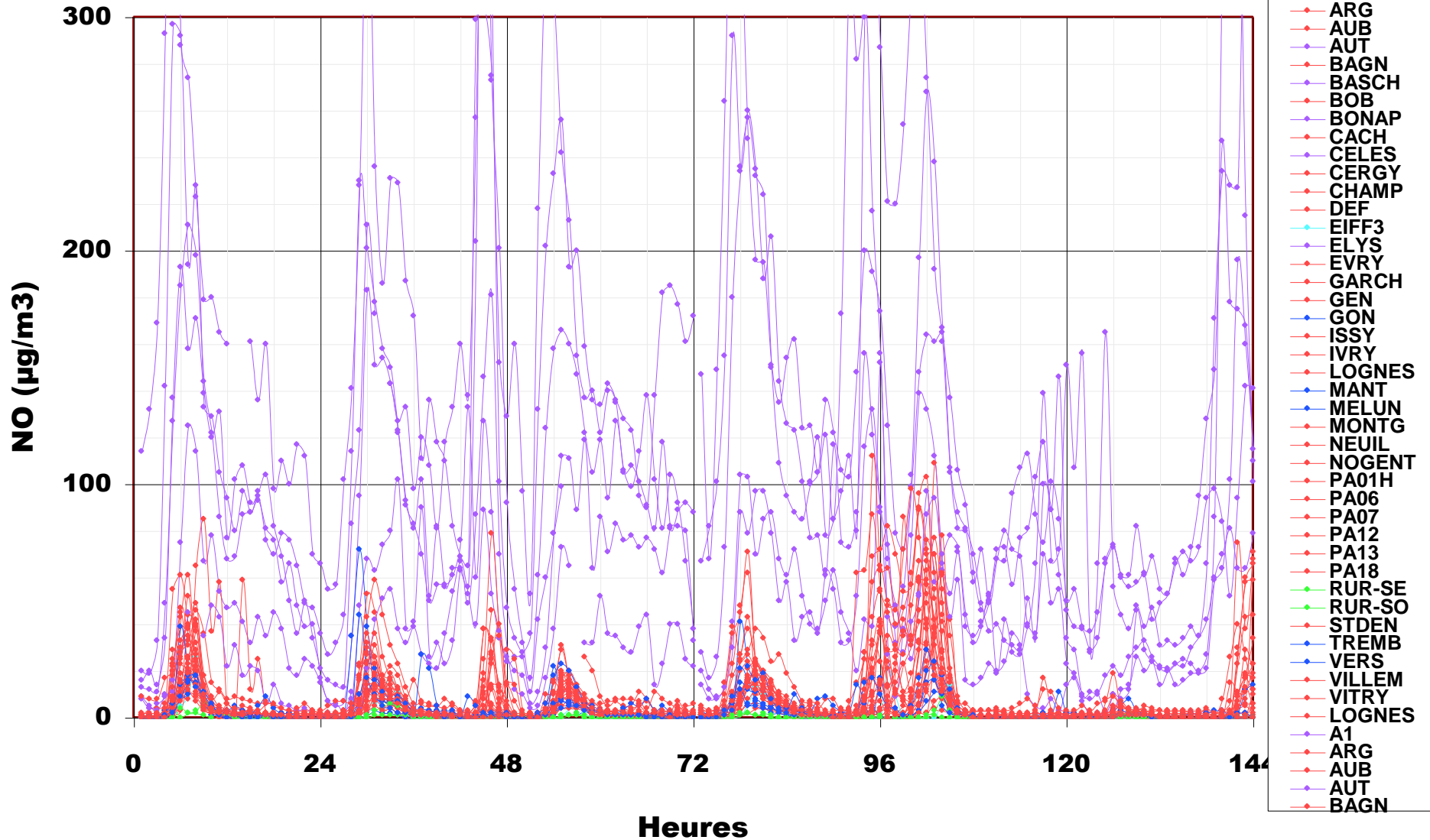
# Illustration : Niveaux de polluants mesurés à AIRPARIF l'été 2007

## NO2



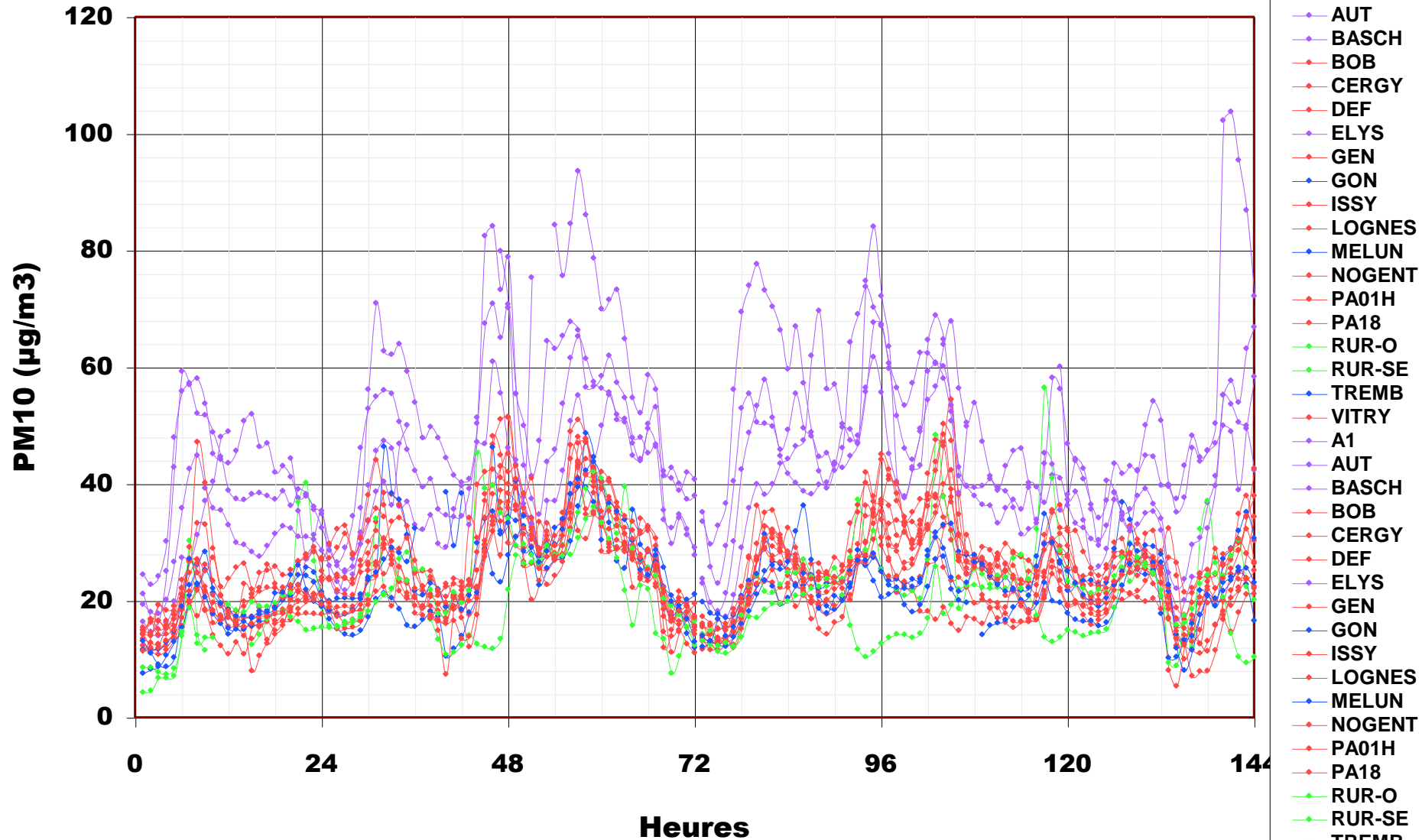
# Illustration : Niveaux de polluants mesurés à AIRPARIF l'été 2007

NO zoom



# Illustration : Niveaux de polluants mesurés à AIRPARIF l'été 2007

PM<sub>10</sub>



- **Influence des nuages**

Les propriétés de rayonnement du sol peuvent varier dans de larges limites suivant sa nature et sa couverture végétale. La capacité qu'a le sol de perdre ou d'emmagasiner de la chaleur par rayonnement peut ensuite agir de façon très nette sur la répartition verticale des températures.

Mais la couverture nuageuse peut également contribuer à la stabilité des basses couches de l'atmosphère en interceptant le rayonnement solaire direct et diffus et en émettant son rayonnement propre de grandes longueurs d'ondes.



- **Influence des nuages**

- **Les nuages d'altitude**

- Ils peuvent **limiter le rayonnement visible** dans la journée : sol moins échauffé, flux de chaleur sensible et turbulence convective amoindris. **Effet défavorable** à la dispersion diurne.
- Ils **absorbent également dans l'IR** et limitent le refroidissement nocturne. La **turbulence nocturne** est donc plus facile à créer et les émissions matinales sont diluées dans un volume plus grand.



Nuage élevé (cirrus) :

- **Influence des nuages**
- **Les nuages d'altitude**
- **Les nuages de couche limite**
  - Les cumulus se **forment par condensation** de l'humidité emportée par les ascendances thermiques, et l'échauffement induit accroît le phénomène d'ascendance.
  - Situés au sommet de la couche limite, ils peuvent se développer plus haut et les polluants peuvent en partie s'en échapper. Ils **aident à la convection**.



Quantitativement l'impact est plus difficile à prévoir car les propriétés optiques et radiatives dépendent de nombreux facteurs (distribution des particules de glace, leur forme, leur orientation...)

- **Influence de la localisation : conditions topoclimatiques et activités**

Chaque implantation a son emplacement géographique unique. Ils peuvent être situés dans des zones **montagneuses**, dans des **plaines** plates, le long de rivières, dans des déserts, ou sur la **côte**, et présentent une qualité de l'air différente. Les collines font dévier le flux d'air contaminé, verticalement ou horizontalement. La mesure de cette déviation dépend de la stabilité atmosphérique verticale. L'air transportant des polluants peut glisser vers le haut ou le bas de la **vallée**. Le mouvement aérien peut être affecté par les profondeurs des vallées alors que les zones côtières n'ont que peu ou pas de barrière géographique limitant la dispersion des polluants.

Des polluants aériens se comportent différemment dans un **climat** tropical, sec ou frais. La **dispersion** des polluants aériens est influencée par le microclimat et les facteurs météorologiques. Les problèmes de pollution atmosphérique peuvent atteindre des niveaux alarmants quand des conditions climatiques empêchent leur dispersion efficace des polluants, ce qui arrive dans des pays avec un climat froid et tempéré.

- **Influence de la localisation : conditions topoclimatiques**

**La dispersion des polluants émis dépend largement du climat dans lequel la ville se situe.**

Les villes méditerranéennes sont très exposées à la pollution photochimique de par leur fort degré d'ensoleillement. La position côtière est même un facteur aggravant en été en raison des recirculations associées aux brises de mer.

C'est dans les villes du Nord que l'on retrouve le plus de pollution hivernale en raison des conditions plus rudes qui accroissent les émissions liées au chauffage.

Mais c'est tout de même **moins l'opposition Nord-Sud** qui joue **que les différences entre climat océanique venté et climat continental abrité**. Les villes bénéficiant d'un climat plus continental sont plus vulnérables aux problèmes de pollution atmosphérique que les villes littorales, le principal élément déterminant étant la fréquence des situations anticycloniques.

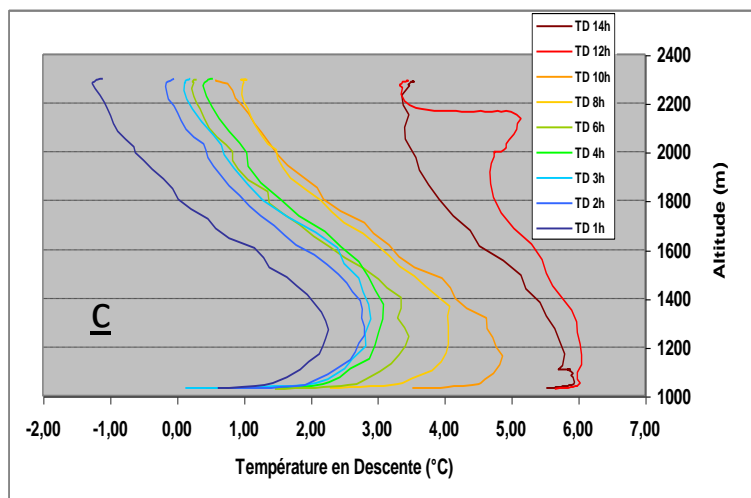




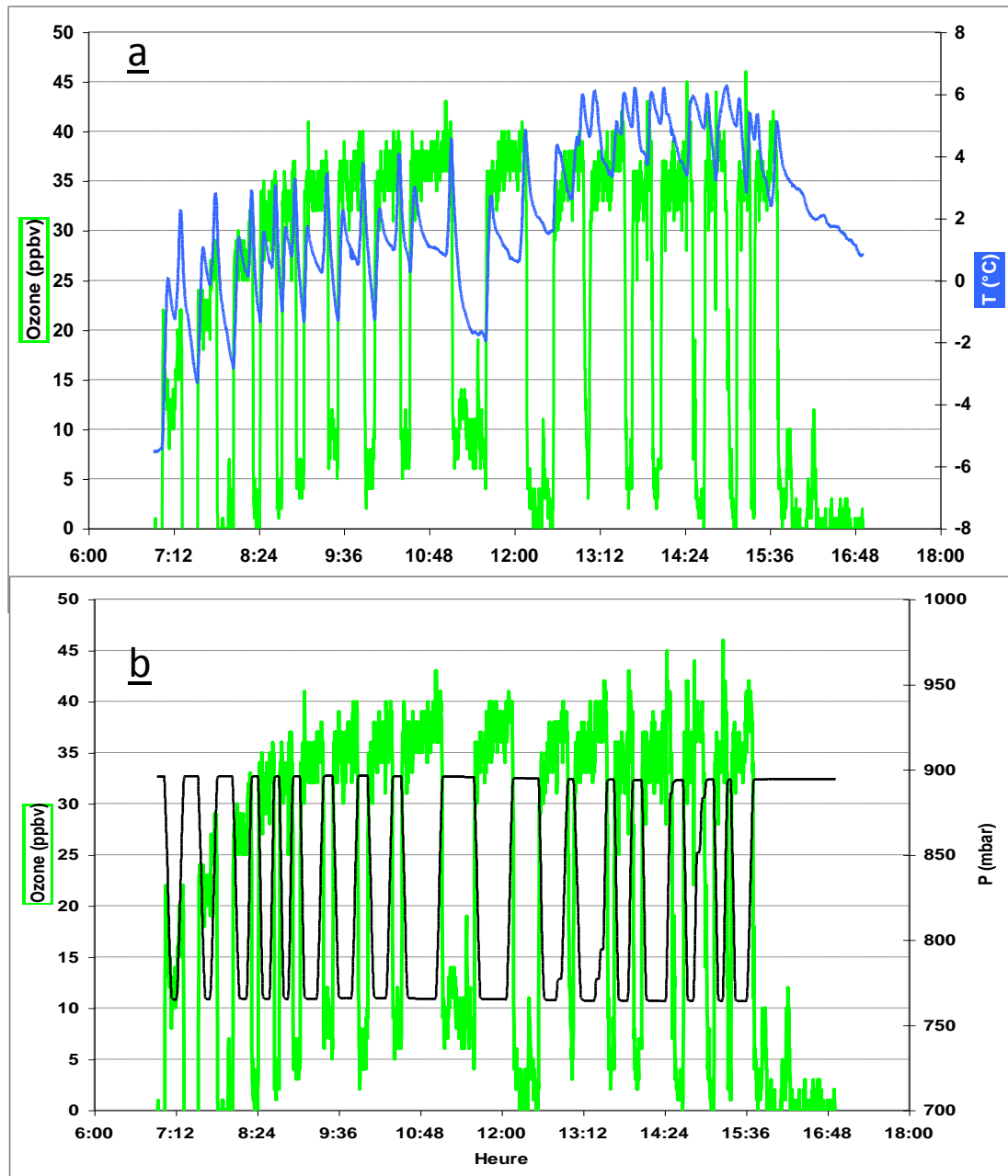
# Exercice : Une journée de mesures dans les vallées Alpines

## Mesure téléphérique : Hiver

Les figures a à d présentent des mesures d'ozone, de température et de pression réalisées dans le cadre de la campagne POVA (POLLution dans les Vallées Alpines) à bord du téléphérique reliant la vallée de Chamonix (1000 m) au Pic du Midi, lors de ses aller-retour quotidiens.

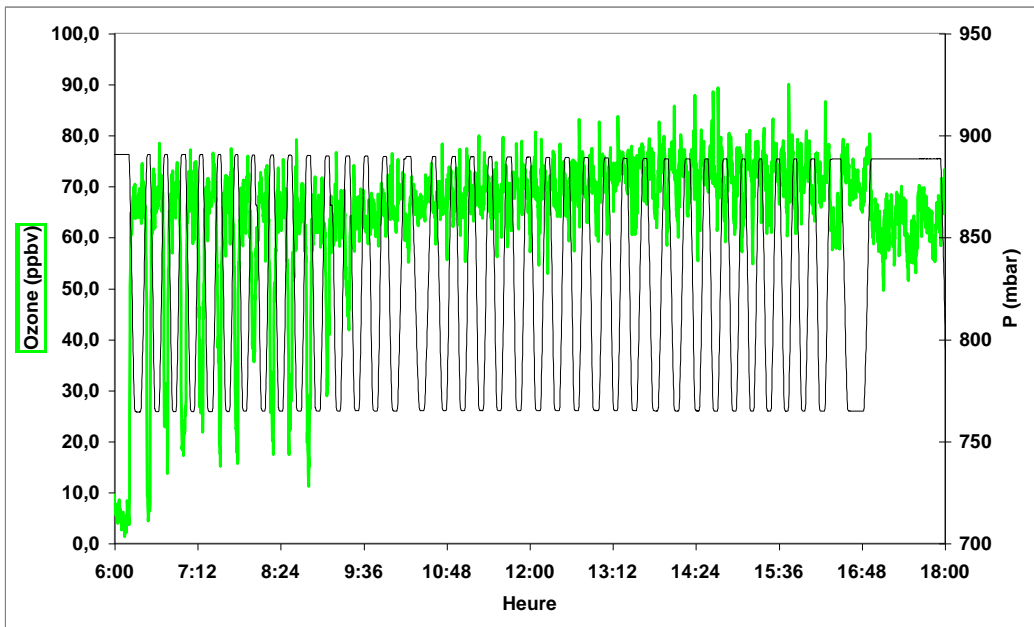
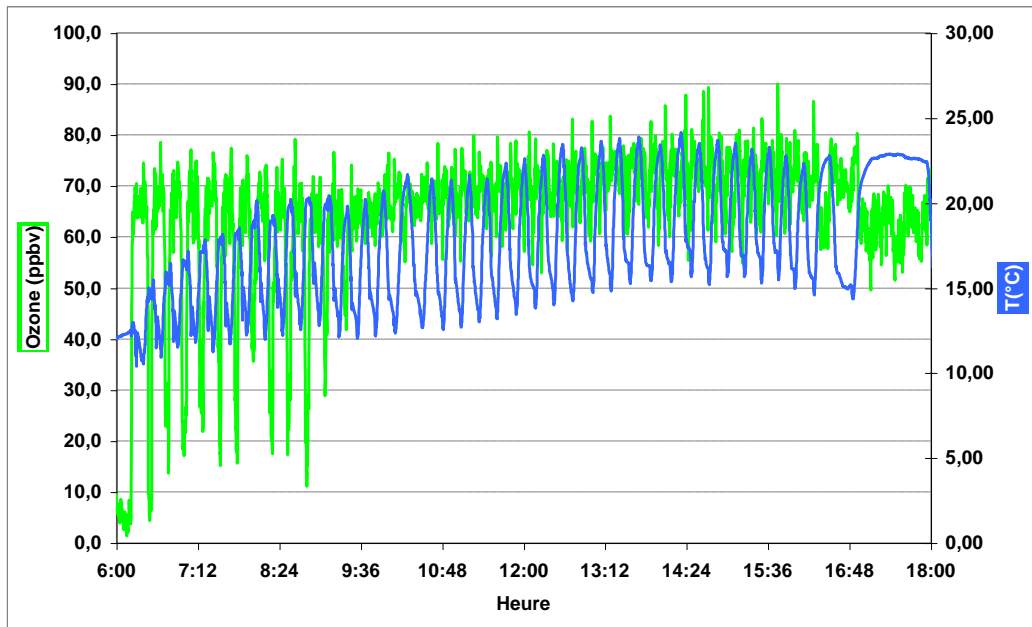


Des mesures ont été réalisées en été ainsi qu'en hiver. En analysant les mesures réalisées durant la campagne d'hiver (figures a à c), vous commenterez brièvement l'évolution des concentrations d'ozone (courbes vertes, figure a & b) et décrierez brièvement les phénomènes dynamiques et/ou chimiques sous-jacents. Vous pourrez vous aider pour cela des mesures de température d'air (courbe bleue, figure a) et de pression (courbe noire, figure b) effectuées en continu à bord du téléphérique, des profils verticaux de température correspondants (figure c), ainsi que de quelques résultats des mesures effectuées durant la campagne d'été présentés en figure d.



# Exercice : Une journée de mesures dans les vallées Alpines

## Mesure téléphérique : Eté



Id

### • Influence de l'urbanisation : ICU

L'urbanisation introduit tout d'abord une perturbation thermique importante dans le bilan énergétique en surface sous la forme d'un flux énergétique supplémentaire anthropique  $Q_A$  = forçage externe qui dépend essentiellement de la densité d'activité générant de la chaleur (chauffage, trafic, industrie).

Ce flux est estimé à 20-70 W.m<sup>-2</sup> pour les agglomérations urbaines contre une moyenne de 0.025 sur la Terre.



$$-Q^* + Q_A = Q_H + Q_E - Q_G$$



$-Q^*$  flux radiatif net

$Q_H$  flux de chaleur sensible

$Q_E$  flux de chaleur latente

$Q_G$  stockage énergétique dans le sol

$Q_A$  est envoyé vers l'atmosphère sous forme de chaleur et favorise la turbulence



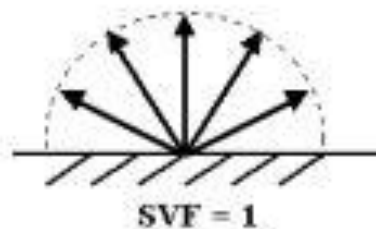
### • Influence de l'urbanisation : ICU

Par ailleurs la ville possède une **canopée accidentée**. Elle présente une rugosité plus importante à l'écoulement et lui fait obstacle, limitant la dissipation de la chaleur par écoulement.

En outre, la multiplicité des bâtiments (forme, matériaux) entraîne un **piégeage** de l'énergie incidente. Ceci induit une augmentation du stockage d'énergie dans les bâtiments et une accentuation de la **restitution de chaleur nocturne**.

Enfin, les villes et leur géométrie en 3D ont tendance à **capturer le rayonnement IR émis par la surface**. L'énergie est conservée dans la ville pendant la journée et lentement **réémise pendant la nuit**. Ainsi, le refroidissement nocturne est plus lent dans les villes que dans les zones rurales.

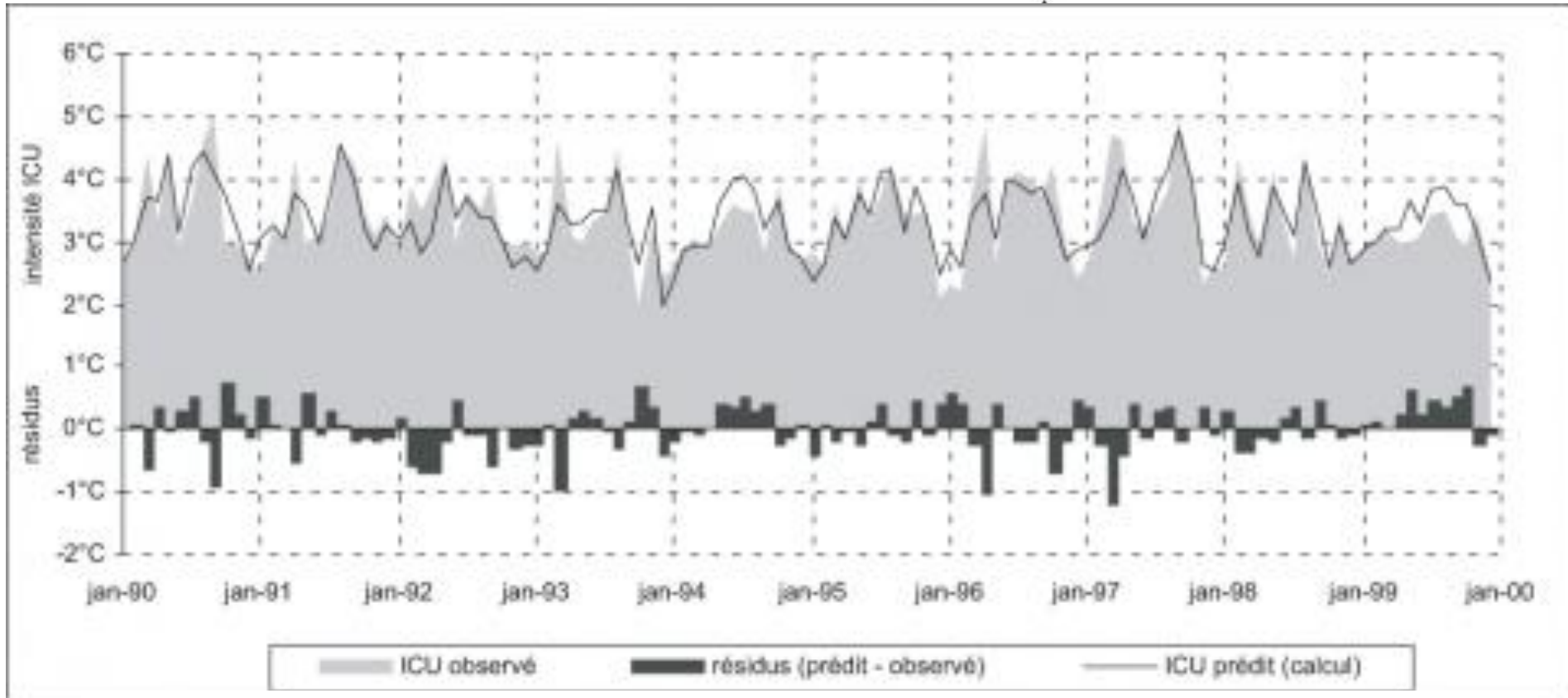
Aux échelles locales l'usage de climatisations peut fortement exacerber le phénomène.



- Influence de l'urbanisation : ICU

L'îlot de chaleur urbain:

centre de Paris



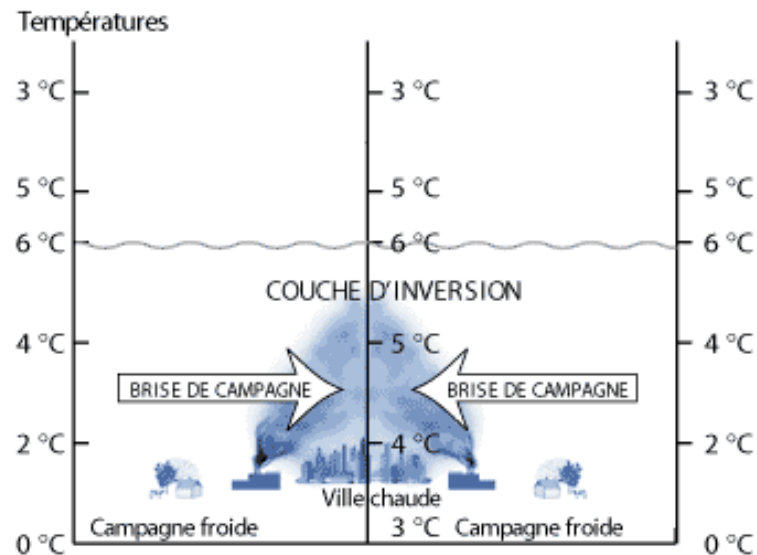
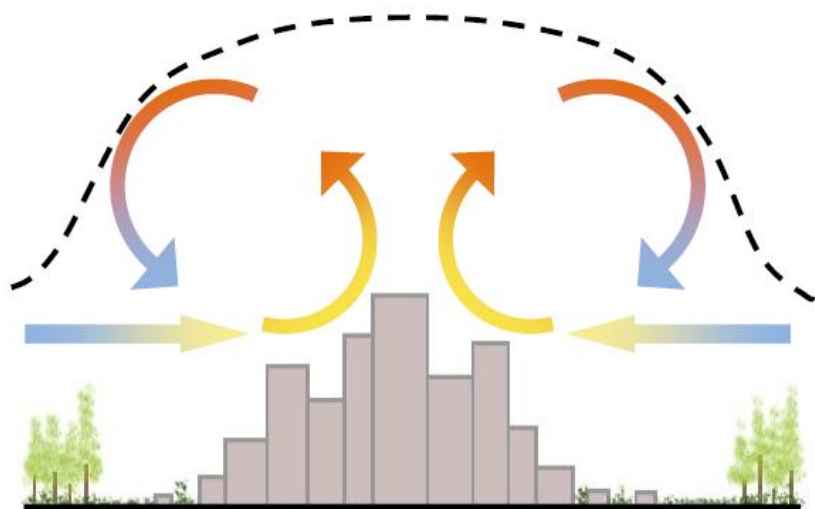
Distribution fréquentielle décadaire de l'intensité de l'ICU nocturne 90-99 (Tn de Paris-St-Jacques et Melun)

### • Influence de l'urbanisation : ICU

Ce phénomène est associé à des circulations inhabituelles de polluants :

Une dynamique de **cellule de brise** se crée. Les brises de campagne convergent vers le centre-ville.

1. Des transferts sévères de polluants depuis les zones industrielles alentour ont été identifiés par le passé
2. Le jour, l'augmentation des flux de chaleur accroît la turbulence
3. L'eau et la végétation → moyens de rafraîchissement, par évaporation et évapotranspiration. Relativement inefficace, couverture insuffisante.



### • Influence de l'urbanisation : ICU

#### La météorologie

Les hautes températures liées à l'ICU

- changent les conditions microphysiques de formation des nuages: diminution des rosées et brouillards urbains → empêche le lessivage des aérosols, poussières et pollens en suspension
- favorisent la haute concentration de noyaux de condensation pour la formation des nuages (CCN) dans les panaches urbains → gouttes très petites qui ralentissent la coagulation et les pluies
- favorisent les épisodes orageux (renforcement convection thermique)
- renforcent les effets sanitaires (indoor/outdoor) et socio-économiques des canicules, et incitent à une consommation énergétique plus grande (climatisation) → coût climatique

#### La composition atmosphérique

- localement, les températures favorisent les processus photochimiques. On estime +6% d'ozone pour 10°C d'îlot de chaleur.
- plus haut, la forte convection favorise le transport rapide de polluants jusqu'à la troposphère moyenne et haute (vu par satellite) surtout en zone tropicale → conséquences sur le climat



- **Urbanisme et conception urbaine**

**Quelques facteurs ayant un impact sur l'émission, le transport et la dispersion des polluants:**

L'étalement urbain (accroît la demande de commutation et de génération du trafic)

Les centres urbains denses (provoquent des effets de rue canyon)

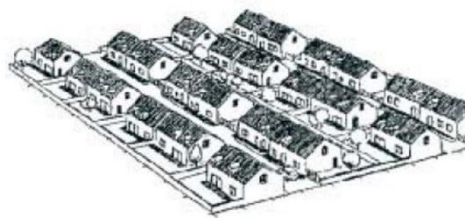
Les quartiers populaires d'habitation et de commerce (souvent congestionnés)

Les zones industrielles (hot-spots d'émissions)

Autoroutes et infrastructures de transport urbaines, avec VP et transport de fret

Espaces verts urbains (interférence thermique et absorption des espèces G/P)

Activités anthropiques: mobilité, développement industriel, production et utilisation de l'énergie...



- **Influence du bâti**

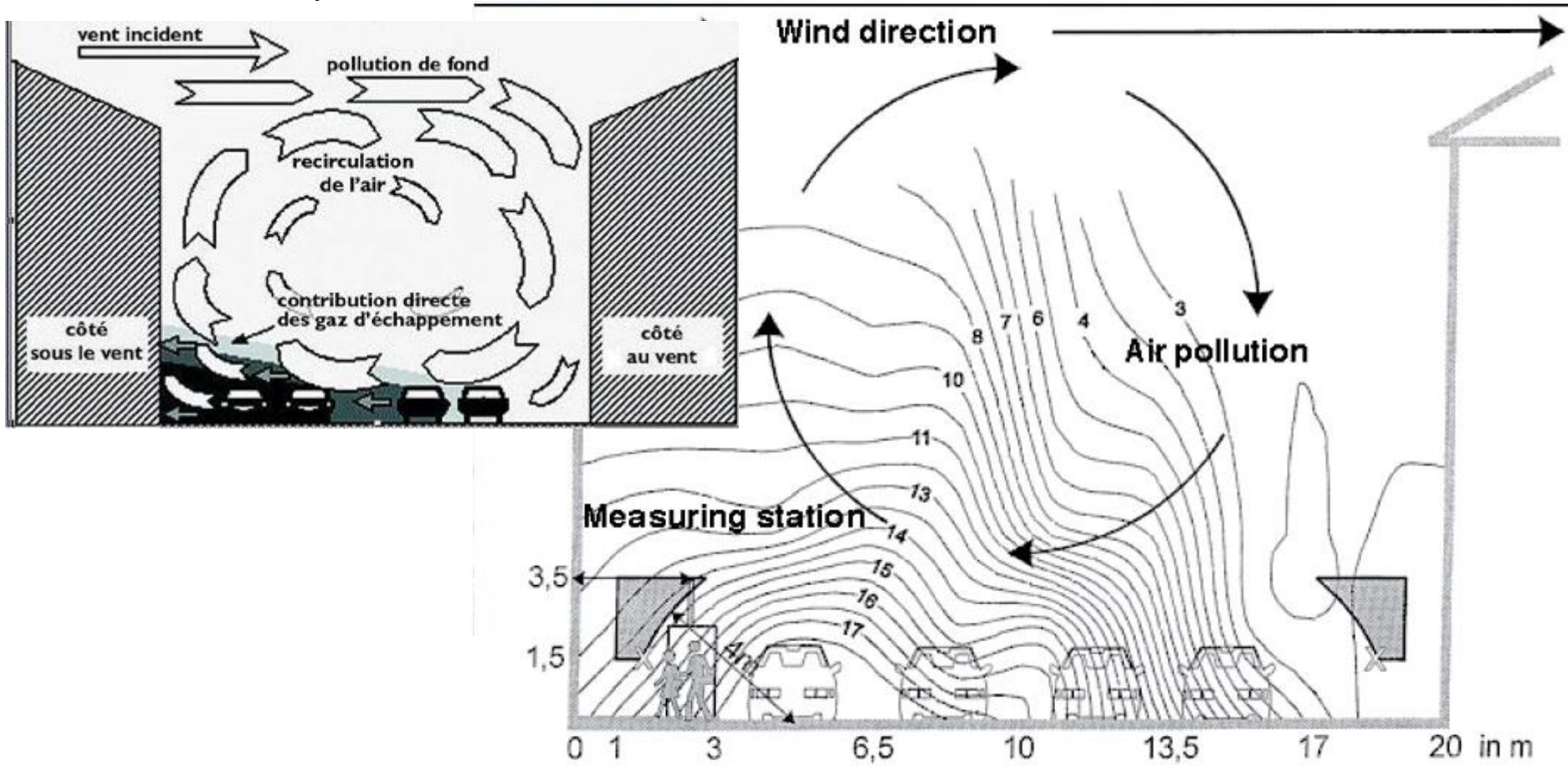
Le caractère compact des centres-villes est très défavorable à la dispersion des polluants. L'air y devient d'autant plus pollué que le trafic automobile et les émissions sont denses. Cette pollution de proximité est très variable dans l'espace et dans le temps. Modèles → évaluer l'exposition aux polluants d'un piéton, d'un automobiliste, d'un résident.

Une rue canyon (étroite, encaissée, entourée d'immeubles élevés) → niveaux de pollution élevés.



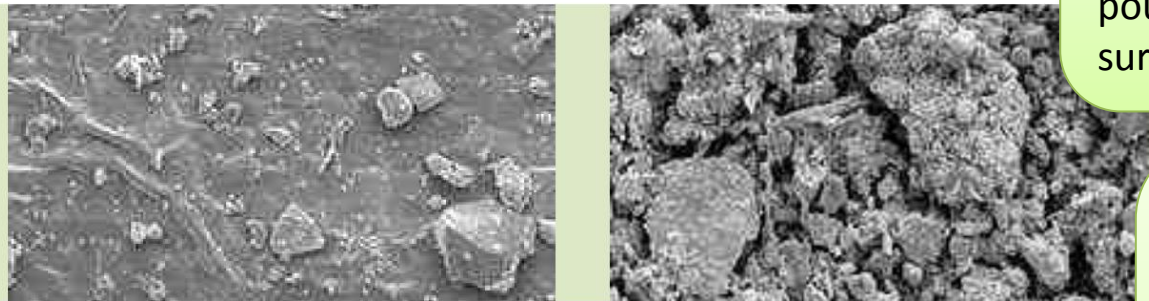
- **Les rues canyon : recirculations urbaines**

- Les vents parallèles favorisent plus la pollution sur les zones piétonnes de la rue que les vents perpendiculaires, qui fournissent des meilleures conditions de dispersion.
- Les vents perpendiculaires font apparaître un phénomène particulier de circulation en rue canyon.



### • Influence de l'utilisation des sols

Les espaces verts → double influence sur la pollution (îlots de fraîcheur / dépôt sec).



**FIGURE 3**  
Particules de poussière sur une feuille de vigne vierge en juin (à gauche) et en octobre (à droite) (Thönnessen, 2005).

La partie intérieure de la feuille absorbe l'ozone et les polluants gazeux. Les troncs, branches et tiges interviennent dans l'élimination des poussières, qui se fixent aussi sur la surface extérieure de la feuille.

Les particules de poussière s'impactent sur les feuilles. Pour cela elles doivent entrer en contact direct avec la feuille ou passer à une distance assez proche pour subir l'électricité statique. Les inégalités de surface (rugosité, poils) accélèrent ce processus. Le degré d'humidité et la matière adhérente de la feuille jouent également un rôle.

TYPE DE POLLUTION	MÉCANISME	CARACTÉRISTIQUES DES FEUILLES LES PLUS APPROPRIÉES
Ozone, dioxyde d'azote	Absorption	Feuilles plates et larges des feuillus
Composés organiques volatils (PCB, dioxines, furanes)	Adsorption	Couche épaisse et cireuse (cuticule) sur la feuille, surtout chez les conifères
Particules de poussière (PM10)	Contact	Forme pointue comme les épines des conifères. Feuilles rugueuses, velues et adhésives des arbres feuillus.



### • Influence de l'utilisation des sols

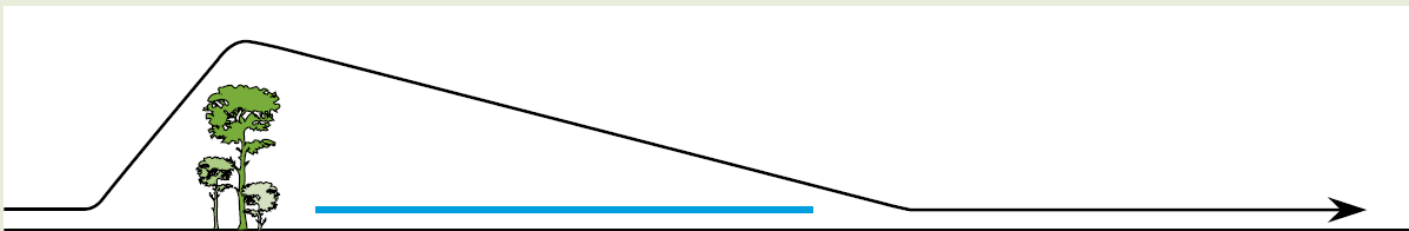
L'ampleur de la zone protégée sous le vent dépend de la densité, de la porosité et de la hauteur de la rangée d'arbre.

1) Densité : Les arbres en lisière / isolés sont plus efficaces pour absorber la pollution car une plus grande partie de leur feuillage est en contact avec l'air pollué.

2) Porosité : Les arbres situés juste à côté de la route remplissent bien leur fonction de filtration, mais ils freinent aussi la vitesse du vent → moins mélange des gaz d'échappement et une augmentation locale des concentrations : effet de « tunnel vert ». La dispersion, surtout des particules fines, est alors limitée et ne peut pas être compensée par la filtration des espaces verts. Ceci peut être évité en aménageant une plantation d'une porosité suffisante. En outre, dans les espaces verts poreux, bien plus de feuilles participent au processus de nettoyage que dans les groupes denses.

FIGURE 5

Flux du vent autour d'une rangée d'arbres plus ou moins ouverte. Le vent s'approche par la gauche. L'ampleur de la zone protégée où la vitesse du vent est réduite est indiquée en bleu. La zone protégée s'étend sur une longueur supérieure de 15 à 20 fois la hauteur de la rangée d'arbres.



# Ateliers sur les particularités urbaines

- **Gradients : variabilité horizontale multi-échelles**
  - Hétérogénéité urbaine
  - Gradients autour d'un bâtiment
  - Gradients le long d'une rue, sur un transect routier
  - Gradients verticaux
- **Micro-environnements**
  - Métro
  - Parkings souterrains
  - Rue canyon
- **Transfert des sources entre milieux**
  - Régional / local
  - Intérieur / extérieur
  - Impact industriel et commercial en ville

# Hétérogénéité : des directions privilégiées?

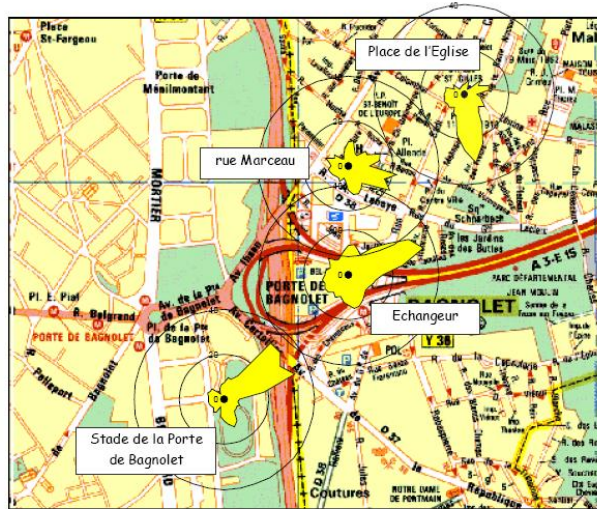


Figure 38 : Roses de pollution du dioxyde de soufre ( $\text{SO}_2$ ) enregistrées sur les quatre sites automatiques du 1<sup>er</sup> octobre au 14 décembre 2004.

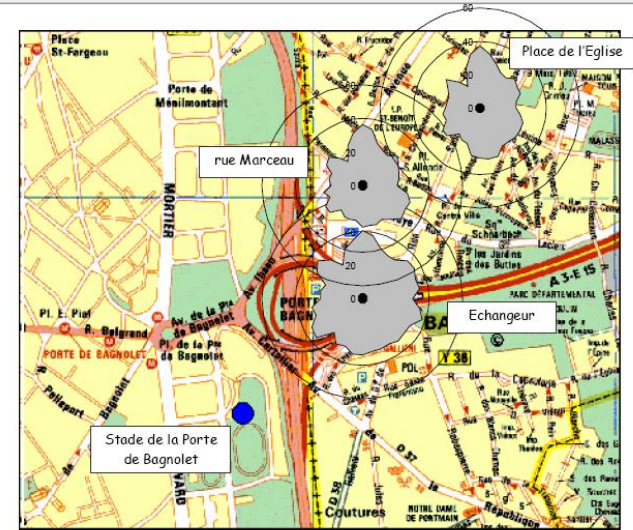


Figure 41 : Roses de pollution des particules ( $\text{PM}_{10}$ ) enregistrées sur les quatre sites automatiques du 1<sup>er</sup> octobre au 14 décembre 2004.

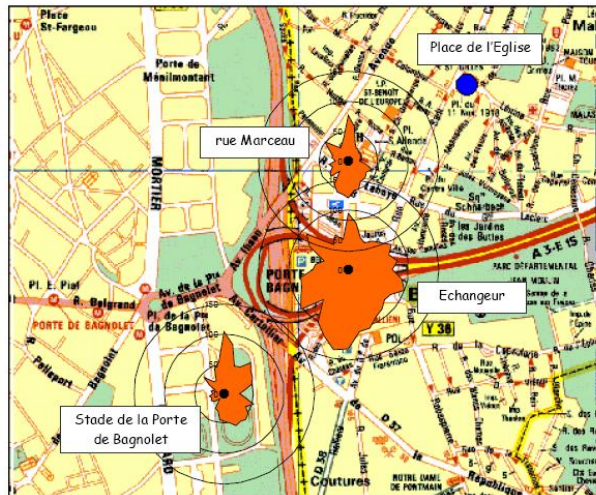


Figure 40 : Roses de pollution du monoxyde d'azote ( $\text{NO}$ ) enregistrées sur les sites spécifiques du 1<sup>er</sup> octobre au 14 décembre 2004.

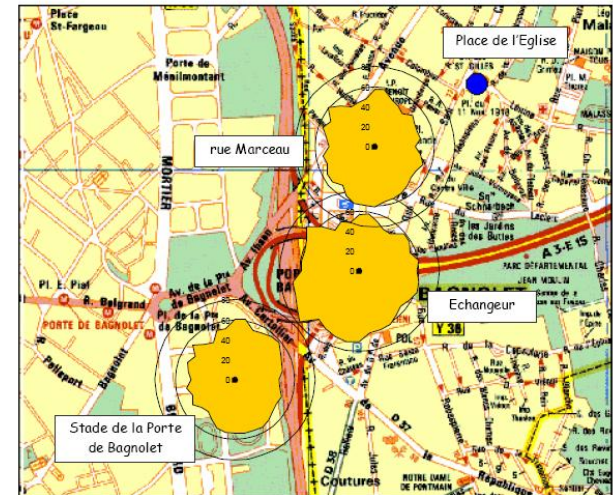


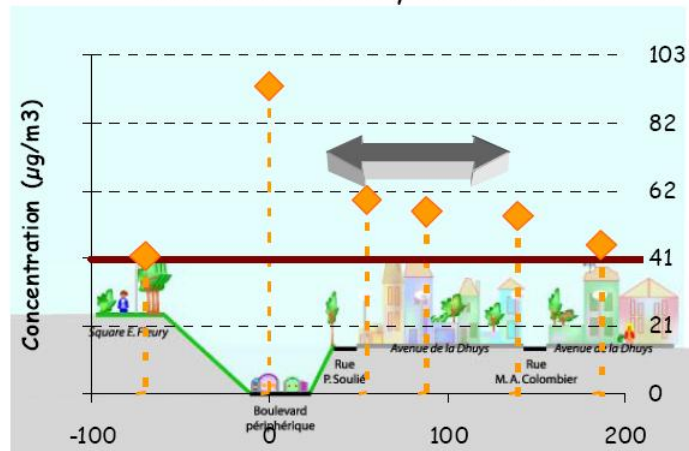
Figure 39 : Roses de pollution du dioxyde d'azote ( $\text{NO}_2$ ) enregistrées sur les sites spécifiques du 1<sup>er</sup> octobre au 14 décembre 2004.

# Gradients : Variabilité horizontale urbaine

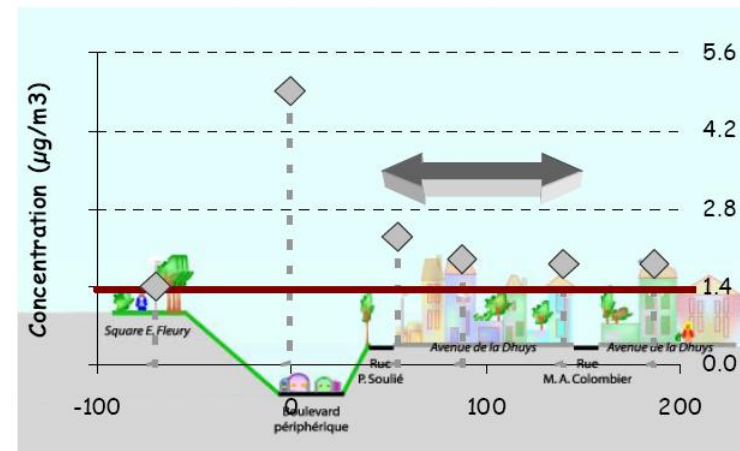
- Dispersion d'un flux d'émissions linéiques
  - Observation de forts gradients sur de courtes distances



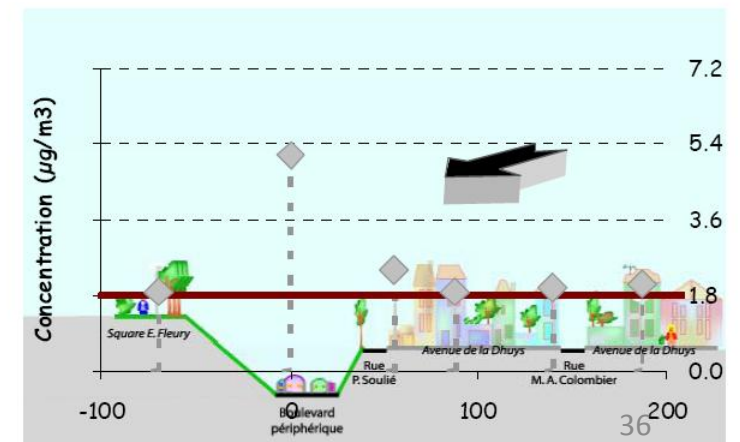
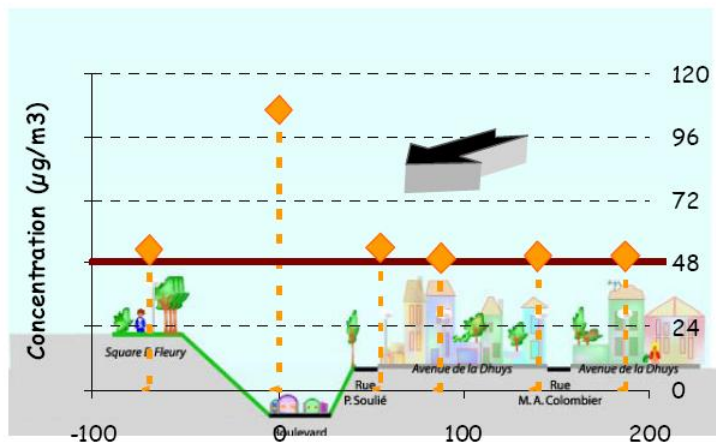
Résultat de dioxyde d'azote



Résultat de benzène



(a) : 1<sup>ère</sup> série : Du 1<sup>er</sup> octobre au 15 octobre 2003



(b) : 2<sup>ème</sup> série : Du 15 au 29 octobre 2003

# Gradients : Variabilité horizontale urbaine

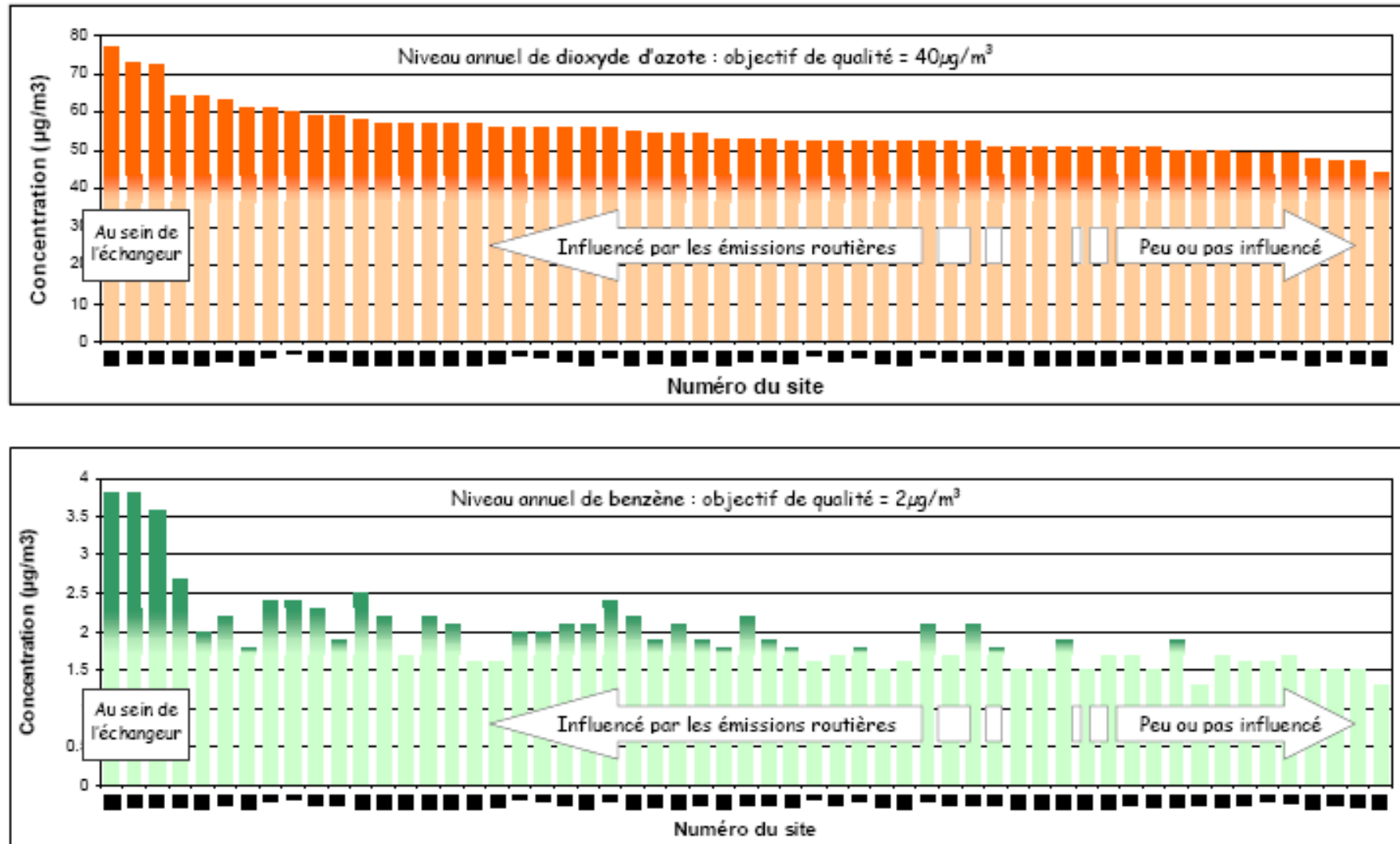


Figure 47 : Moyenne annuelle évaluée sur les différents sites de mesure en dioxyde d'azote et en benzène. En couleur foncée est présentée la partie de la concentration totale qui dépasse l'objectif de qualité annuel pour les deux composés.

# Gradients : Variabilité horizontale en zone de trafic



# Gradients : Variabilité horizontale en zone de trafic

Vardoulakis et al., 2005

- **Variabilité horizontale** autour d'un point de mesure urbain (station fixe)

Le coefficient de variation spatiale est une mesure statistique de la variabilité de la pollution a été calculé en divisant l'écart-type des concentrations observées aux différents points de mesure par la valeur moyenne observée sur la période.

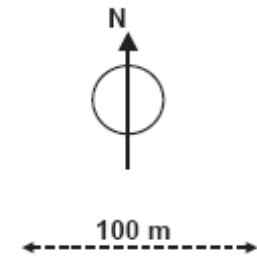
Ils ont été moyennés par mois. En septembre, prévalence de vents d'Ouest (perpendiculaire à l'avenue Leclerc) qui ont induit de larges gradients de concentrations dans la rue.

Month	Spatial CV (%)
June	27
July	26
August	24
September	34
October	25
November	26
December	27

Month	Benzene average (ppb)	Standard deviation (ppb)
June	2.10	0.57
July	2.30	0.57
August	2.24	0.48
September	2.48	0.74
October	3.14	0.77
November	2.45	0.71
December	2.51	0.69



Site	Benzene		
	max ppb	average ppb	min ppb
A	3.4	2.8	1.8
B	2.8	2.1	1.7
C	2.5	1.8	1.3
J	2.3	1.8	1.4
D	3.6	2.9	1.8
E	3.2	2.4	2.0
F	3.9	2.7	2.2
G	3.7	2.4	1.9
H	4.0	3.2	2.8
I	2.6	2.2	1.8
BG	1.5	0.9	0.5



Montsouris Park  
BG □

Bd. Périphérique

# Gradients : Variabilité verticale en zone de bâti

- Quels gradients verticaux observe-t-on en ville?

Malgré des temps caractéristiques de mélange relativement courts dans la couche limite, l'intensité des sources au sol génère un gradient de concentration même pour les espèces inertes.

Les rues sont caractérisées par leur Aspect Ratio  $AR = \text{Hauteur}/\text{Largeur}$ . En-dessous de 1 les rues ne sont pas considérées comme encaissées.

Pour des rues d'AR compris entre 1.3 et 5.7, des gradients verticaux forts sont observés pour des espèces inertes. Un rapport de 3 à 5 entre 3m et 20-30m au-dessus du sol est donné par plusieurs études.

Ratio between the concentrations measured at street level and those measured at rooftop during whole of the measurement period, and during times with similar weather conditions

	CO	O <sub>3</sub>	NO	NO <sub>2</sub>	NO <sub>x</sub>
4.-20.9	5.1	0.12	12.6	2.1	4.9
4.-16.9	5.6	0.11	14.5	2.3	5.6
17.-20.9	3.8	0.16	7.0	1.4	2.9

*On note pour ces rapports de concentration une dépendance très forte envers le système météorologique, et envers le temps de vie du composé considéré évidemment.*

*Vakeva et al., 1999*



# Impact des obstacles urbains sur la dispersion

Les résultats suggèrent que des barrières solides réduisent significativement le maximum et les concentrations au sol sous le vent d'une route majeure en situation de flux dégagée.

La présence d'une barrière de bord de la route produit un réhaussement vertical des émissions routières, mélangeant les émissions avec l'air propre au-dessus de la route et réduisant la concentration complète dans le panache (max + près du mur). Elle mène aussi à une zone de mélange dans le sillage de la barrière, où un petit delta d'émissions peut significativement augmenter les concentrations immédiatement derrière la barrière.

La réduction de l'écoulement d'air augmente les concentrations routières sur le côté amont de la barrière, qui empirent avec une hauteur de barrière croissante.

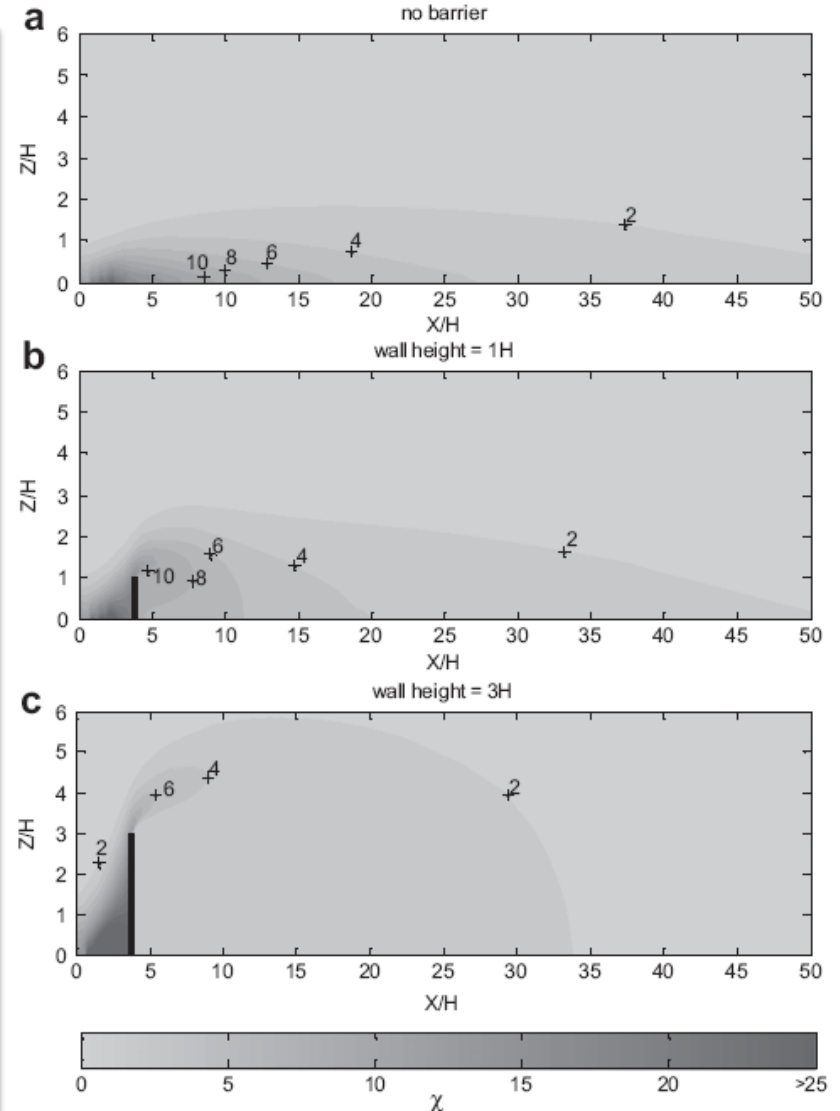


Fig. 4.  $\chi$  for scenarios with orthogonal winds and cases with no barrier (a), barrier of height  $H$  (b), and barrier of height  $3H$  (c).

# Atelier sur les micro-environnements

Le métro

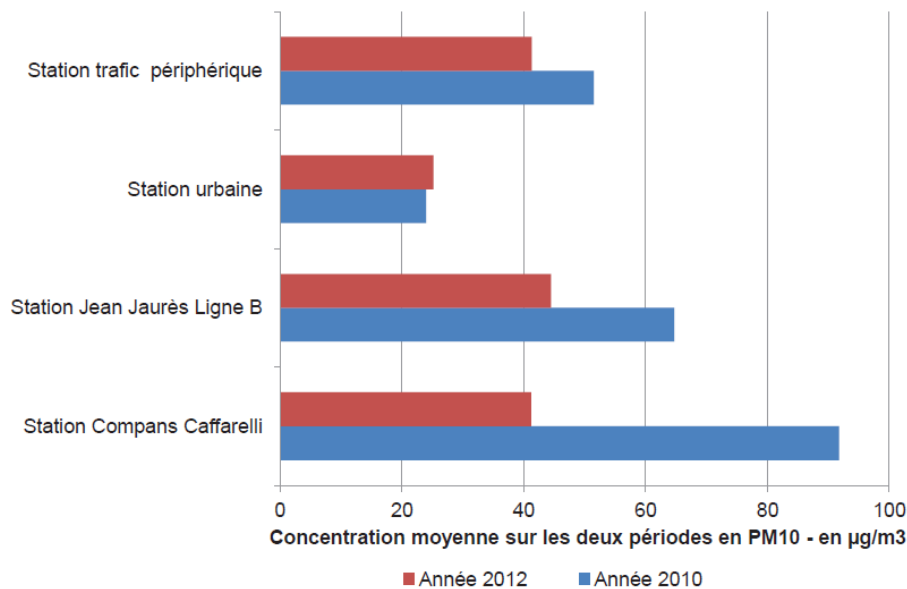
Les parkings

Les rues canyon

# Le métro

## 1. Des concentrations

- a) du même ordre de grandeur que celles rencontrées en zone de trafic routier dense
- b) Profil corrélé à la fréquence des rames / passagers été comme hiver. Pas d'influence de la météo / pluie !



## Mesures de qualité de l'air dans le métro toulousain en 2012

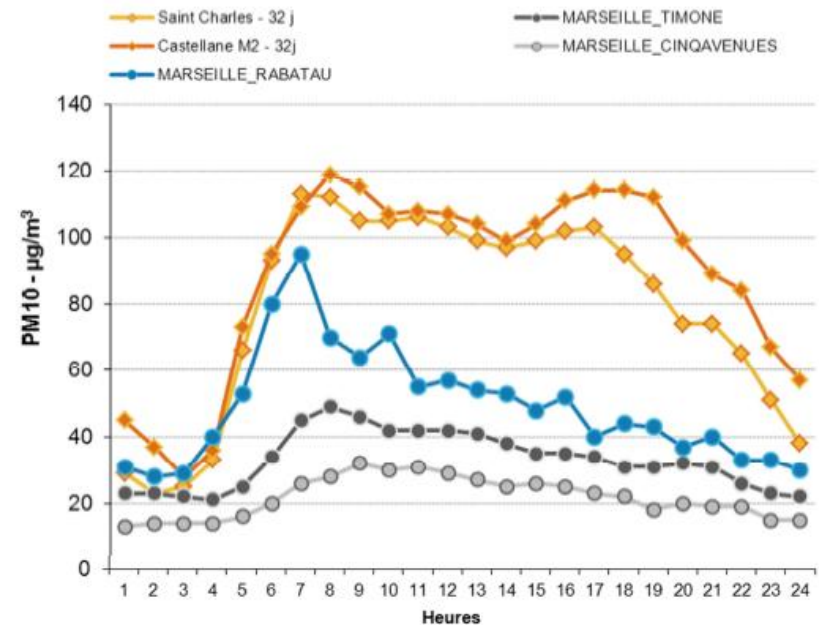
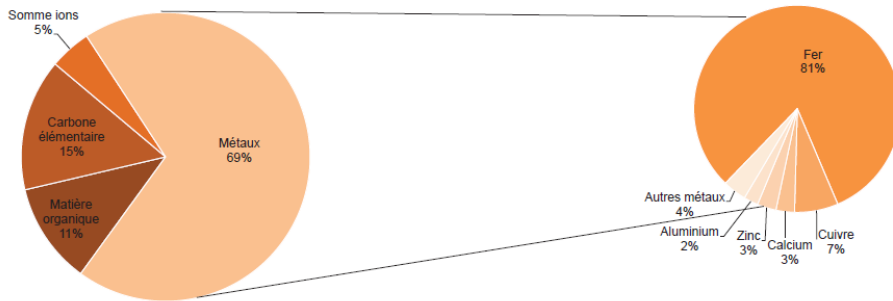


Figure 8 : Profil journalier moyen en particules PM10 : période estivale : du 9/06 au 13/07/10

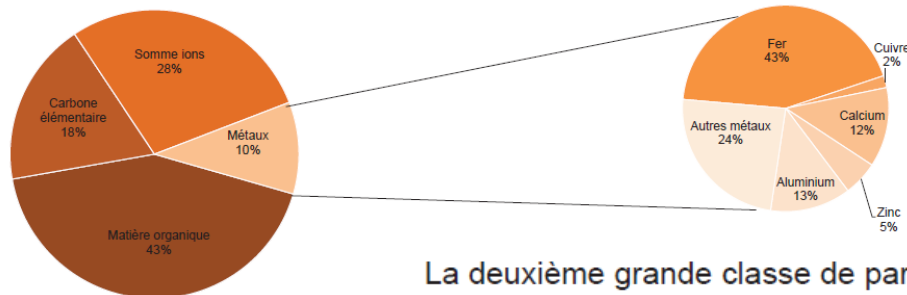
# Le métro

## Mesures de qualité de l'air dans le métro toulousain en 2012

Station de métro Esquirol - période hivernale



Station trafic toulousaine Périphérique - période hivernale



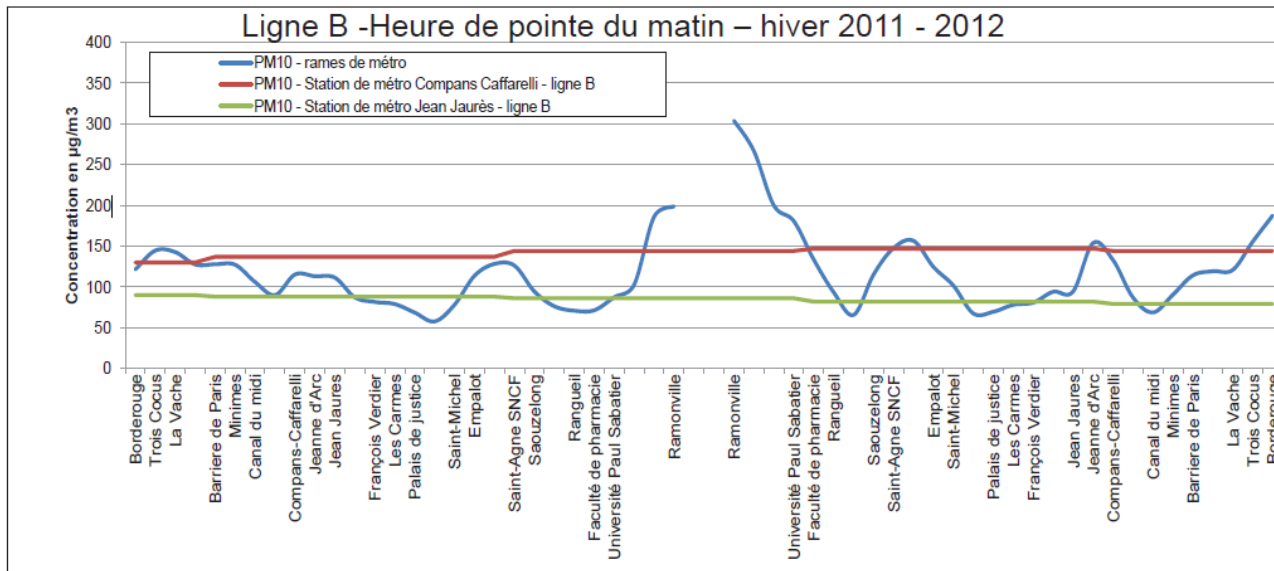
## 2. Des sources de particules internes (frottement sur les rails)

La deuxième grande classe de particules est composée d'oxydes de fer, plus ou moins oxydés et liés à différents éléments (Calcium, Cuivre, Chlore, Manganèse, Soufre, Baryum...). Ces éléments sont similaires à ceux retrouvés dans les stations de métro de Barcelone ou de Londres. Les oxydes de fer sont typiques de l'abrasion des rails conducteurs ainsi que des systèmes de freinage du métro. La présence d'autres éléments peut s'expliquer par les différents alliages de métaux. Un pic de baryum observé sur l'un des échantillons pendant la période hivernale pourrait être expliqué par la présence de barite ( $\text{BaSO}_4$ ), dans le système de freinage du métro (données fournies par Tisséo).

Contrairement aux mesures dans le métro, l'air prélevé sur le périphérique et sur la station urbaine Berthelot contient quelques oxydes de fer ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), mais se compose principalement des poussières crustales, notamment des mélanges d'argiles et de sables avec une majorité de silice, potassium, aluminium et oxygène. Cette composition est typique de l'air extérieur. On note également, pour le site Périphérique, la présence d'une grande proportion de carbone élémentaire, issu de la combustion des émissions de diesel des véhicules transitant sur le périphérique.

### 3. Un impact faible des systèmes de ventilation

### 4. L'intérieur des rames : un milieu plus variable et parfois plus confiné (10% du temps de dépassement du seuil de CO2 réglementaire sanitaire - 1300 ppm - pour des locaux non fumeurs)



Ligne B - Heure de pointe du matin – été 2012

# Parkings souterrains

Le parc de stationnement République, situé dans le centre de Lyon, a été retenu pour cet état des lieux détaillé de la qualité de l'air dans un parc souterrain.

Construit en 1993, ce parc possède 784 places de stationnement réparties sur 7 niveaux. Le local d'exploitation est situé au premier niveau. Se trouve également au premier niveau une station de lavage auto. Le parc est équipé d'une ventilation mécanique à deux vitesses, asservie sur les niveaux de CO.

Situé au centre-ville de Lyon sous la rue de la République, ce parc est très fréquenté, notamment par la clientèle des commerces.



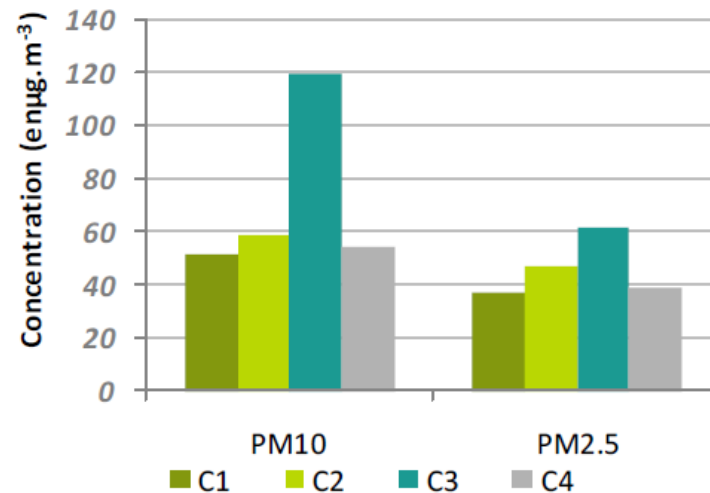
**Figure 1** Entrée du parc République

# Parkings souterrains



période, la ville de Lyon a connu un épisode neigeux important et une période très froide. La part des PM2.5 représente alors seulement 50% des PM10 contrairement aux autres campagnes où cette part varie de 70 à 80%. Lors de cette campagne, les particules mesurées sont donc des « grosses » particules qui pourraient être dues à d'autres phénomènes que l'échappement. L'influence d'une remise en suspension de particules déposées au sol est possible.

[Afficher o](#)



**Figure 10 Concentrations moyennes de PM10 et PM2,5 à chaque campagne**

# Parkings souterrains

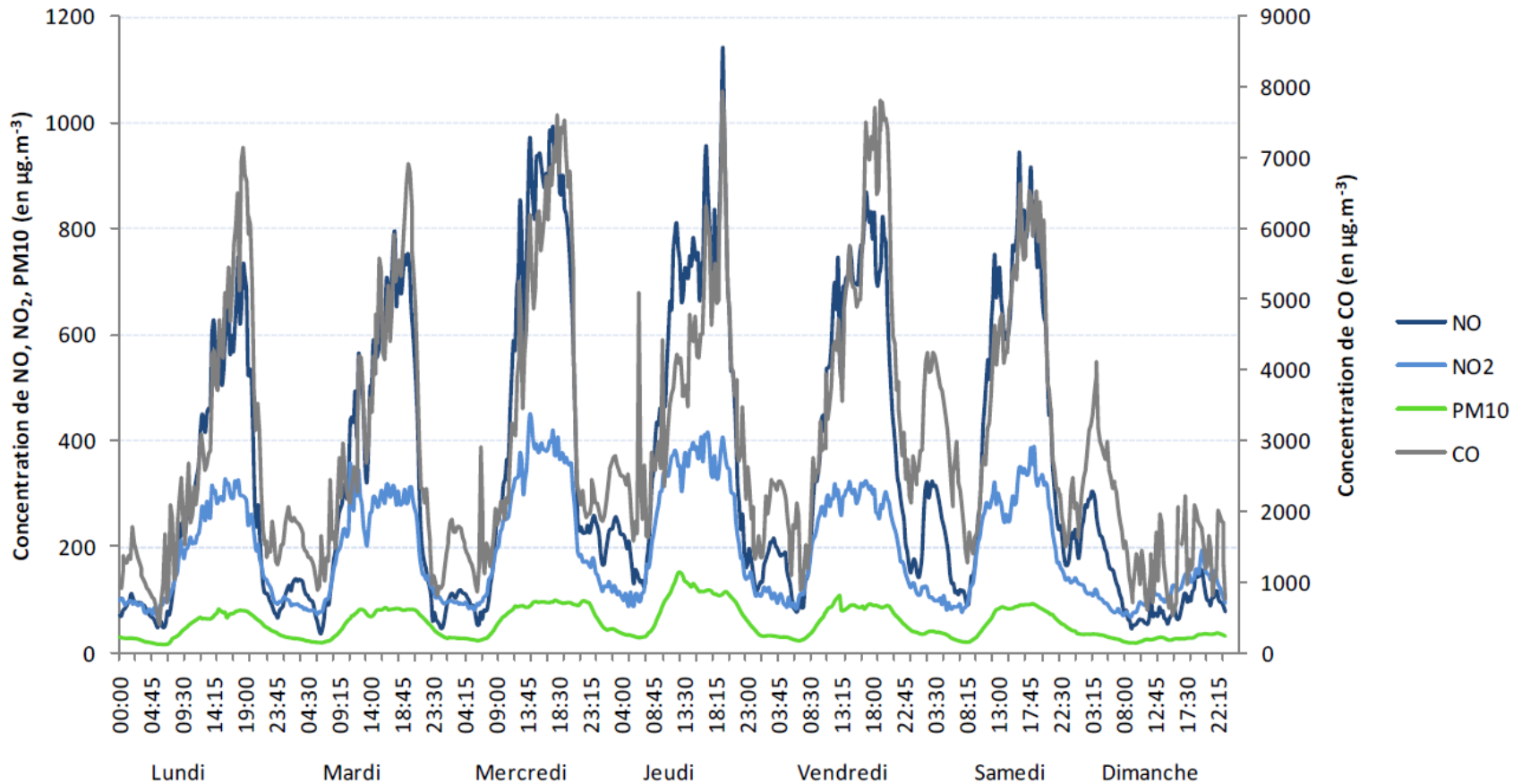


Figure 17 Profil hebdomadaire moyen des concentrations dans le niveau -1 du parc République



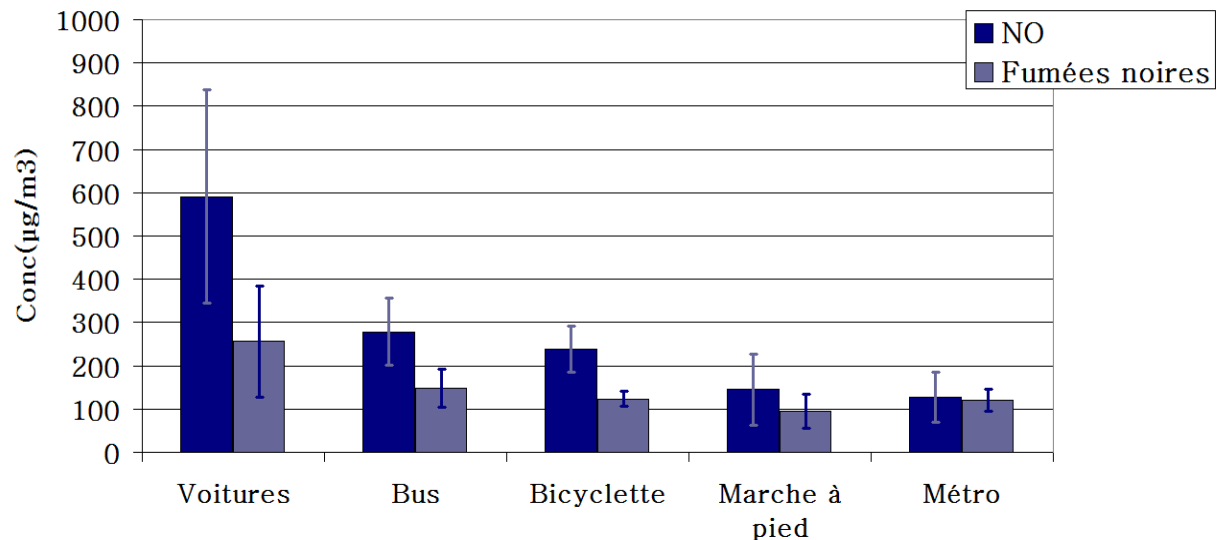
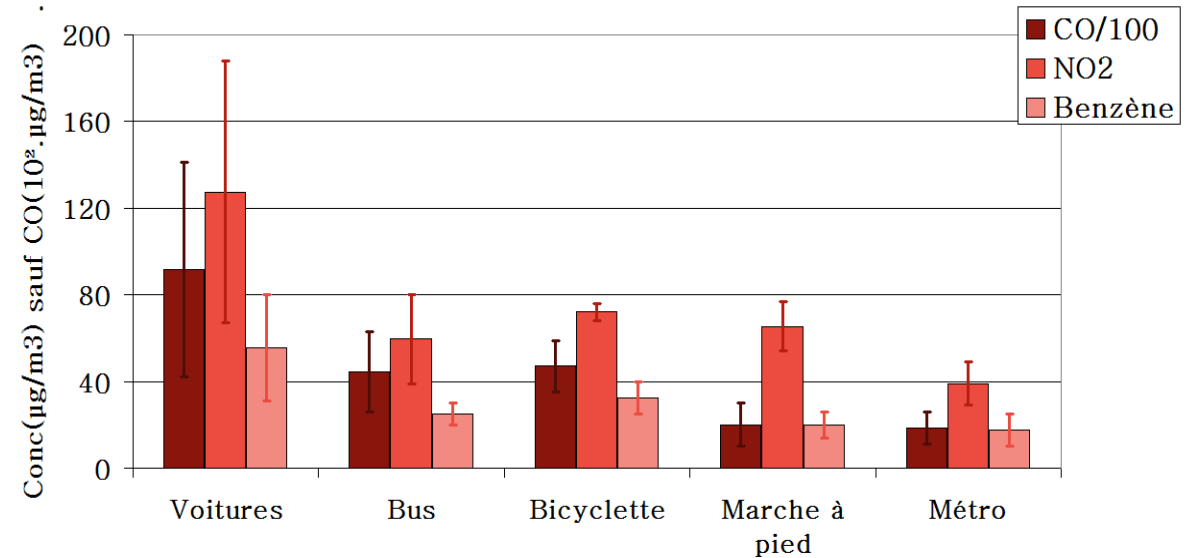
# Micro-environnements et trafic

Incontournables,  
ils définissent des paramètres  
« sous-maille » pour les  
études épidémiologiques

→ Le temps passé dans les  
transports est déterminant.

Chez les conducteurs de bus  
évidemment (1h de conduite  
= + 2.4  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ), mais pour  
des personnes non exposées  
professionnellement, il reste  
un des déterminants pour le  
NO<sub>2</sub>. Pour  
Pour NO le temps passé dans  
les VP représente 27% de  
l'exposition individuelle au  
NO.

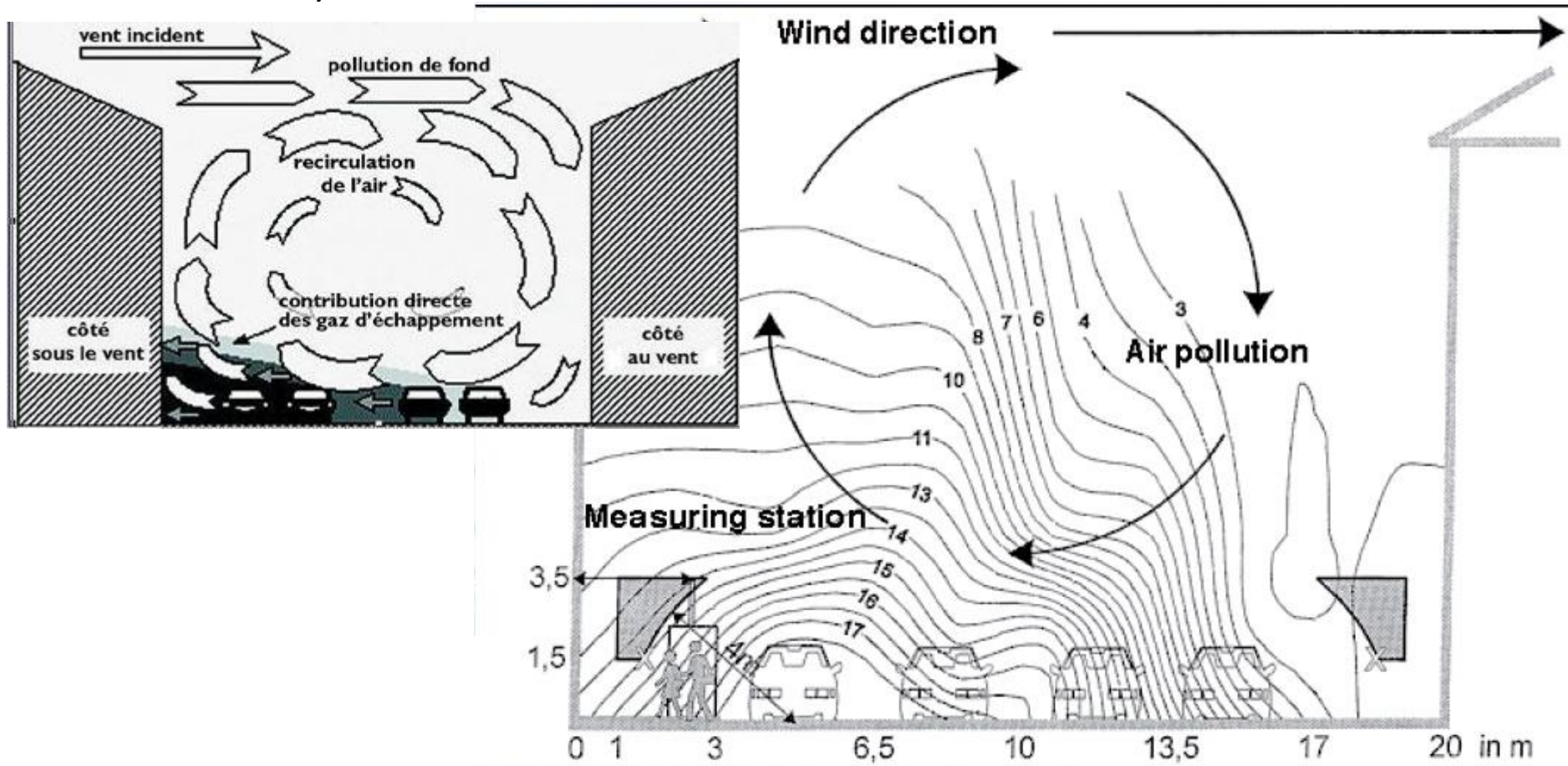
Concentrations en micro-environnements  
en région parisienne (Janvier 1996 - Février 1998)

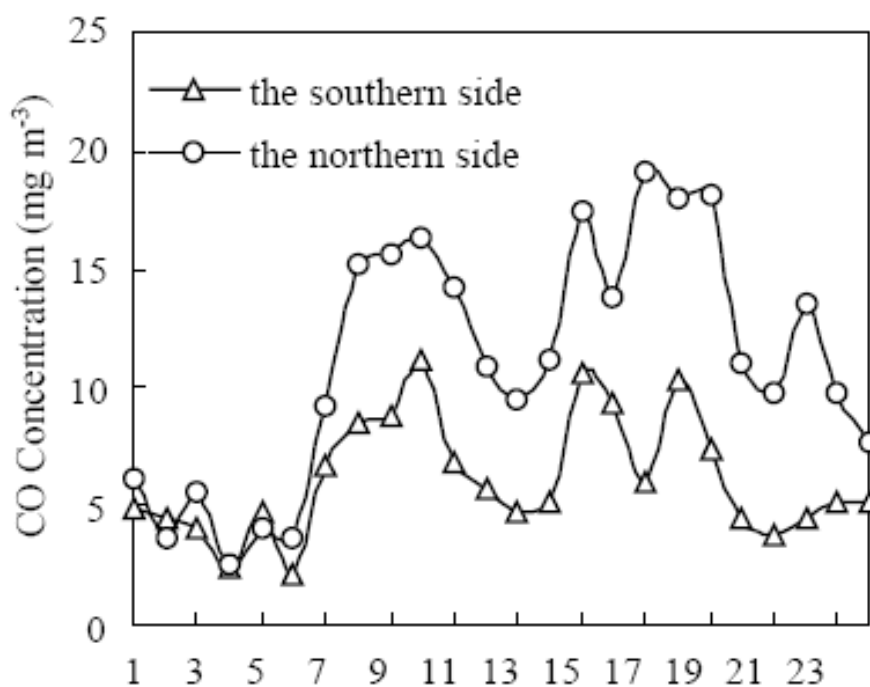
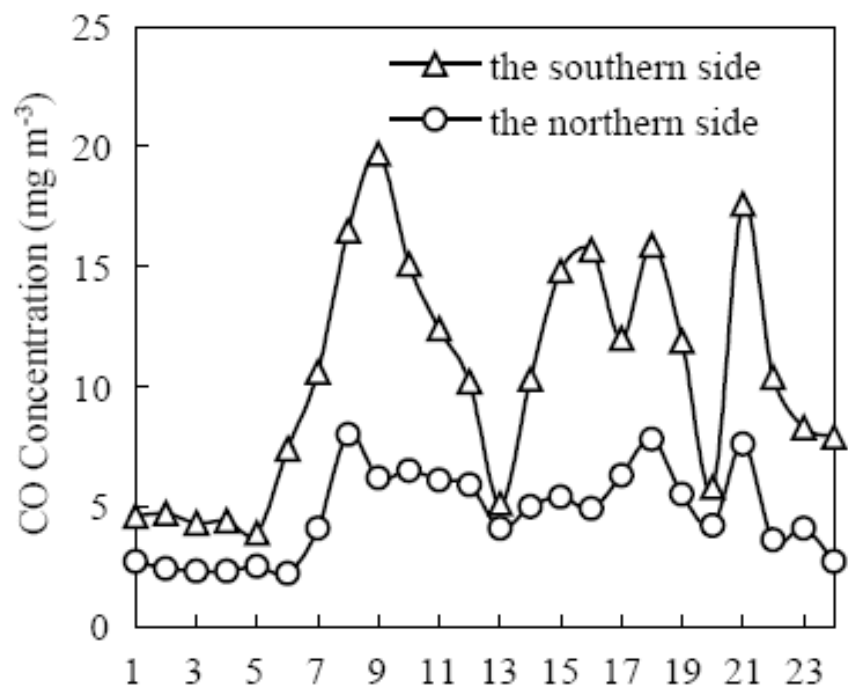


# Micro-environnements et trafic

- **Les rues canyon : recirculations urbaines**

- Les vents parallèles favorisent plus la pollution sur les zones piétonnes de la rue que les vents perpendiculaires, qui fournissent des meilleures conditions de dispersion.
- Les vents perpendiculaires font apparaître un phénomène particulier de circulation en rue canyon.



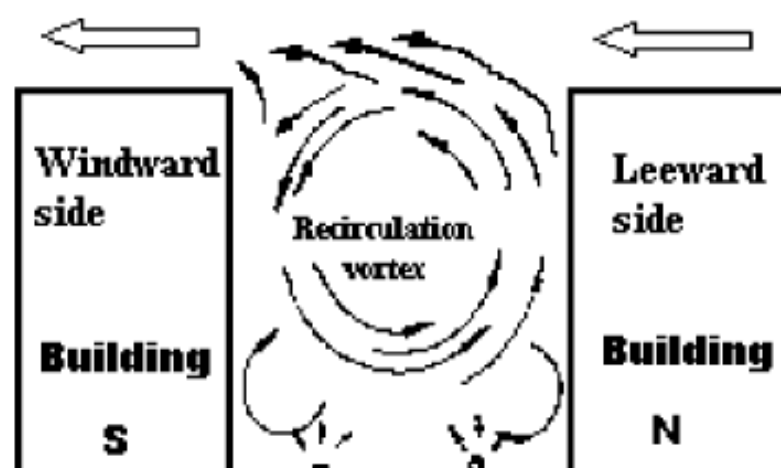
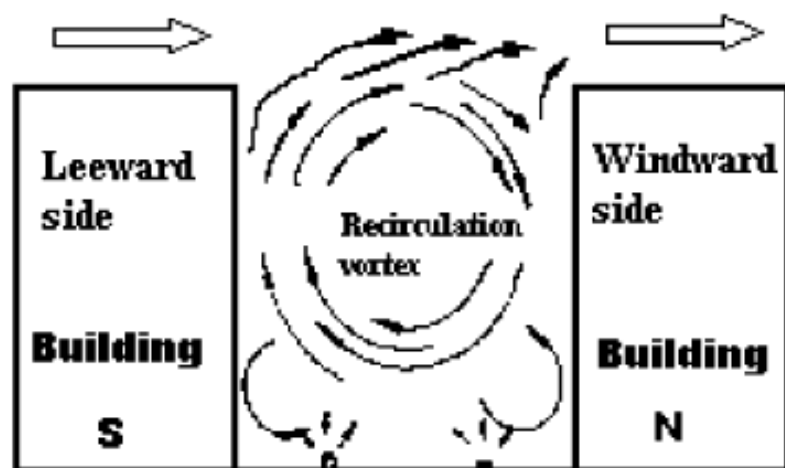


**Background concentration,  $C_b$**

**Background concentration,  $C_b$**

**Mean wind direction**

**Mean wind direction**

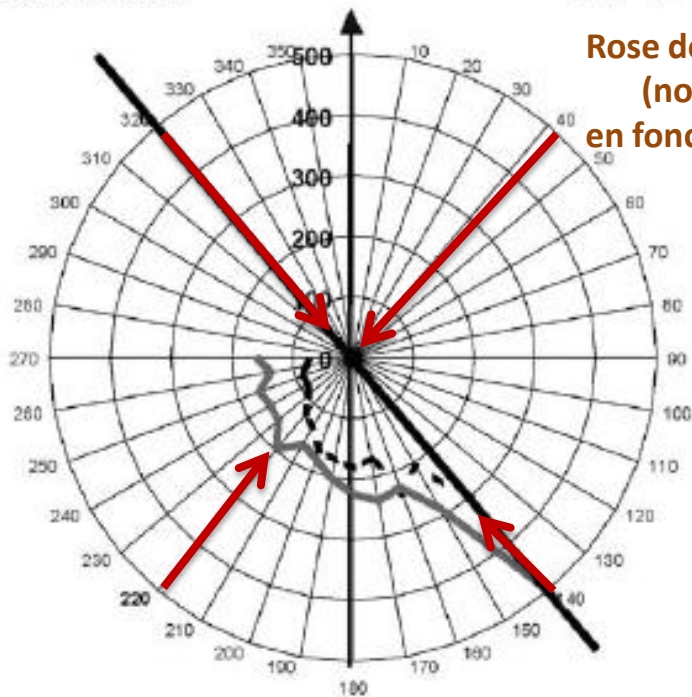


# Micro-environnements et trafic

- **Les rues canyon : recirculations urbaines**

- Les vents parallèles favorisent plus la pollution sur les zones piétonnes de la rue que les vents perpendiculaires, qui fournissent des meilleures conditions de dispersion.
- Les vents perpendiculaires font apparaître un phénomène particulier de circulation en rue canyon.

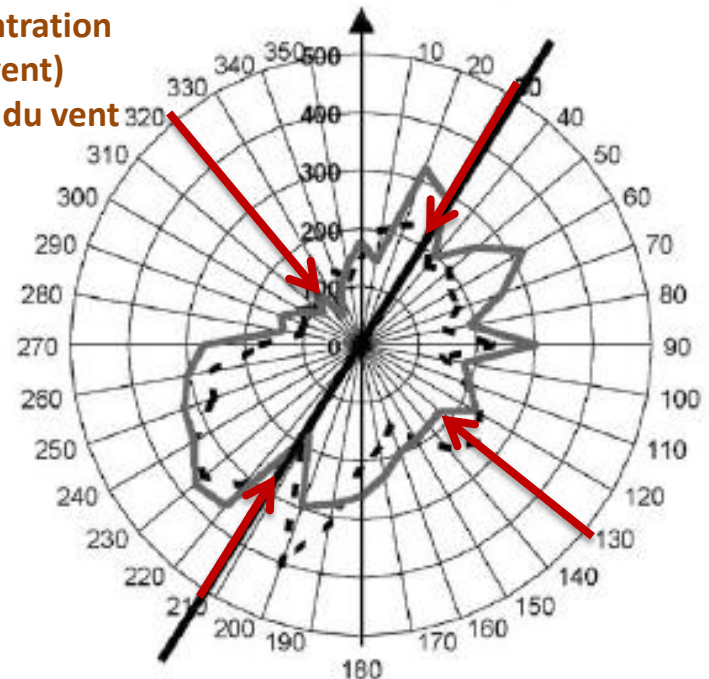
a) Bd. Voltaire



- - - NO (ppb)      - - - NOx (ppb)  
— CO (ppm) x 100      — CO (ppm) x 100

Rose donnant la concentration  
(normalisée trafic/vent)  
en fonction de l'origine du vent

b) Rue de Rennes



# Transferts entre milieux / échelles

**Etude en France : Le couplage de mesures micro-environnementales aux mesures individuelles et le recueil des données du budget espace-temps des participants ont permis d'identifier et parfois de quantifier les principaux déterminants de l'exposition individuelle.**

- Les résultats sont unanimes: les habitats influencent les niveaux d'exposition individuelle au NO<sub>2</sub>. L'utilisation du gaz contribue de façon significative à cette pollution intérieure.
- L'usage d'une ventilation mécanique diminue les teneurs internes. La pollution domestique est toutefois également liée à la proximité d'une voie à grande circulation (proximité, intensité, régime vents, niveaux fond).



# Transferts entre milieux / échelles

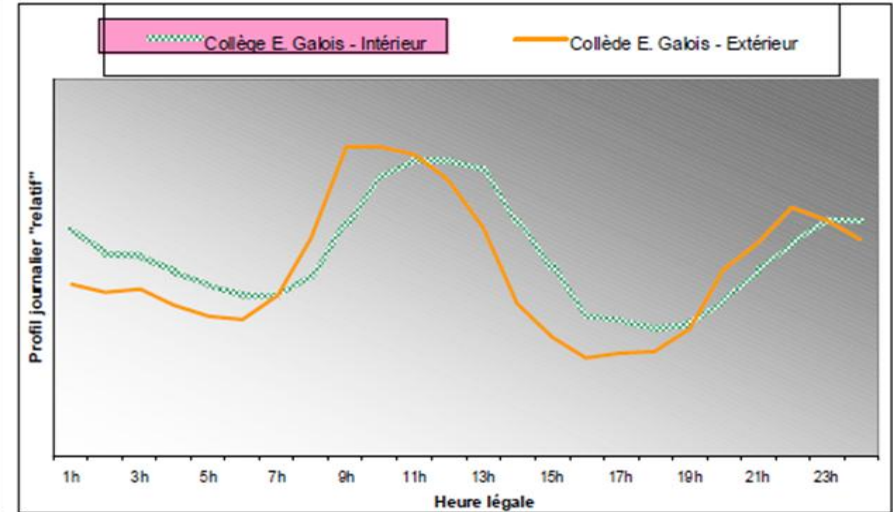
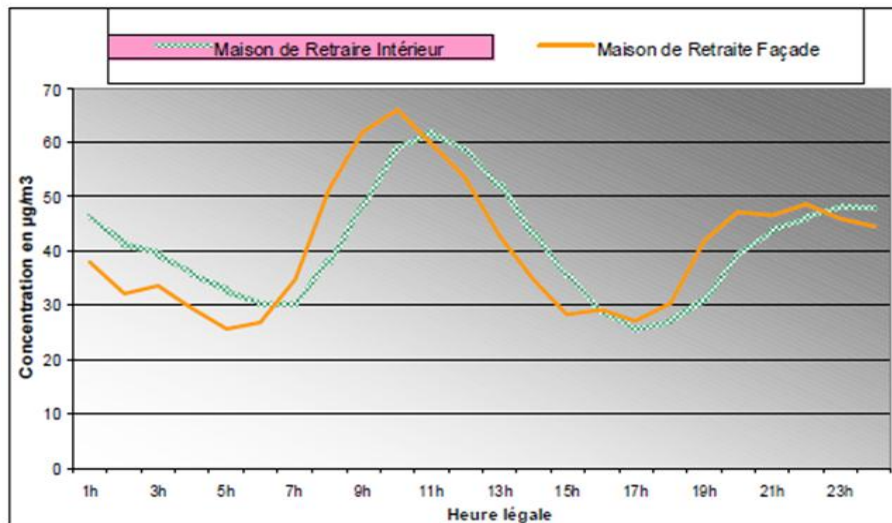


Figure 19 : Profils moyens journaliers en NO dans l'air intérieur et extérieur des sites étudiés dans la Maison de Retraite et dans le Collège E. Galois.

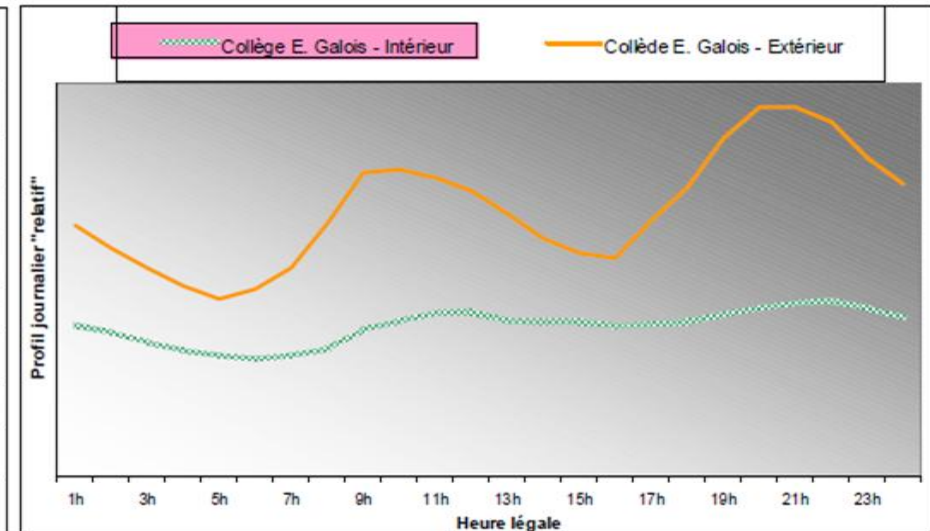
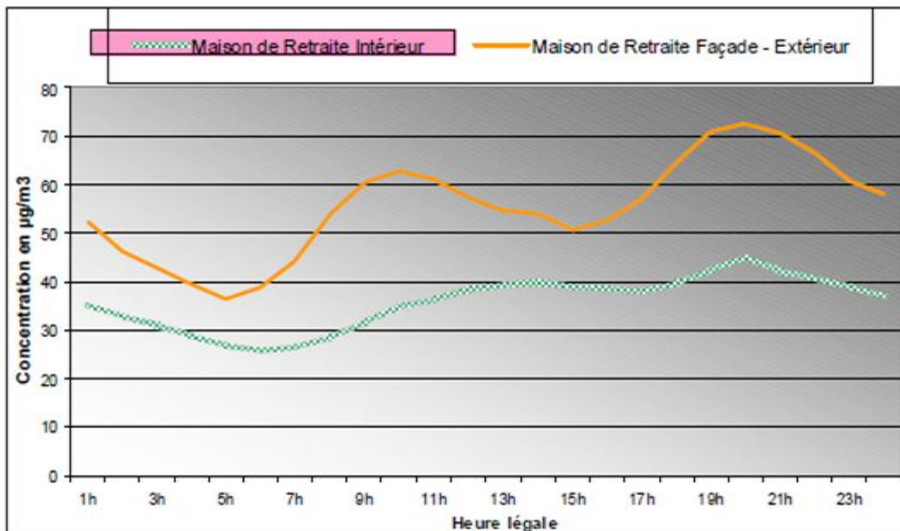


Figure 20 : Profils moyens journaliers en NO<sub>2</sub> dans l'air intérieur et extérieur des sites étudiés dans la Maison de Retraite et dans le Collège E. Galois.

# Transferts entre milieux / échelles

- Variations urbaines dans 4 villes d'Europe: indoor/outdoor

Mesure pendant 19 jours au printemps et en hiver à Amsterdam de NO<sub>2</sub> +

- HAP particulaires      VOC gazeux
- PM<sub>10</sub>                      PM<sub>25</sub>
- Réflectance (EC)

Ajout de la dimension intérieure (18 foyers près des grands axes et 18 foyers près des rues calmes)

Près des foyers à l'extérieur

→ PM 15-20% supérieures près des grands axes routiers, comme pour NO<sub>2</sub> (22%)

→ Le contraste pour les composants des PM et VOC est plus fort, de l'ordre d'un facteur 2

→ Les contrastes grands axes / rues calmes sont hautement corrélés pour l'ensemble des polluants

→ Chacun de ces derniers polluants peut représenter la pollution atmosphérique urbaine mais les PM10 et les PM25 ne sont pas de bons indicateurs du trafic routier. Les particules fines ont leurs niveaux qui sont plus largement déterminés par le transport à longue distance. En revanche la réflectance est principalement liée aux suies (EC) qui proviennent des émissions de diesel.

Table 1  
Indoor and outdoor pollutant concentrations at high and low traffic density homes<sup>a</sup>

	High traffic homes				Low traffic homes				Median difference <sup>a</sup>
	Mean	Median	Min	Max	Mean	Median	Min	Max	
<i>Outdoor</i>									
PM10 (µg m <sup>-3</sup> )	43	41	22	68	36	31	12	68	5 <sup>c</sup>
PM2.5 (µg m <sup>-3</sup> )	25	21	12	50	21	15	10	54	3 <sup>c</sup>
Absorption coefficient PM10 (m <sup>-1</sup> × 10 <sup>-5</sup> )	2.99	2.96	1.86	4.88	1.63	1.63	0.66	2.75	1.40 <sup>c</sup>
Absorption coefficient PM2.5 (m <sup>-1</sup> × 10 <sup>-5</sup> )	2.78	2.80	1.72	4.85	1.53	1.57	0.53	2.72	1.29 <sup>c</sup>
BaP (ng m <sup>-3</sup> )	0.82	0.67	0.25	2.31	0.35	0.29	0.12	0.84	0.35 <sup>c</sup>
SumPAH (ppt)	0.38	0.33	0.14	0.93	0.17	0.15	0.07	0.37	0.18 <sup>c</sup>
Benzene (µg m <sup>-3</sup> )	5.7	5.2	2.8	10.6	3.0	3.1	1.6	4.9	2.3 <sup>c</sup>
SumVOC (ppb)	11.8	10.8	5.5	22.5	6.1	6.0	3.1	10.2	4.7 <sup>c</sup>
<i>Indoor</i>									
PM10 (µg m <sup>-3</sup> )	37	28	16	87	22	21	9	33	5 <sup>c</sup>
PM2.5 (µg m <sup>-3</sup> )	27	18	10	78	12	12	4	23	6 <sup>c</sup>
Absorption coefficient PM10 (m <sup>-1</sup> × 10 <sup>-5</sup> )	2.21	2.27	1.11	3.36	1.18	1.26	0.45	1.81	1.09 <sup>c</sup>
Absorption coefficient PM2.5 (m <sup>-1</sup> × 10 <sup>-5</sup> )	2.08	2.12	1.33	3.11	1.11	1.09	0.40	1.82	1.02 <sup>c</sup>
BaP (ng m <sup>-3</sup> )	0.49	0.38	0.15	1.12	0.17	0.16	0.03	0.39	0.24 <sup>c</sup>
SumPAH (ppt)	0.22	0.17	0.09	0.47	0.10	0.09	0.02	0.19	0.10 <sup>c</sup>
Benzene (µg m <sup>-3</sup> )	7.7	7.3	2.2	18.8	5.7	6.3	1.5	10.5	0.45
SumVOC (ppb)	14.0	15.7	4.5	19.9	9.6	8.7	2.1	17.5	4.1 <sup>b</sup>

<sup>a</sup>Median of the *N* daily differences (ratios); this median is not necessarily the same as the difference between medians in this table. Sum PAH = sum of concentrations of all six non-volatile PAHs (Methods). Sum VOC = sum of all eight VOCs (Methods).

<sup>b</sup> = *p* < 0.05 (signed rank test).

<sup>c</sup> = *p* < 0.01 (signed rank test).

<sup>d</sup>*N* = number of days with at least one measurements at both a high and low traffic density location (maximum possible 19 days).

# Transferts entre milieu / échelles

- Variations urbaines dans 4 villes d'Europe: indoor/outdoor

Mesure pendant 19 jours au printemps et en hiver à Amsterdam de NO<sub>2</sub> +

- HAP particulaires      VOC gazeux
- PM<sub>10</sub>                      PM<sub>2.5</sub>
- Réflectance (EC)

Ajout de la dimension intérieure (18 foyers près des grands axes et 18 foyers près des rues calmes)

En intérieur,

→ Des différences de l'ordre de 20% également, entre foyers exposés ou calmes, ont été trouvées → rôle important de la pollution extérieure et des phénomènes de transfert.

→ Les COV font exception (concentrations plus fortes à l'intérieur qu'à l'extérieur → importance des sources intérieures)

→ Pour HAP et le EC les rapports exposés / calmes sont identiques entre extérieur et intérieur et cohérents avec la pénétration quasi-quantitative des particules fines dans l'air intérieur (car les HAP et les suies se trouvent dans les fractions submicroniques de l'aérosol).

Table 1  
Indoor and outdoor pollutant concentrations at high and low traffic density homes<sup>d</sup>

	High traffic homes				Low traffic homes				Median difference <sup>a</sup>
	Mean	Median	Min	Max	Mean	Median	Min	Max	
<i>Outdoor</i>									
PM10 (µg m <sup>-3</sup> )	43	41	22	68	36	31	12	68	5 <sup>c</sup>
PM2.5 (µg m <sup>-3</sup> )	25	21	12	50	21	15	10	54	3 <sup>c</sup>
Absorption coefficient PM10 (m <sup>-1</sup> × 10 <sup>-5</sup> )	2.99	2.96	1.86	4.88	1.63	1.63	0.66	2.75	1.40 <sup>c</sup>
Absorption coefficient PM2.5 (m <sup>-1</sup> × 10 <sup>-5</sup> )	2.78	2.80	1.72	4.85	1.53	1.57	0.53	2.72	1.29 <sup>c</sup>
BaP (ng m <sup>-3</sup> )	0.82	0.67	0.25	2.31	0.35	0.29	0.12	0.84	0.35 <sup>c</sup>
SumPAH (ppt)	0.38	0.33	0.14	0.93	0.17	0.15	0.07	0.37	0.18 <sup>c</sup>
Benzene (µg m <sup>-3</sup> )	5.7	5.2	2.8	10.6	3.0	3.1	1.6	4.9	2.3 <sup>c</sup>
SumVOC (ppb)	11.8	10.8	5.5	22.5	6.1	6.0	3.1	10.2	4.7 <sup>c</sup>
<i>Indoor</i>									
PM10 (µg m <sup>-3</sup> )	37	28	16	87	22	21	9	33	5 <sup>c</sup>
PM2.5 (µg m <sup>-3</sup> )	27	18	10	78	12	12	4	23	6 <sup>c</sup>
Absorption coefficient PM10 (m <sup>-1</sup> × 10 <sup>-5</sup> )	2.21	2.27	1.11	3.36	1.18	1.26	0.45	1.81	1.09 <sup>c</sup>
Absorption coefficient PM2.5 (m <sup>-1</sup> × 10 <sup>-5</sup> )	2.08	2.12	1.33	3.11	1.11	1.09	0.40	1.82	1.02 <sup>c</sup>
BaP (ng m <sup>-3</sup> )	0.49	0.38	0.15	1.12	0.17	0.16	0.03	0.39	0.24 <sup>c</sup>
SumPAH (ppt)	0.22	0.17	0.09	0.47	0.10	0.09	0.02	0.19	0.10 <sup>c</sup>
Benzene (µg m <sup>-3</sup> )	7.7	7.3	2.2	18.8	5.7	6.3	1.5	10.5	0.45
SumVOC (ppb)	14.0	15.7	4.5	19.9	9.6	8.7	2.1	17.5	4.1 <sup>b</sup>

<sup>a</sup>Median of the *N* daily differences (ratios); this median is not necessarily the same as the difference between medians in this table. Sum PAH = sum of concentrations of all six non-volatile PAHs (Methods). Sum VOC = sum of all eight VOCs (Methods).

<sup>b</sup> = *p* < 0.05 (signed rank test).

<sup>c</sup> = *p* < 0.01 (signed rank test).

<sup>d</sup>*N* = number of days with at least one measurements at both a high and low traffic density location (maximum possible 19 days).

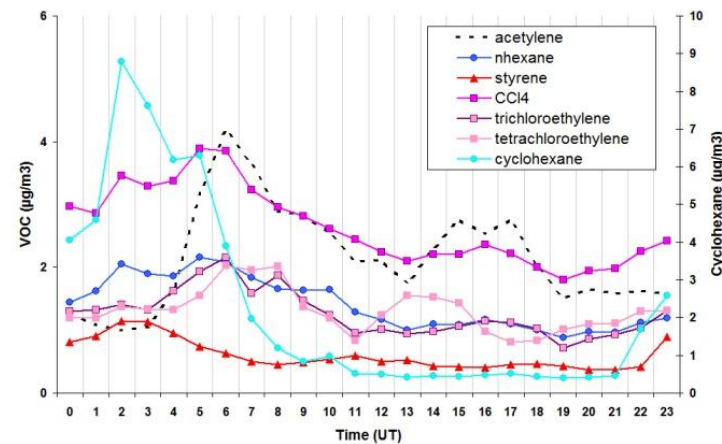
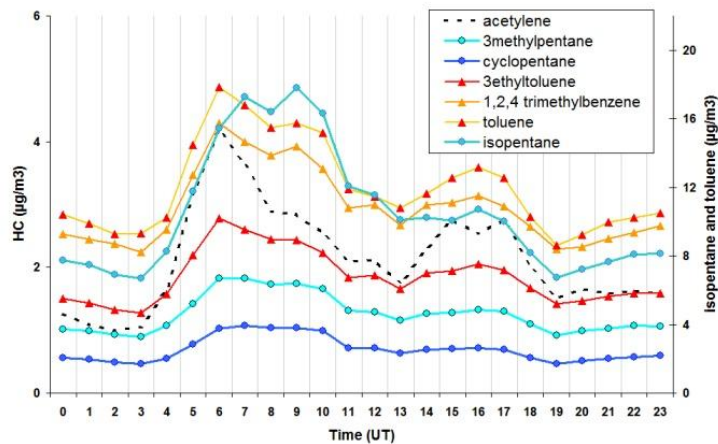
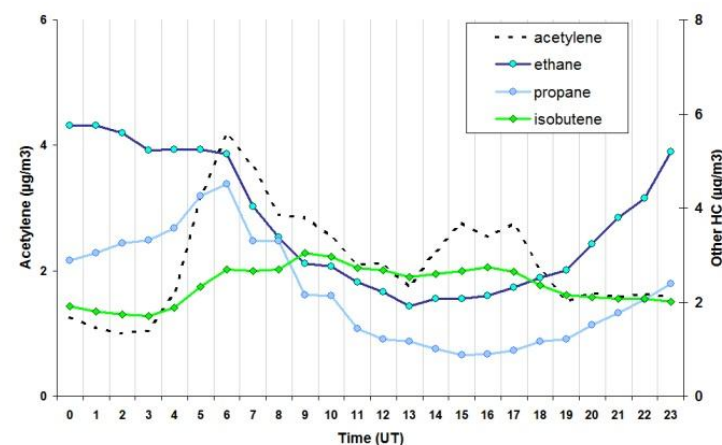
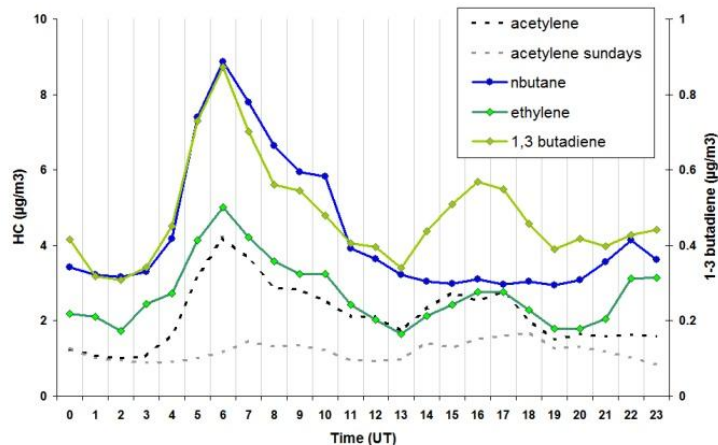
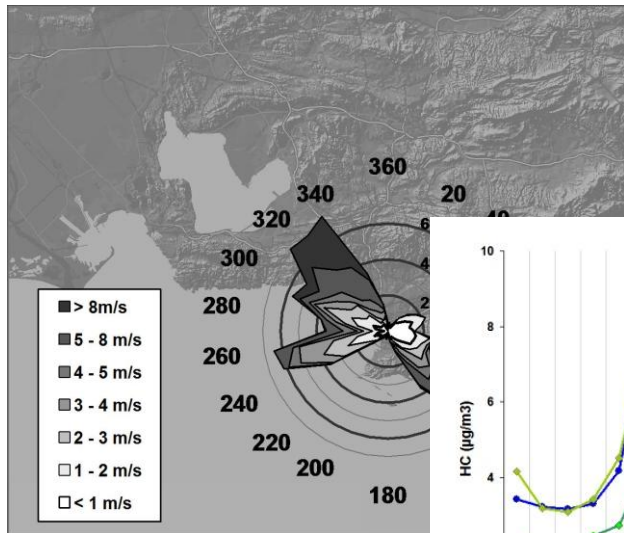
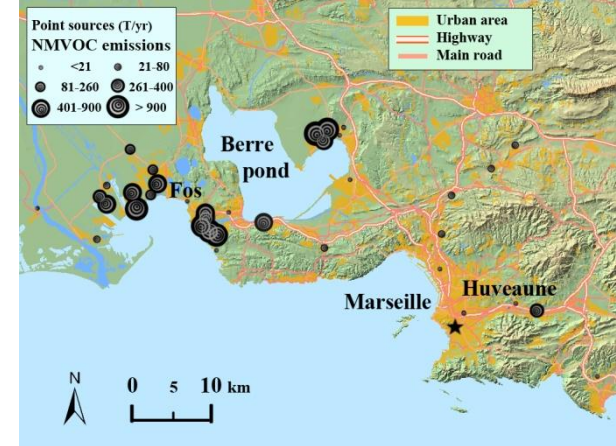
13-3722

(Lebret et al., 2000)  
(Fischer et al., 2000)



# Atelier sur la pollution industrielle

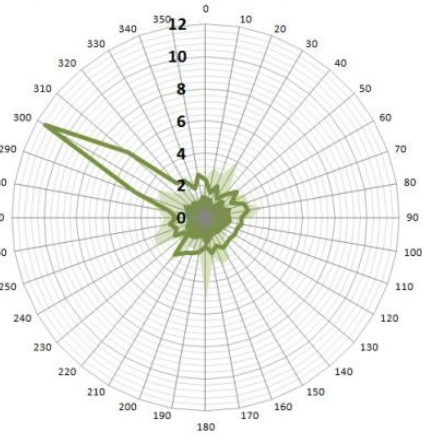
- La pollution non routière en ville



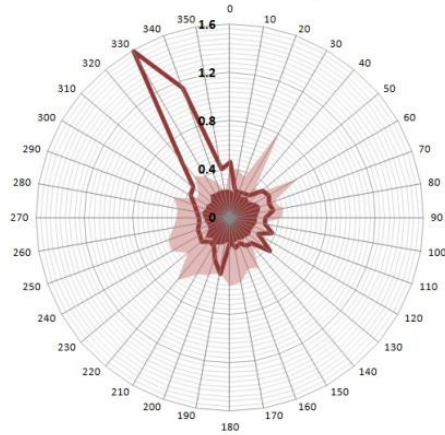
# Atelier sur la pollution industrielle

- La pollution non routière en ville

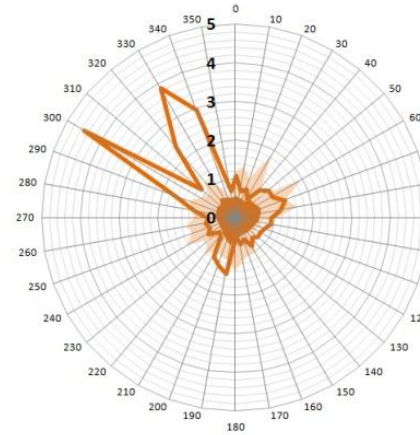
a) n-PENTANE  
P50\_Conc P50\_Ratio P95\_Ratio



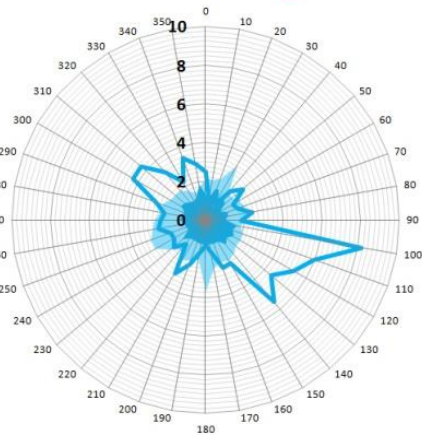
b) 1,3 BUTADIENE  
P50\_Conc P50\_Ratio P95\_Ratio



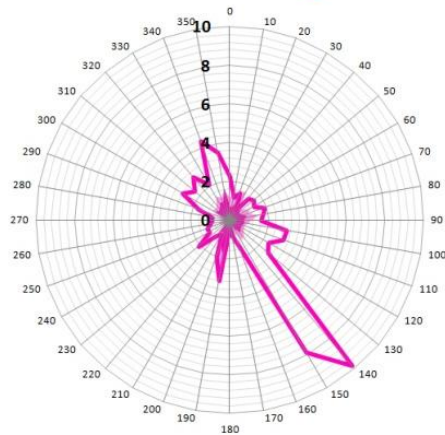
c) PROPENE  
P50\_Conc P50\_Ratio P95\_Ratio



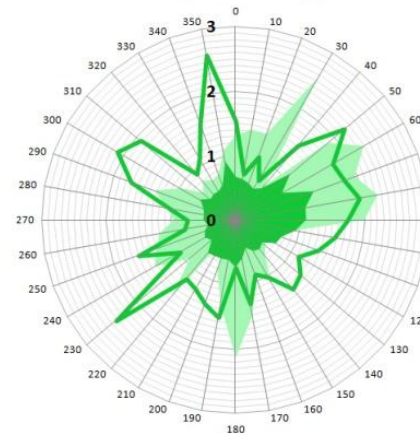
g) ISOBUTENE  
P50\_Conc P50\_Ratio P95\_Ratio



h) TETRACHLOROETHYLENE  
P50\_Conc P50\_Ratio P95\_Ratio



i) TRICHLOROETHYLENE  
P50\_Conc P50\_Ratio P95\_Ratio



j) 3-ETHYLTOLUENE  
P50\_Conc P50\_Ratio P95\_Ratio

