



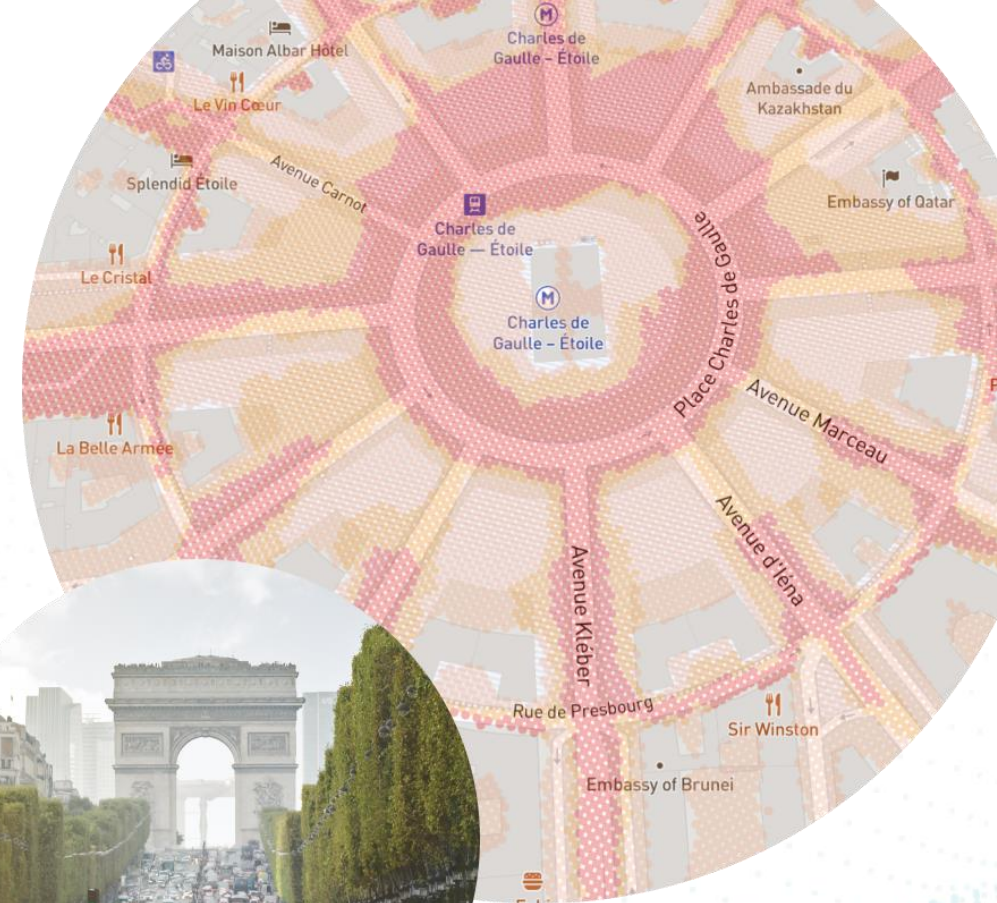
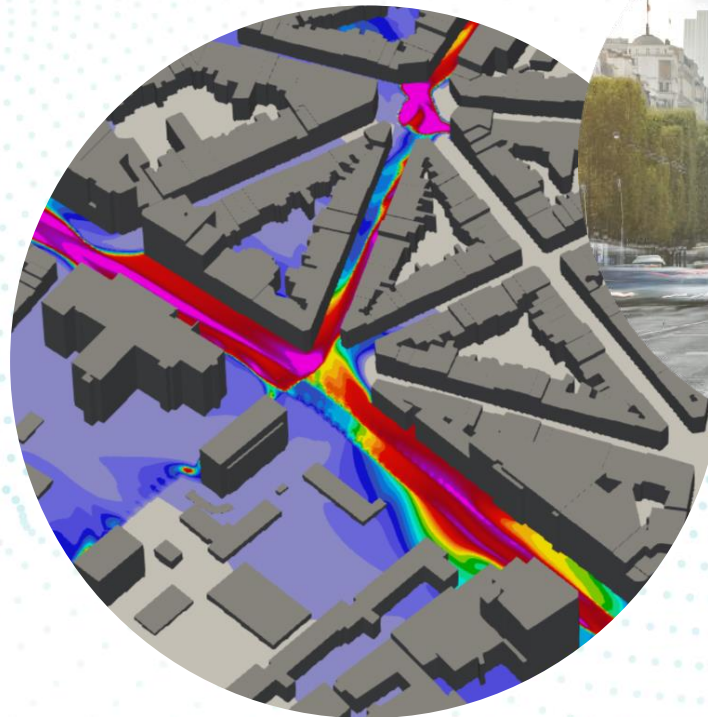
Pollution atmosphérique en milieu urbain

Novembre 2024

Dr.-Ing. Nicolas Reiminger

nreiminger@air-d.fr

www.reiminger.fr



2014 – 2017 : ENGEES (Promotion Paris), voie Hydraulique Urbaine



2017 – 2020 : Doctorat à l'Université de Strasbourg, spécialité Mécanique des fluides



Depuis 2020 : Chef de projets modélisations numériques



Depuis 2021 : Enseignant vacataires (Pollution atmosphérique et Intelligence artificielle pour l'environnement)



Depuis 2022 : Chercheur associé



Depuis 2022 : Membre du groupe de travail « modélisation micro-échelle » du forum FAIRMODE



European
Environment
Agency



European
Commission

JOINT RESEARCH CENTRE

Appréhender et comprendre **la problématique** de la qualité de l'air en milieu urbain

Connaître **les principaux polluants atmosphériques** d'intérêt en milieu urbain, leurs caractéristiques et leur réglementation

Connaître **les principaux facteurs** influençant la qualité de l'air en ville, l'évolution de ceux-ci dans le temps et les **mesures prises** pour améliorer la qualité de l'air

Savoir comment **étudier la qualité de l'air** en zone urbaine, et connaître les avantages et inconvénients des différentes méthodes

Pollution atmosphérique : **Passé, présent, futur**

Notions de **physique et chimie de l'atmosphère** et de ses polluants

La pollution de l'air à l'échelle locale : **Exemple du Grand Est et de l'EMS**

Améliorer la qualité de l'air : exemples d'actions et mesures

Etudier la qualité de l'air

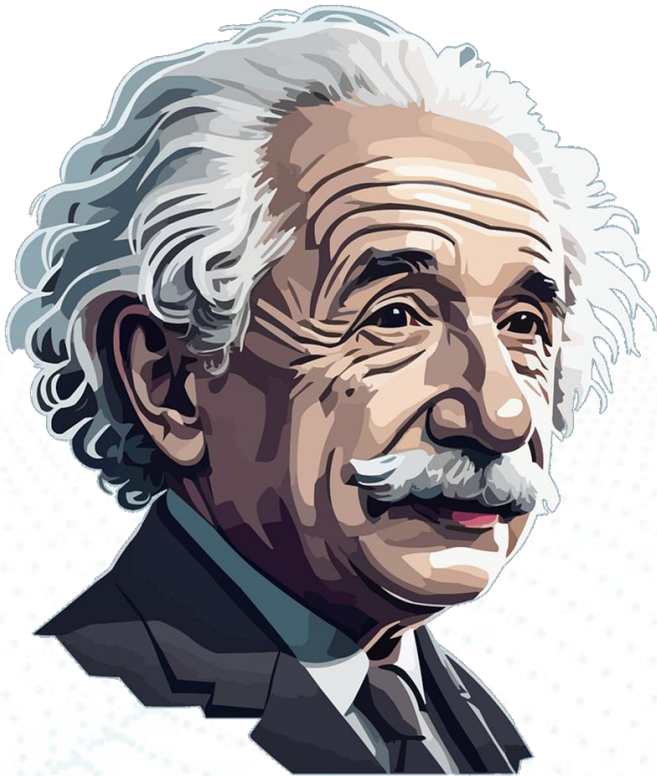
Exemple d'étude de la qualité de l'air

R&D : Optimiser la qualité de l'air



CITATION CÉLÈBRE

A decorative graphic consisting of two horizontal lines (one teal, one grey) and one vertical line (teal) intersecting at the right end of the teal horizontal line.



« Le véritable signe de l'intelligence, ce n'est pas la connaissance, mais l'imagination. »

Dr. Albert Einstein

POLLUTION ATMOSPHÉRIQUE :

PASSÉ, PRÉSENT ET FUTUR

QU'EST CE QU'UN POLLUANT ?

Un polluant est un altéragène biologique, physique ou chimique, qui au-delà d'un certain seuil, et parfois dans certaines conditions (potentialisation), développe des impacts négatifs sur tout ou partie d'un écosystème ou de l'environnement en général.

Ceci revient à définir le polluant comme un contaminant d'un ou plusieurs compartiments des écosystèmes (air, eau, sol) et/ou d'un organisme (qui peut être l'être humain) ou ayant une incidence sur l'écosystème, au-delà d'un seuil ou norme.

D'après le Dictionnaire du vocabulaire normalisé de l'Environnement de l'AFNOR en France



Polluant biologique



Polluant physique



Polluant chimique

LA POLLUTION ATMOSPHÉRIQUE, UN PROBLÈME MILLÉNAIRE

Traces de noircissements des poumons retrouvées sur des corps en Egypte, au Pérou et en Angleterre durant les premières civilisations.

En 400 av. J.-C., Hippocrate mentionna l'importance de la qualité de l'air et de l'eau dans son traité intitulé « Airs, Waters, Places ».

Au XIII^e siècle, le roi Edward I^{er} menaça les Londoniens qui brulaient le charbon de mer afin de préserver la qualité de l'air.

La problématique devint d'autant plus grande avec la révolution industrielle qui entraîna une production plus importante de polluants avec les industries et les usines.

Le grand smog de Londres qui eut lieu entre le 5 et 9 décembre 1952 est un des derniers exemples d'événement majeur de pollution de l'air d'avant le XXI^e siècle. Il entraîna la mort de près de 4 000 personnes.

Mosley, S. Environmental history of air pollution and protection. In Environmental History. Springer International Publishing, 2014, pp. 143–169.



Le grand smog de Londres (<https://www.theverge.com/>)

QUELQUES ACTUALITÉS



Smog indo-pakistanaï : Octobre/novembre 2024

Multan, Pakistan : [PM_{2,5}] = 947 µg/m³



LES CHIFFRES AUJOURD'HUI

Dans le monde¹

En 2016, approximativement 8 millions de décès prématurés des suites à une exposition à la pollution de l'air (7,6 % de tous les décès).

En particulier, 4,2 millions causés par une mauvaise qualité de l'air extérieur et 3,8 par une mauvaise qualité de l'air intérieur.

En Europe²

Approximativement 500 000 décès prématurés, dont 85% liés aux PM_{2,5}, 14% aux NO₂ et 3% à l'O₃.

En France³

Approximativement 48 000 décès prématurés liés uniquement à une exposition aux PM_{2,5}.

Autres chiffres

En 2018, 50 % de la population mondiale vit en zone urbaine (76 % en Europe), et atteindra 68 % en 2050 d'après les prévisions⁴.

9 personnes sur 10 vivent dans des lieux où les concentrations en polluants de l'air excèdent les niveaux acceptables¹.

L'espérance de vie peut baisser de 15 mois en moyenne jusqu'à 30 ans en milieu urbain contre environ 9 mois en moyenne en milieu rural³.

¹ : d'après l'Organisation mondiale de la santé

² : d'après l'Agence européenne pour la santé

³ : d'après Santé publique France

⁴ : d'après l'Organisation des nations unies

LA RÉGLEMENTATION FACE À CETTE PROBLÉMATIQUE

En Europe

Directive 2008/50/CE du Parlement européen et du Conseil du 21 mai 2008 concernant la qualité de l'air ambiant et un air pur pour l'Europe

→ Transposée en France par le décret n° 2010-1250 du 21 octobre 2010 relatif à la qualité de l'air

Dans le monde

Rapport OMS 2005 : « Lignes directrices OMS relatives à la qualité de l'air : particules, ozone, dioxyde d'azote et dioxyde de soufre »

Révision OMS 2017 : « Évolution des valeurs guides de l'OMS sur la qualité de l'air : le passé, le présent et l'avenir »

Directive 2008/50/CE	NO2	PM10	PM2,5
Valeur limite (moyenne annuelle)	40 µg/m ³	40 µg/m ³	25 µg/m ³
Valeur limite (moyenne journalière)	-	50 µg/m ³ (ne pas dépasser plus de 35 fois par an)	-
Valeur limite (moyenne horaire)	200 µg/m ³ (ne pas dépasser plus de 18 fois par an)	-	-
Objectif de qualité (en moyenne annuelle)	40 µg/m ³	30 µg/m ³	10 µg/m ³

Réglementaire

Conseil

OMS	NO2	PM10	PM2,5
Moyenne annuelle	40 µg/m ³	20 µg/m ³	10 µg/m ³
Moyenne journalière	-	50 µg/m ³ (maximum 3 jours par an)	25 µg/m ³ (maximum 3 jours par an)
Moyenne horaire	200 µg/m ³	-	-

EVOLUTION DES VALEURS OMS

Avant 2021	NO2	PM10	PM2,5
Moyenne annuelle	40 µg/m ³	20 µg/m ³	10 µg/m ³
Moyenne journalière	-	50 µg/m ³ (maximum 3 jours par an)	25 µg/m ³ (maximum 3 jours par an)
Moyenne horaire	200 µg/m ³	-	-

Mise à jour en 2021

Après 2021	NO2	PM10	PM2,5
Moyenne annuelle	10 µg/m ³	15 µg/m ³	5 µg/m ³
Moyenne journalière	25 µg/m ³	45 µg/m ³ (maximum 3 jours par an)	15 µg/m ³ (maximum 3 jours par an)

World Health Organization. (2021). WHO global air quality guidelines: particulate matter (PM2.5 and PM10), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide.

World Health Organization.

<https://apps.who.int/iris/handle/10665/345329>.

Licence: CC BY-NC-SA 3.0 IGO

OBJECTIFS INTERMÉDIAIRES OMS

Avant 2021	NO ₂	PM ₁₀	PM _{2,5}
Moyenne annuelle	40 µg/m ³	20 µg/m ³	10 µg/m ³
Moyenne journalière	-	50 µg/m ³ (maximum 3 jours par an)	25 µg/m ³ (maximum 3 jours par an)
Moyenne horaire	200 µg/m ³	-	-

Après 2021	NO ₂	PM ₁₀	PM _{2,5}
Moyenne annuelle	10 µg/m ³	15 µg/m ³	5 µg/m ³
Moyenne journalière	25 µg/m ³	45 µg/m ³ (maximum 3 jours par an)	15 µg/m ³ (maximum 3 jours par an)

Pollutant	Averaging time	Interim target				AQG level
		1	2	3	4	
PM _{2,5} , µg/m ³	Annual	35	25	15	10	5
	24-hour ^a	75	50	37.5	25	15
PM ₁₀ , µg/m ³	Annual	70	50	30	20	15
	24-hour ^a	150	100	75	50	45
O ₃ , µg/m ³	Peak season ^b	100	70	-	-	60
	8-hour ^a	160	120	-	-	100
NO ₂ , µg/m ³	Annual	40	30	20	-	10
	24-hour ^a	120	50	-	-	25
SO ₂ , µg/m ³	24-hour ^a	125	50	-	-	40
CO, mg/m ³	24-hour ^a	7	-	-	-	4

^a 99th percentile (i.e. 3–4 exceedance days per year).

^b Average of daily maximum 8-hour mean O₃ concentration in the six consecutive months with the highest six-month running-average O₃ concentration.

World Health Organization. (2021). WHO global air quality guidelines: particulate matter (PM_{2.5} and PM₁₀), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide.

OBJECTIFS INTERMÉDIAIRES OMS, EXPLICATIONS

Table 3.1. Recommended annual AQG level and interim targets for PM_{2.5}

Recommendation	PM _{2.5} (µg/m ³)
Interim target 1	35
Interim target 2	25
Interim target 3	15
Interim target 4	10
AQG level	5

If mortality in a population exposed to PM_{2.5} at the AQG level is arbitrarily set to 100, then it will be 124, 116, 108 and 104, respectively, in populations exposed to PM_{2.5} at interim target 1, 2, 3 and 4 levels. These projections are based on the linear HR of 1.08 per 10-µg/m³ increase in PM_{2.5} for all non-accidental mortality reported in the systematic review. At higher concentrations, the CRF may no longer be linear, which would change the numbers in this example.

World Health Organization. (2021). WHO global air quality guidelines: particulate matter (PM2.5 and PM10), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide.

Exemple de la valeur cible 1

[PM2,5] : 5 µg/m³ → 35 µg/m³

Mortalité : 100 → 124

+ 24%

EVOLUTION DES VALEURS UE

Les nouvelles normes de qualité de l'air pour la protection de la santé humaine
fixées par la nouvelle directive révisant la directive 2008/50/CE et comparaison avec les valeurs guides de l'OMS (2021)

Polluant	Périodicité	Type de norme	Norme en vigueur		Norme révisée adoptée pour 2030	Dépassements autorisés	Valeurs guides de l'OMS (2021)
PM _{2,5}	Annuelle	Valeur limite	25 µg/m ³	↘	10 µg/m ³	-	5 µg/m ³
	24h	Valeur limite	<i>pas de norme</i>	↓	25 µg/m ³	18 fois/an	15 µg/m ³
PM ₁₀	Annuelle	Valeur limite	40 µg/m ³	↘	20 µg/m ³	-	15 µg/m ³
	24h	Valeur limite	50 µg/m ³	↘	45 µg/m ³	18 fois/an	45 µg/m ³
O ₃	Moy. jour. max. sur 8h	Valeur cible	120 µg/m ³	→	120 µg/m ³	18 j/an (moy. sur 3 ans)	100 µg/m ³
	Moy. jour. max. sur 8h	Objectif à long terme	120 µg/m ³	↘	100 µg/m ³ **	3 j./an	
NO ₂	Annuelle	Valeur limite	40 µg/m ³	↘	20 µg/m ³	-	10 µg/m ³
	24h	Valeur limite	<i>pas de norme</i>	↓	50 µg/m ³	18 fois/an	25 µg/m ³
	1h	Valeur limite	200 µg/m ³	→	200 µg/m ³	3 fois/an	-
SO ₂	Annuelle	Valeur limite	<i>pas de norme</i>	↓	20 µg/m ³	-	-
	24h	Valeur limite	125 µg/m ³	↘	50 µg/m ³	18 fois/an	40 µg/m ³
	1h	Valeur limite	350 µg/m ³	→	350 µg/m ³	3 fois/an	-
CO	24h	Valeur limite	<i>pas de norme</i>	↓	4 µg/m ³	18 fois/an	4 µg/m ³
	Moy. jour. max. sur 8h	Valeur limite	10 µg/m ³	→	10 µg/m ³	-	-
Benzène	Annuelle	Valeur limite	5 µg/m ³	↘	3,4 µg/m ³	-	-
Plomb	Annuelle	Valeur limite	0,5 µg/m ³ *	→	0,5 µg/m ³	-	-
Arsenic	Annuelle	Valeur limite	6 ng/m ³ *	→	6 ng/m ³	-	-
Cadmium	Annuelle	Valeur limite	5 ng/m ³ *	→	5 ng/m ³	-	-
Nickel	Annuelle	Valeur limite	20 ng/m ³ *	→	20 ng/m ³	-	-
BaP	Annuelle	Valeur limite	1 ng/m ³ *	→	1 ng/m ³	-	-

https://www.citepa.org/fr/2024_04_a04/

ET EN FRANCE ?

AASQA : Autorité Agréée de Surveillance de la Qualité de l'Air

Le réseau ATMO ...

Leurs missions

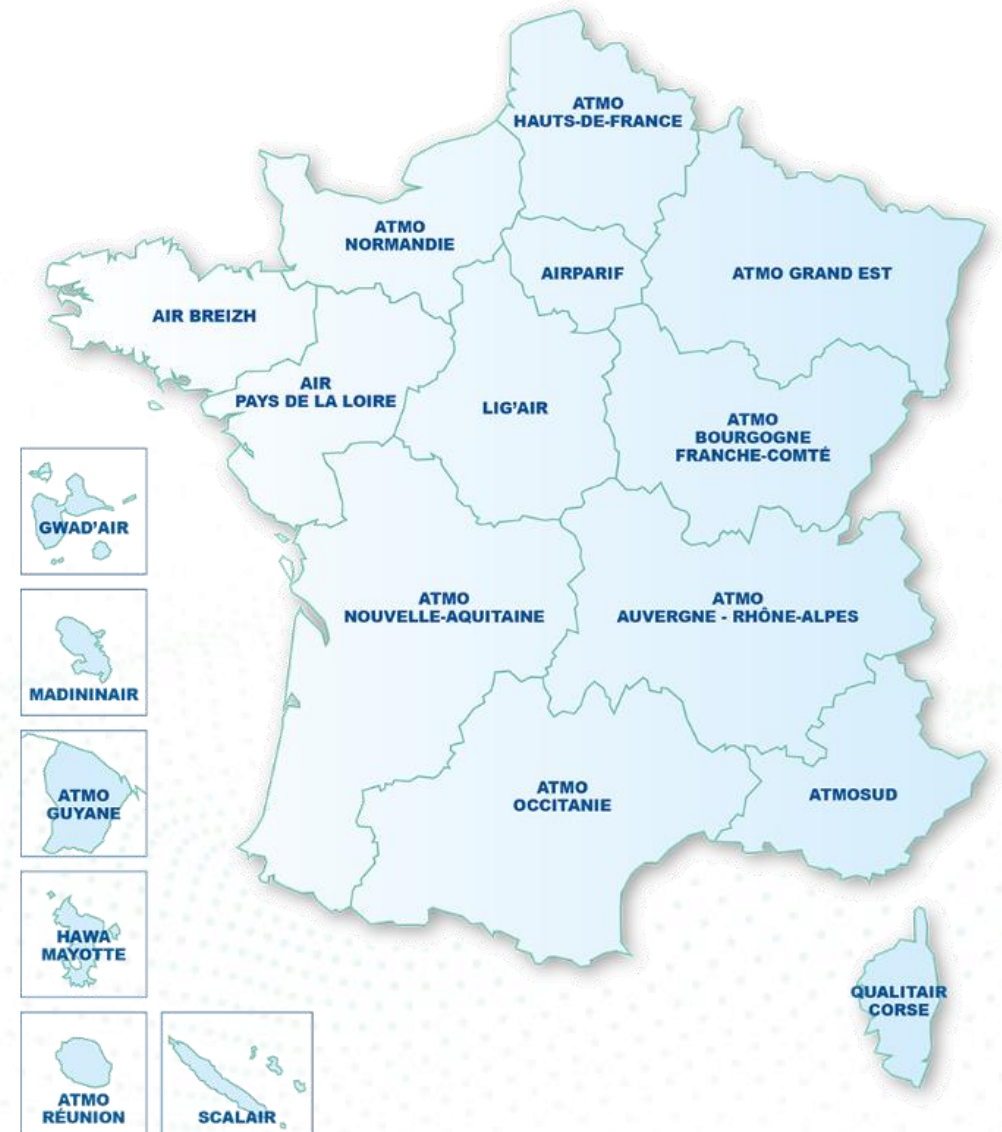
Assurer la **surveillance** réglementaire de la qualité de l'air (mesures, modélisations, inventaires)

Informer, alerter et prévenir les citoyens/médias/autorités

Sensibiliser les citoyens

Accompagner les différents acteurs (collectivités, associations, etc.)

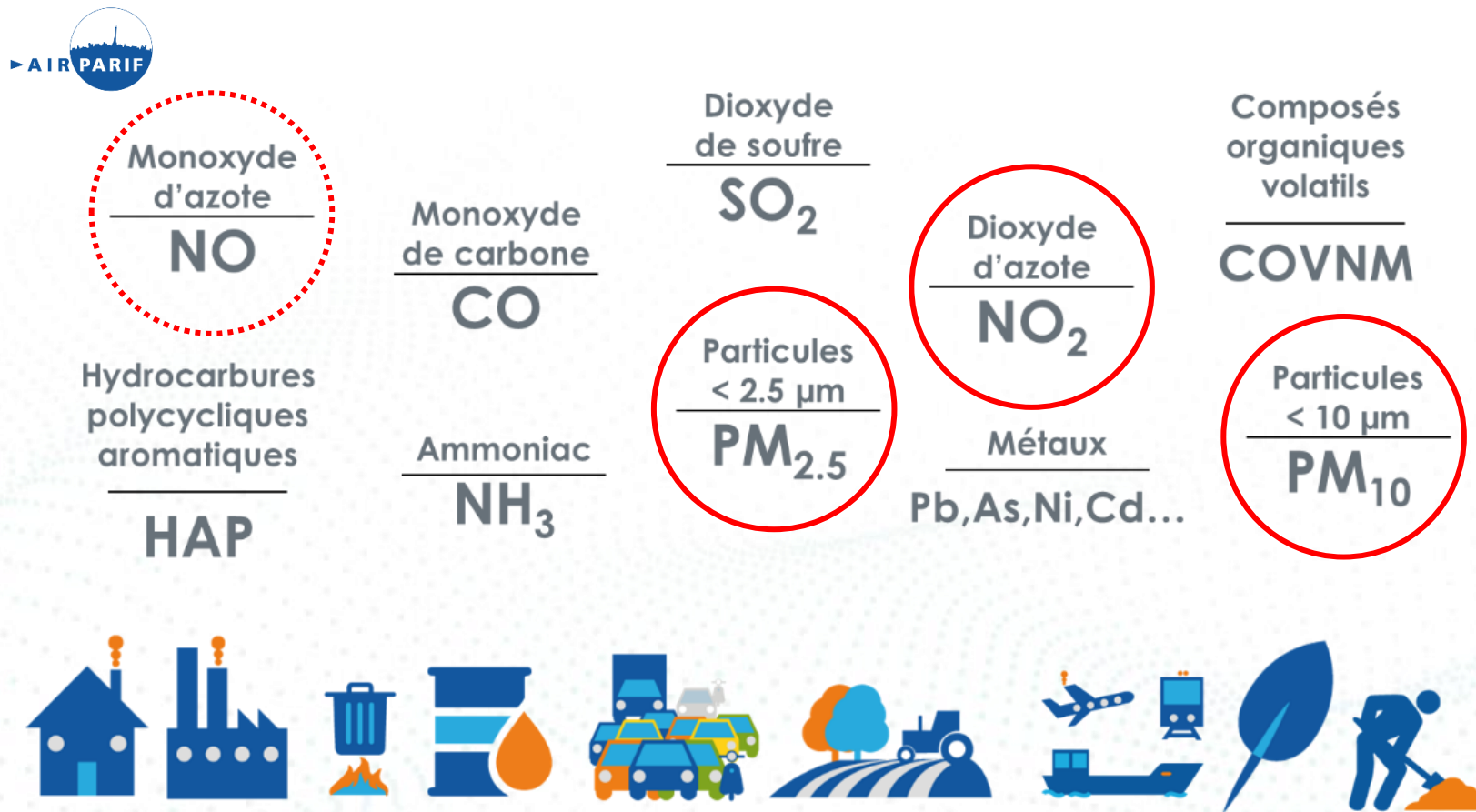
Participer à l'élaboration des PPA (Plans de Protection de l'Atmosphère)



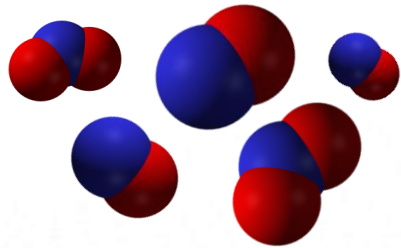
**NOTIONS DE PHYSIQUE
ET CHIMIE DE L'ATMOSPHERE
ET DE SES POLLUANTS**

A decorative graphic consisting of a horizontal teal line and a vertical grey line that intersect to form a crosshair shape on the right side of the slide.

UNE PROBLÉMATIQUE COMPLEXE LIÉE À DE NOMBREUSES SOURCES



FOCUS SUR LES OXYDES D'AZOTE : PRÉSENTATION GLOBALE

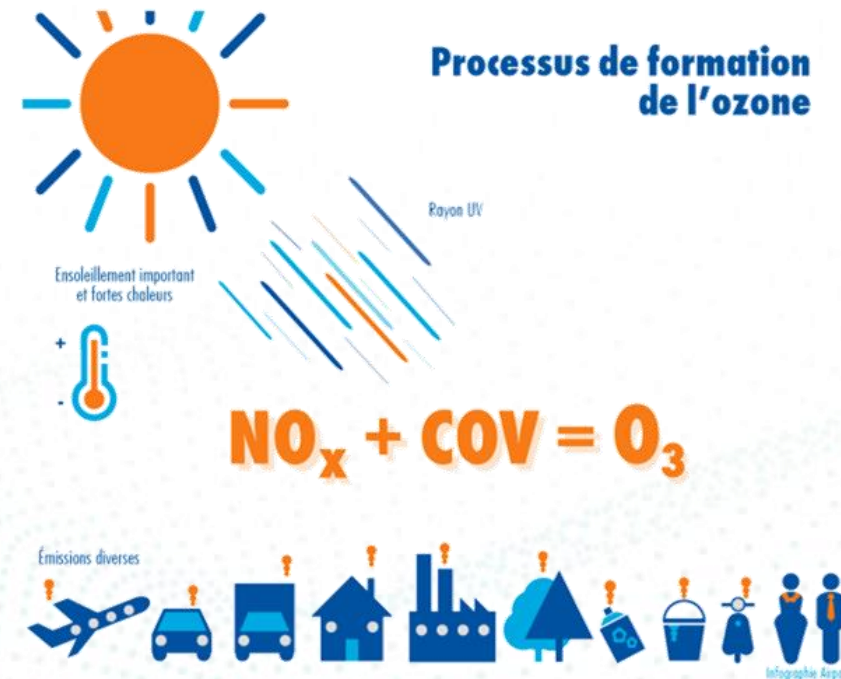


Les oxydes d'azote impliqués dans les mécanismes de pollution comprennent **majoritairement** le monoxyde d'azote (**NO**) et le dioxyde d'azote (**NO₂**).

En partie responsable des **pluies acides** (formation d'acide nitrique dans les nuages) et entraînant des **troubles respiratoires** aux êtres vivants.

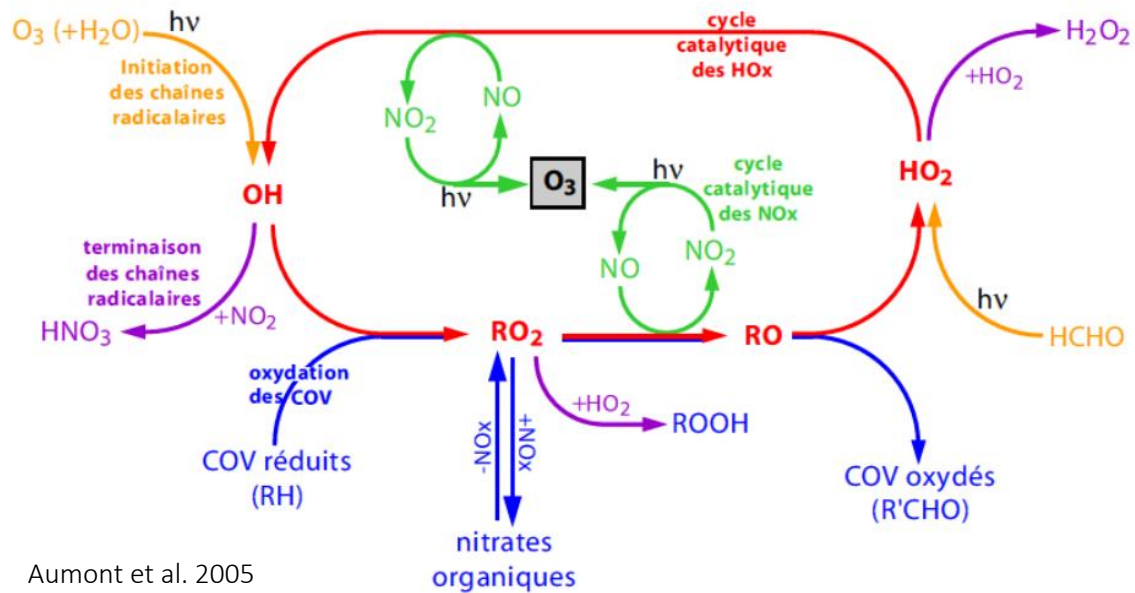
Le principal secteur émetteur est les **transports routier**, suivi du secteur résidentiel et tertiaire puis de l'industrie.

Les oxydes d'azote sont également dépendants des conditions météorologiques et de l'ensoleillement.

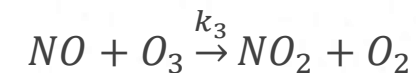
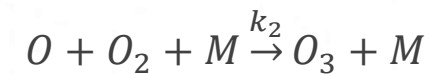
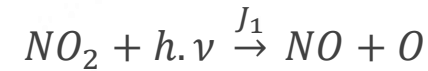


LA CHIMIE DES OXYDES D'AZOTE

Une chimie complexe impliquant plus de **300 espèces différentes** dans plus d'une centaine de réactions



Une méthode de calcul simplifiée, basée sur l'équilibre photochimique :



$$[O_3]_{PSS} = \frac{J_1 [NO_2]_{PSS}}{k_3 [NO]_{PSS}}$$

Limites : beaucoup de paramètres sont nécessaires pour calculer J_1 et k_3 (température, angle zénithal solaire...)

$$J_1 = A \cdot e^{(-B \cdot \sec \theta)} \quad k_3 = \frac{15.33}{T} \cdot e^{\frac{-1450}{T}}$$

FOCUS SUR LES PARTICULES FINES (PM)

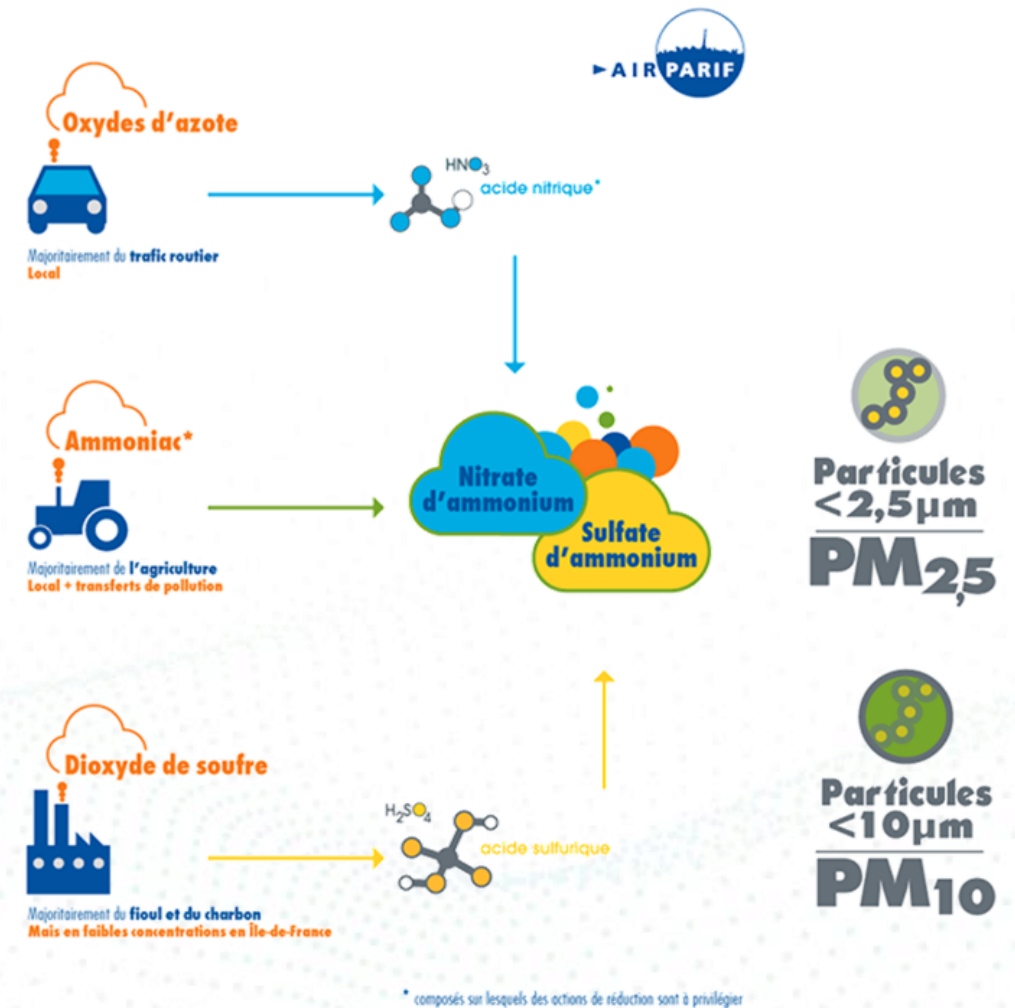
Les particules en suspension **PM10** sont des particules dont le **diamètre est inférieur ou égal à 10 µm**.

Il existe également les PM2,5, PM1, PM0,1, etc...

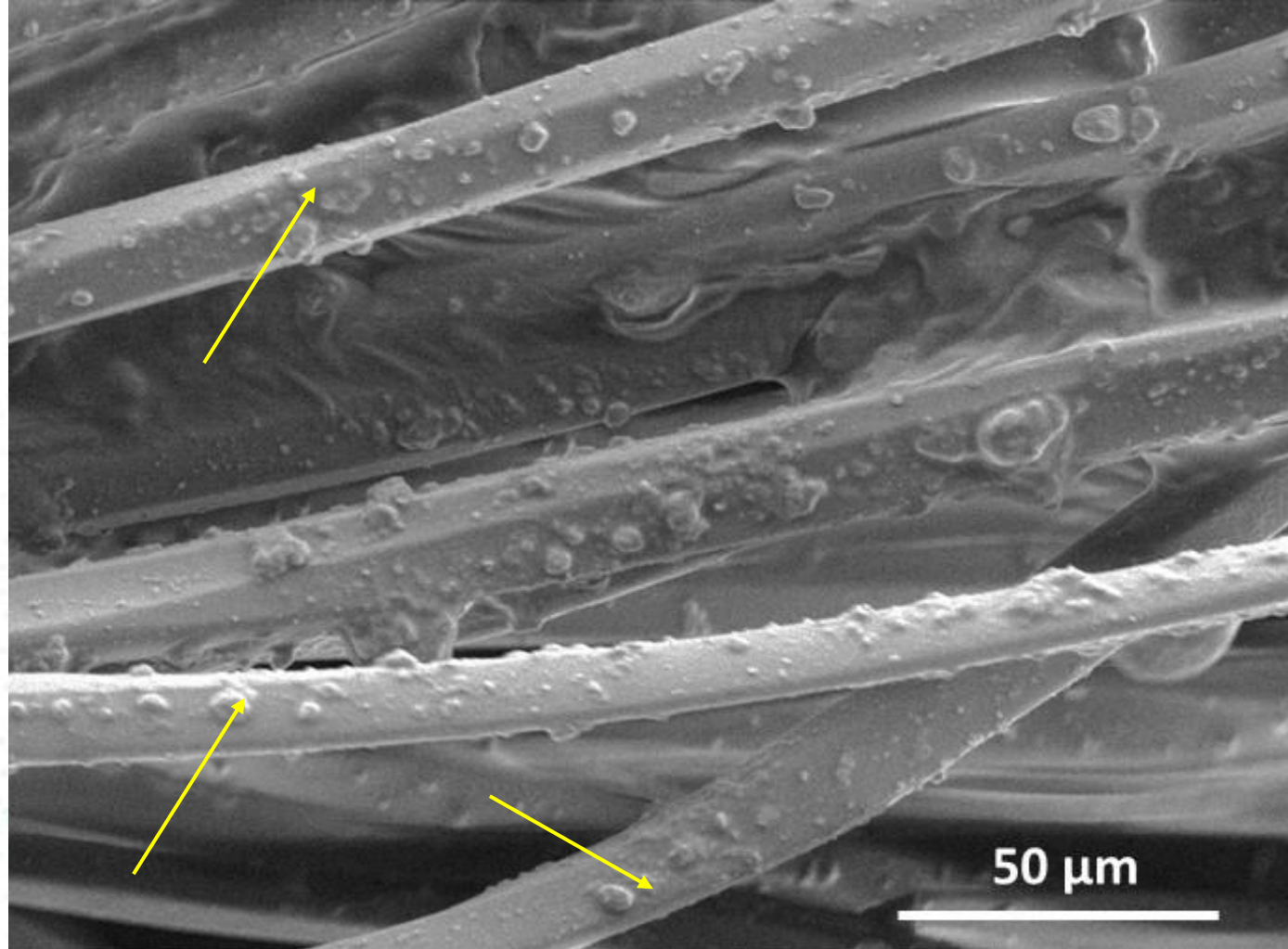
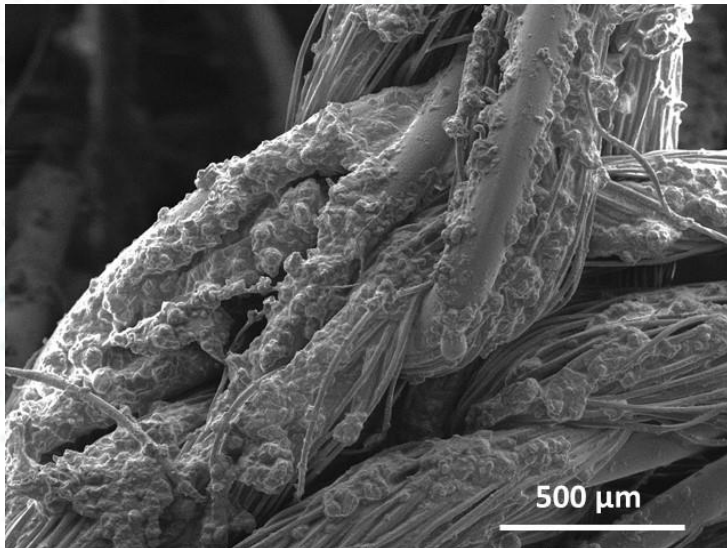
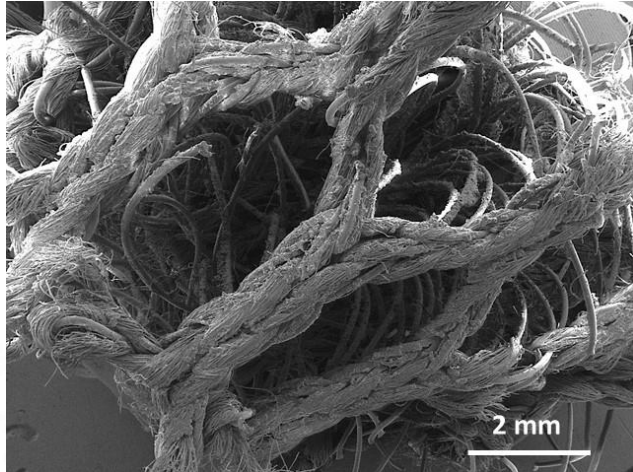
Les particules en suspension sont d'autant plus dangereuses pour les êtres vivants que leur taille est petite (passage dans les poumons, alvéoles pulmonaires, sang...).

Particules primaires : Elles sont émises directement par les secteurs du chauffage résidentiel et tertiaire, du transport routier, de l'industrie et de l'agriculture.

Particules secondaires : Elles peuvent également se former dans l'atmosphère à partir de la combinaison d'ammoniac (d'origine agricole) et d'oxydes d'azote (trafic routier)



LES PARTICULES FINES AU MICROSCOPE ÉLECTRONIQUE À BALAYAGE (MEB)



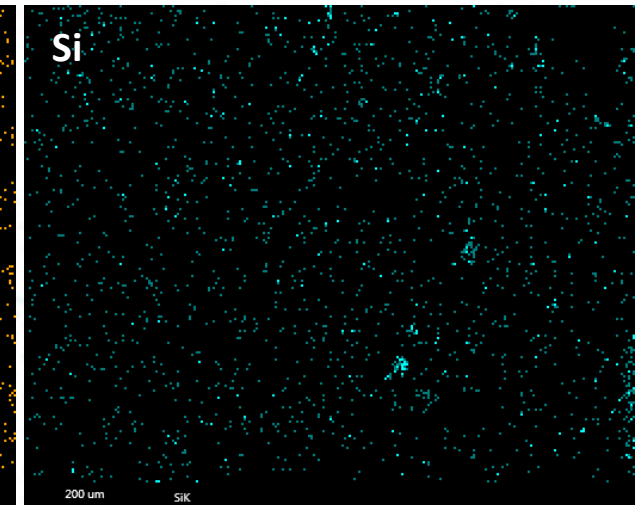
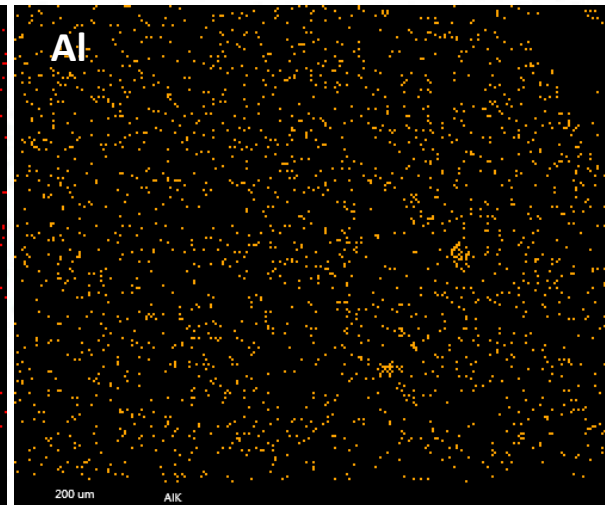
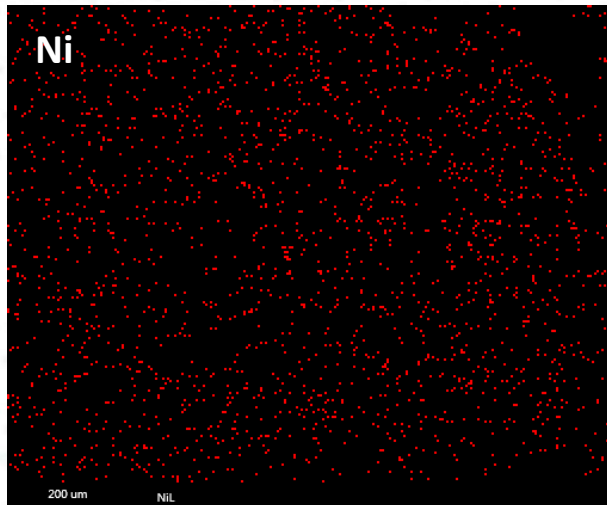
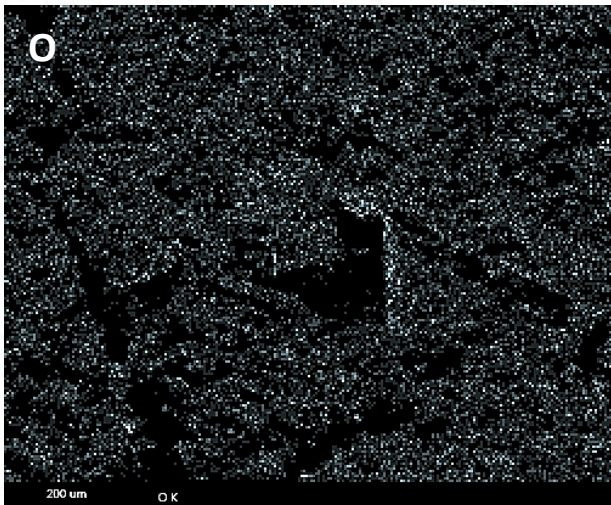
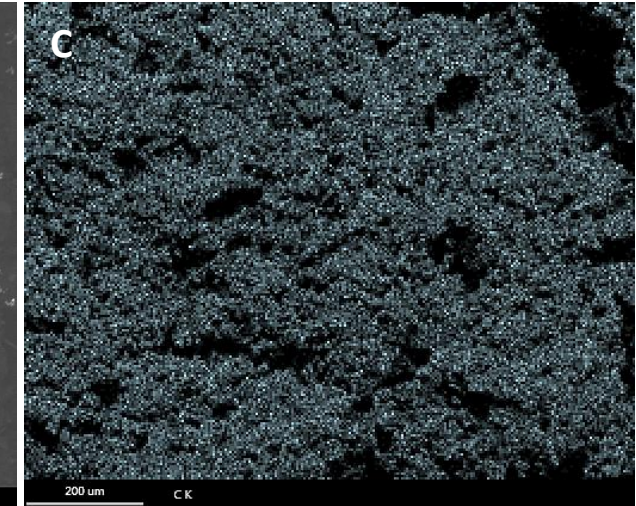
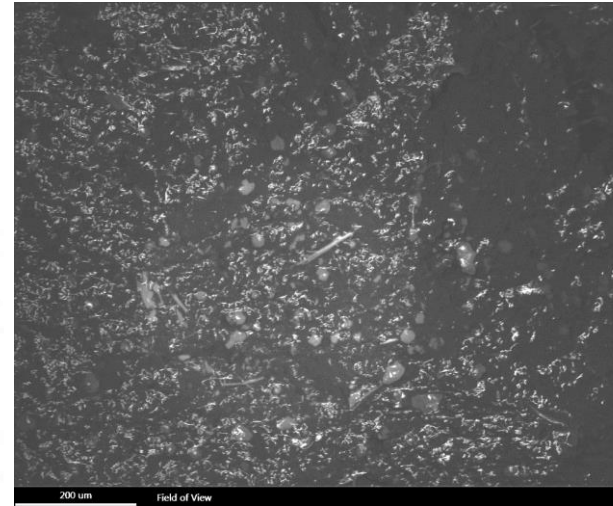
ANALYSE DES COMPOSANTS DES PARTICULES PAR COUPLAGE MEB - EDX

MEB : Microscopie Electronique à Balayage

EDX : Energie Dispersive de rayons X

La microanalyse par EDX permet une analyse des éléments chimiques présents sur un support (C, O, Fe, Ni, etc.) ainsi que leur quantification

Permet de déterminer l'origine des PM



LE TRANSPORT DES POLLUANTS DANS L'AIR

Rappels de mécanique des fluides ...

Les équations de **Navier-Stokes** ... $\nabla \cdot u = 0$ $\frac{\partial u}{\partial t} + u \cdot (\nabla u) = -\frac{1}{\rho} \nabla p + \nu \Delta u$) **Fluide incompressible, absence de transfert thermiques ...**

... appliquées à l'air ... $\rho \frac{D\vec{V}}{Dt} = -\nabla P - \rho \vec{g} + \rho \vec{F}_C + \mu \Delta \vec{V}$

... et la **dispersion des polluants** $\frac{\partial C}{\partial t} + \nabla \cdot (CU) - \nabla \cdot (D\nabla C) = 0$) **Polluant inerte chimiquement, non adsorbé ...**

Equations valables dans des **conditions bien particulières** ...

NOTIONS DE STABILITÉ ATMOSPHÉRIQUE

En fonction du gradient de température potentielle ...

$\partial\theta/\partial z > 0$ Atmosphère stable $Ri > 0$

$\partial\theta/\partial z = 0$ Atmosphère neutre $Ri = 0$

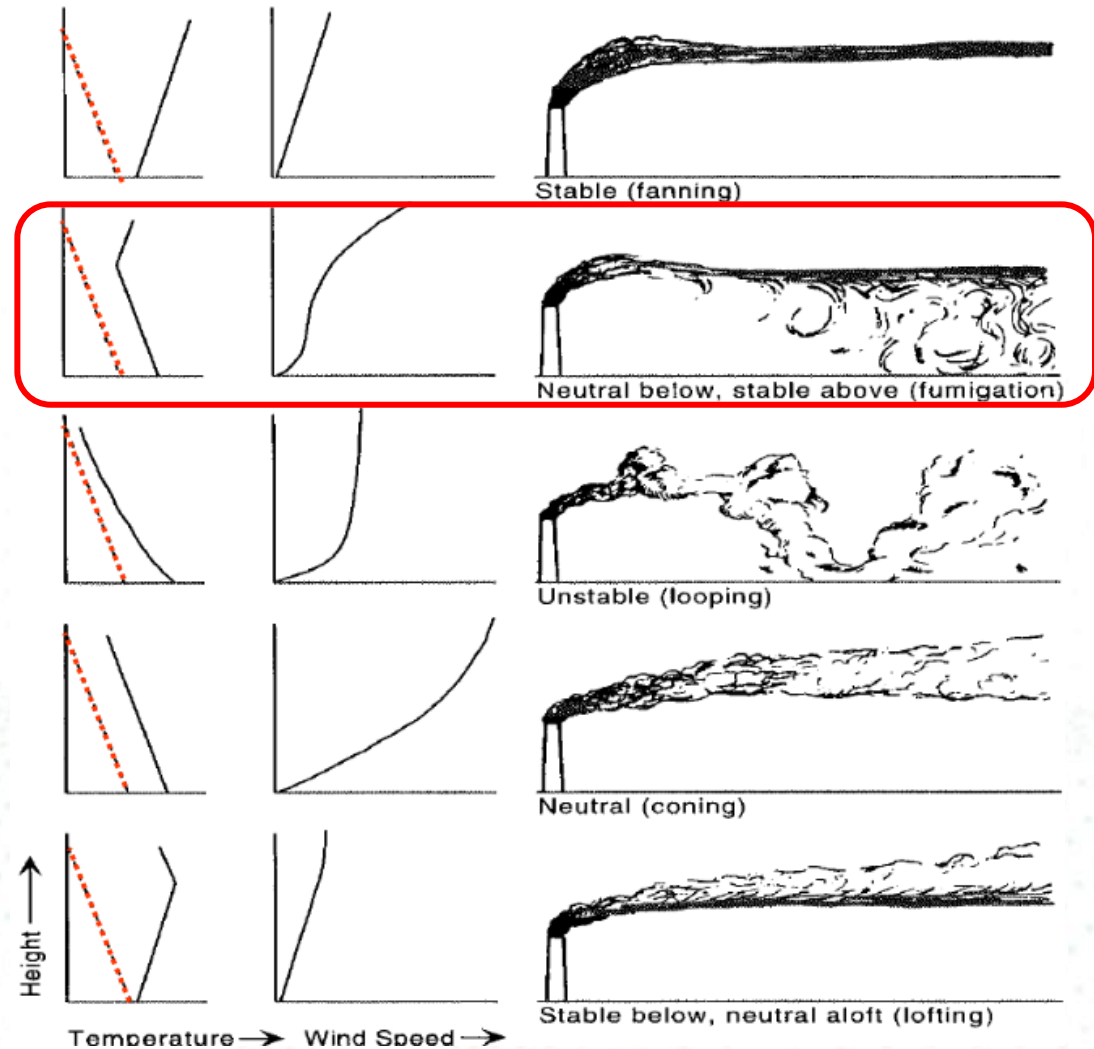
$\partial\theta/\partial z < 0$ Atmosphère instable $Ri < 0$

$$\partial\theta/\partial z > 0 \approx \partial T/\partial z > (\partial T/\partial z)_{ad}$$

... décrit par le nombre de Richardson

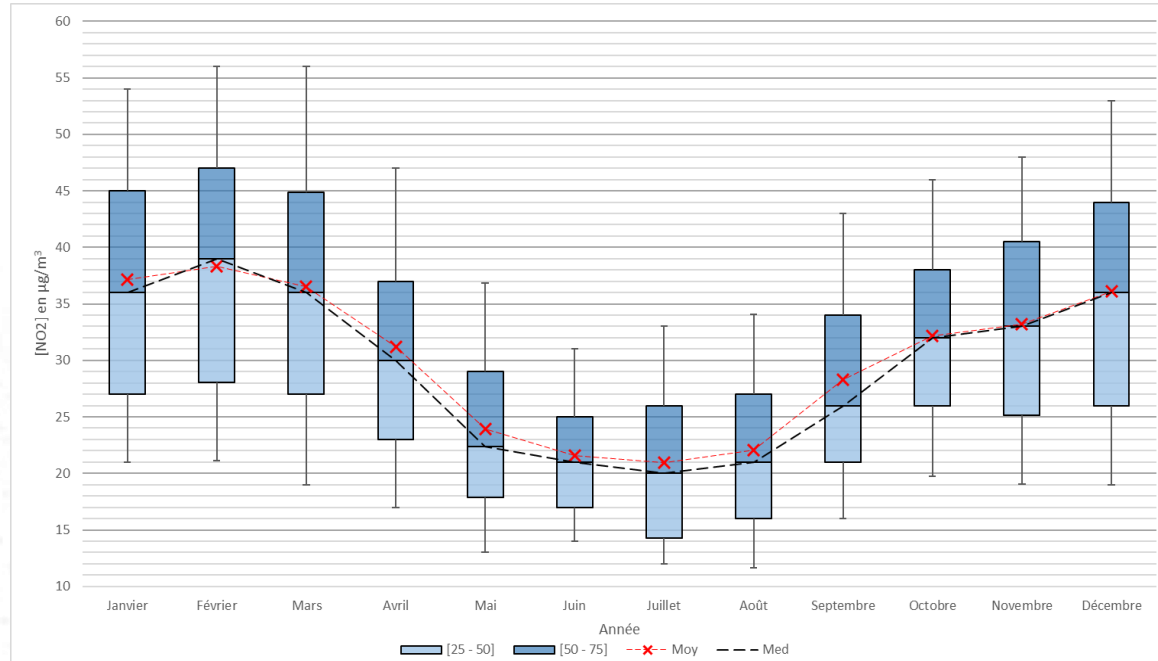
$$Ri = \frac{Gr}{Re^2} = \frac{g\Delta H}{U_H^2} \frac{(T_H - T_g)}{T_{air}}$$

Smog de Londres



NOTIONS DE SAISONNALITÉ

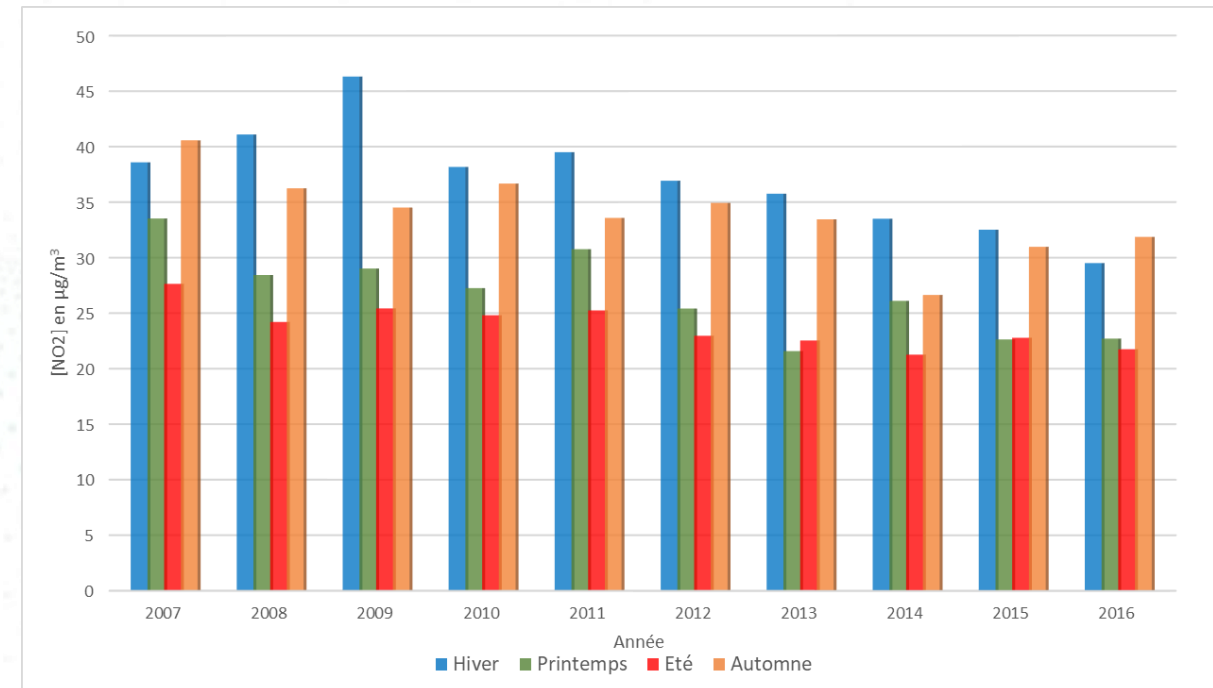
Exemple d'une station de mesure à Strasbourg entre 2007 et 2016



Evolution saisonnière des concentrations en dioxyde d'azote ...

... valable chaque année

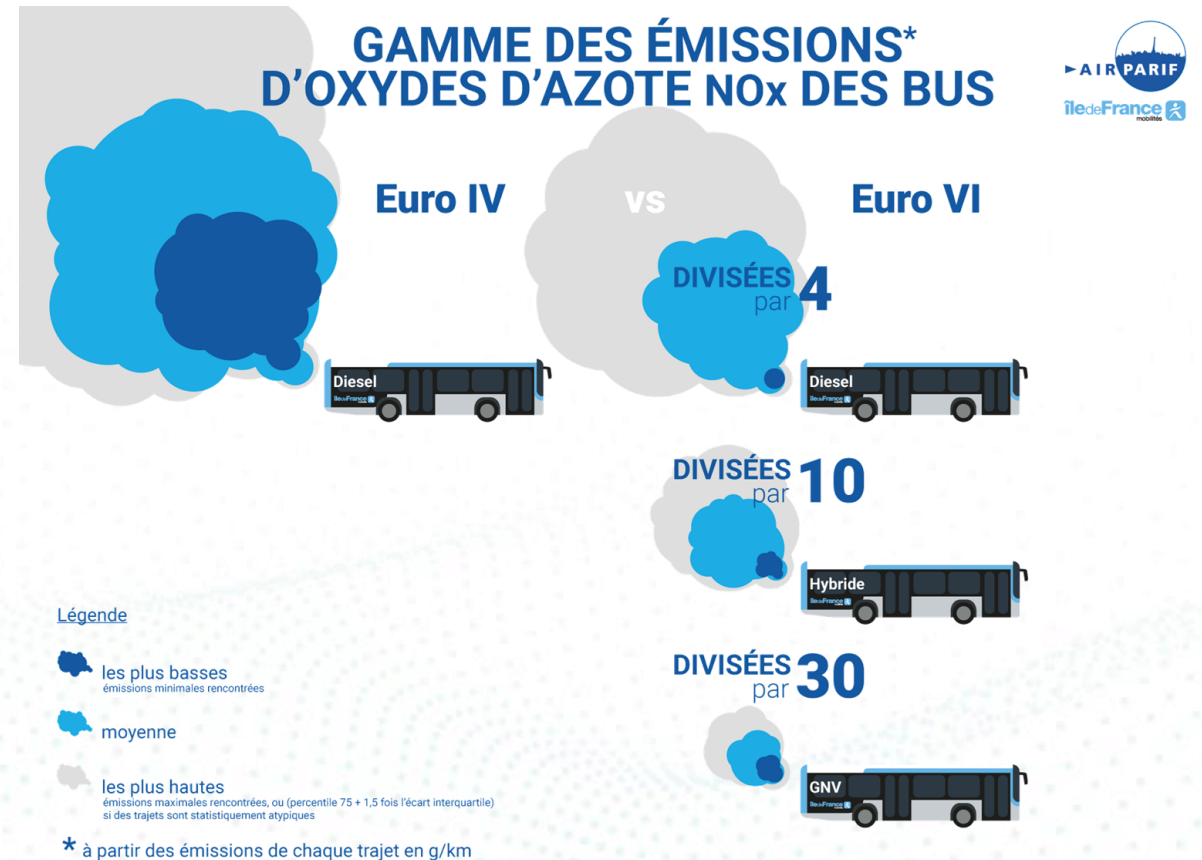
Également valable pour les PM



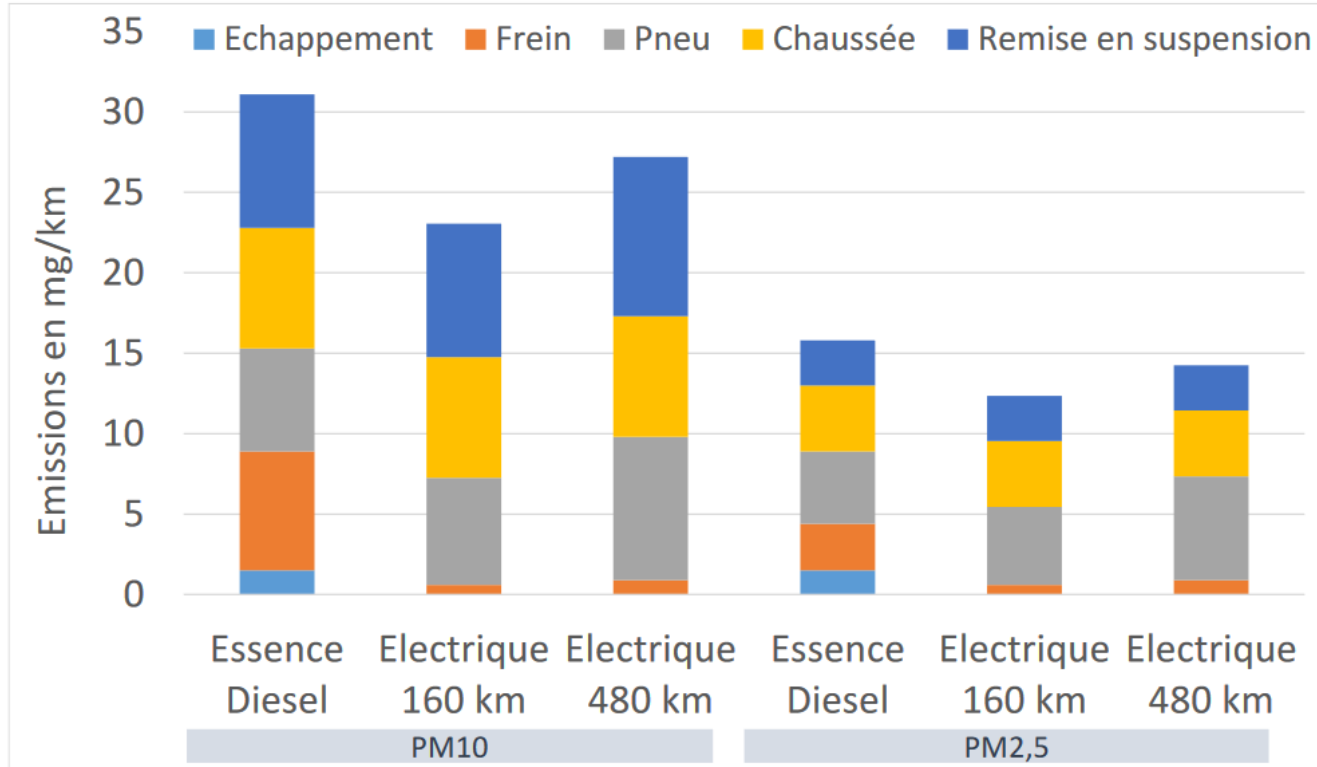
EMISSIONS LIÉES AU TRAFIC : IMPACT DU PARC ROUTIER

Type	Carburant	UNITE	2015	2017
VL	Tout type	Part total	73.12%	73.61%
VL	Diesel	Part VL	64.85%	63.34%
VL	Essence	Part VL	35.15%	36.66%
VUL	Tout type	Part total	16.71%	16.72%
VUL	Diesel	Part VUL	80.65%	81.77%
VUL	Essence	Part VUL	19.35%	18.23%
BUS	Tout type	Part total	0.22%	0.22%
PL	Tout type	Part total	1.96%	1.94%
PL	Diesel	Part PL	99.87%	99.97%
PL	Essence	Part PL	0.13%	0.03%
DR	Tout type	Part total	7.99%	7.51%

Type	Norme	Carburant	Unité	2015	2017
VP	Euro 1 et -	Diesel	#	3%	3%
VP	Euro 2	Diesel	#	7%	4%
VP	Euro 3	Diesel	#	18%	14%
VP	Euro 4	Diesel	#	42%	39%
VP	Euro 5	Diesel	#	29%	31%
VP	Euro 6 et +	Diesel	#	1%	9%



EMISSIONS LIÉES AU TRAFIC : LE CAS PARTICULIER DES PARTICULES



Emissions des Véhicules routiers - Les particules hors échappement, ADEME, 2022

Freinage régénératif : **diminution des émissions** liées aux freins

Emissions en PM et **autonomies** des VE positivement **corrélés**

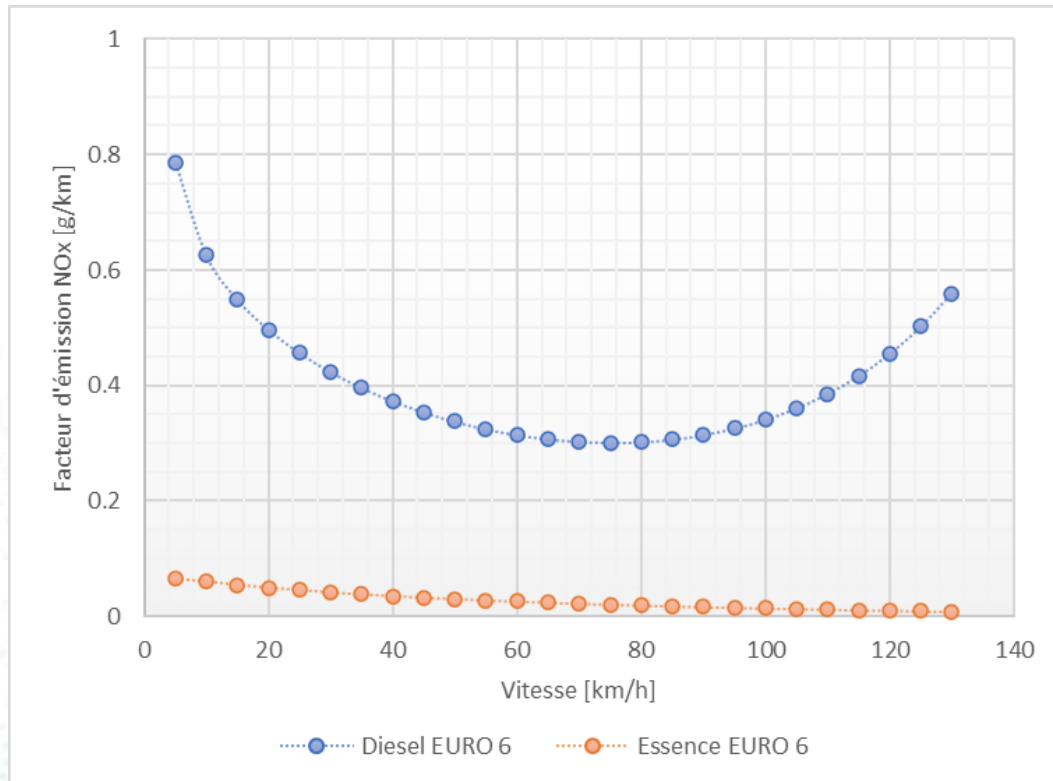
Plus d'émissions pneu/chaussée/remise en suspension : taille des pneus



Véhicule électrique = véhicule propre

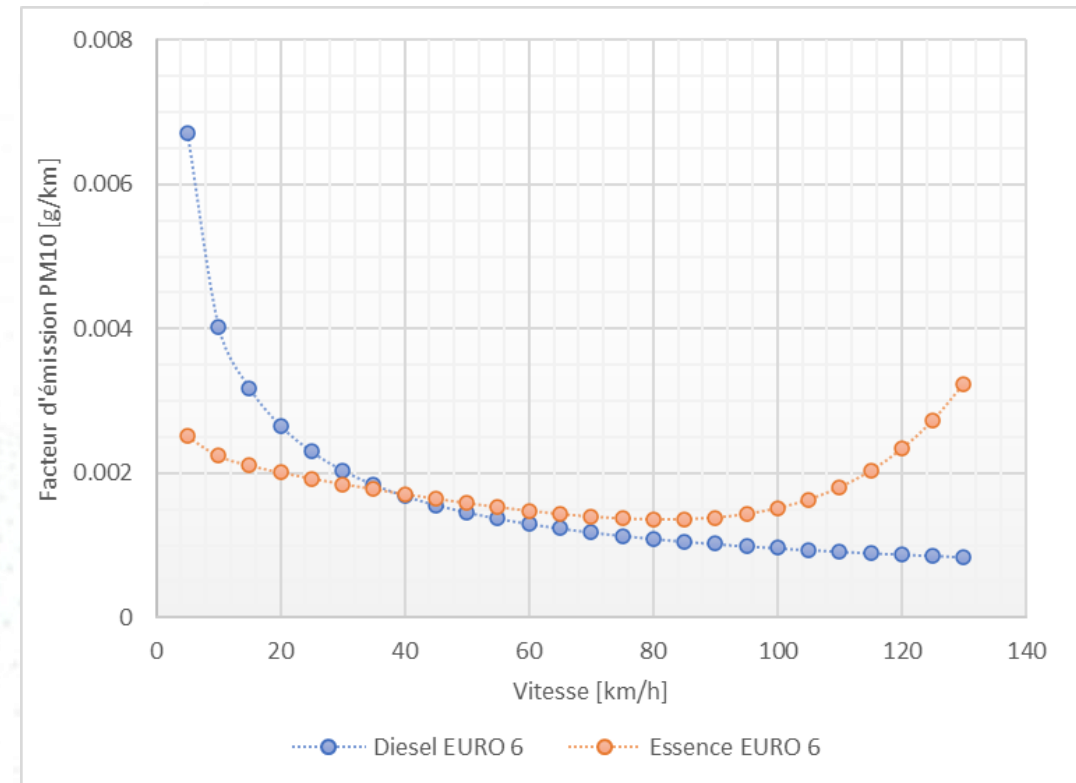
Oui, mais dans une certaine mesure ...

EMISSIONS LIÉES AU TRAFIC : COMPARAISON DES MOTORISATIONS THERMIQUES



Technologie diesel EURO 6 pour les VP plus émissive en NO_x

Technologie diesel EURO 6 pour les VP équivalente à essence pour les particules



**LA POLLUTION DE L'AIR À
L'ÉCHELLE LOCALE :
EXEMPLE DU GRAND EST ET DE L'EMS**

ÉVOLUTION DE LA POLLUTION ATMOSPHÉRIQUE AU COURS DES DERNIÈRES ANNÉES

Exemple d'une station de mesure à Strasbourg entre 2007 et 2016



Baisse globale de la pollution en NO₂

Baisse valable pour les autres polluants également et plus généralement au niveau du territoire Français

LES POLLUANTS DE L'AIR AU NIVEAU DU GRAND EST

ZAS	Seuil réglementaire	Particules PM10	Particules PM2,5	Dioxyde d'azote	Ozone	Dioxyde de soufre	Monoxyde de carbone	Benzène	Benzo(a) pyrène	Plomb	Autres métaux lourds (Arsenic, Cadmium, Nickel)
Zone Agglomération de Metz	Valeur limite	●	●	●	-	●	●	●	-	●	-
	Valeur cible	-	●	-	●	-	-	-	●	-	●
	Objectif de qualité	●	●	●	●	●	-	●	-	●	-
	Ligne directrice OMS	●	●	●	●	●	-	-	-	-	-
	Seuil d'information ⁽¹⁾	●	-	●	●	●	-	-	-	-	-
	Seuil d'alerte ⁽¹⁾	●	-	●	●	●	-	-	-	-	-
Zone Agglomération de Nancy	Valeur limite	●	●	●	-	●	●	●	-	●	-
	Valeur cible	-	●	-	●	-	-	-	●	-	●
	Objectif de qualité	●	●	●	●	●	-	●	-	●	-
	Ligne directrice OMS	●	●	●	●	●	-	-	-	-	-
	Seuil d'information	●	-	●	●	●	-	-	-	-	-
	Seuil d'alerte	●	-	●	●	●	-	-	-	-	-
Zone Agglomération de Strasbourg	Valeur limite	●	●	●	-	●	●	●	-	●	-
	Valeur cible	-	●	-	●	-	-	-	●	-	●
	Objectif de qualité	●	●	●	●	●	-	●	-	●	-
	Ligne directrice OMS	●	●	●	●	●	-	-	-	-	-
	Seuil d'information	●	-	●	●	●	-	-	-	-	-
	Seuil d'alerte	●	-	●	●	●	-	-	-	-	-
Zone à risque de Reims (périmètre : ancien Reims Métropole)	Valeur limite	●	●	●	-	●	●	●	-	●	-
	Valeur cible	-	●	-	●	-	-	-	●	-	●
	Objectif de qualité	●	●	●	●	●	-	●	-	●	-
	Ligne directrice OMS	●	●	●	●	●	-	-	-	-	-
	Seuil d'information	●	-	●	●	●	-	-	-	-	-
	Seuil d'alerte	●	-	●	●	●	-	-	-	-	-
Zone régionale	Valeur limite	●	●	●	-	●	●	●	-	●	-
	Valeur cible	-	●	-	●	-	-	-	●	-	●
	Objectif de qualité	●	●	●	●	●	-	●	-	●	-
	Ligne directrice OMS	●	●	●	●	●	-	-	-	-	-
	Seuil d'information	●	-	●	●	●	-	-	-	-	-
	Seuil d'alerte	●	-	●	●	●	-	-	-	-	-

Principaux polluants dans le Grand Est : NO₂, PM, et O₃

À l'échelle locale : NO₂ et PM

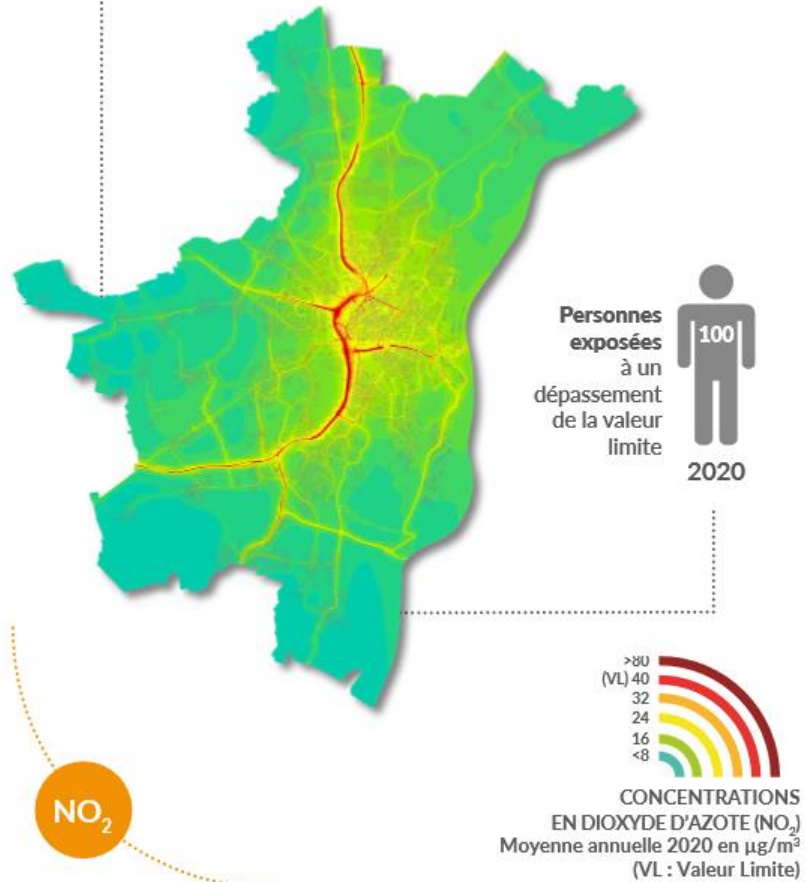
(1) Différent des procédures réglementaires préfectorales d'information-recommandation ou d'alerte, qui sont des pratiques et des actes administratifs pris par l'autorité préfectorale lors d'un épisode de pollution. Ces procédures sont déclenchées sur prévision d'un dépassement des seuils d'information-recommandation et/ou d'alerte, et peuvent l'être sans que ce dépassement soit constaté le lendemain, ou à l'inverse, ne pas l'être alors qu'un dépassement sera constaté le lendemain.

- Respect valeur réglementaire
- Dépassement objectif qualité / valeur cible / seuil d'information / ligne directrice OMS
- Dépassement valeur limite / seuil d'alerte
- Non évalué ou données insuffisantes pour se comparer aux seuils réglementaires.
- Il n'existe pas de valeur réglementaire

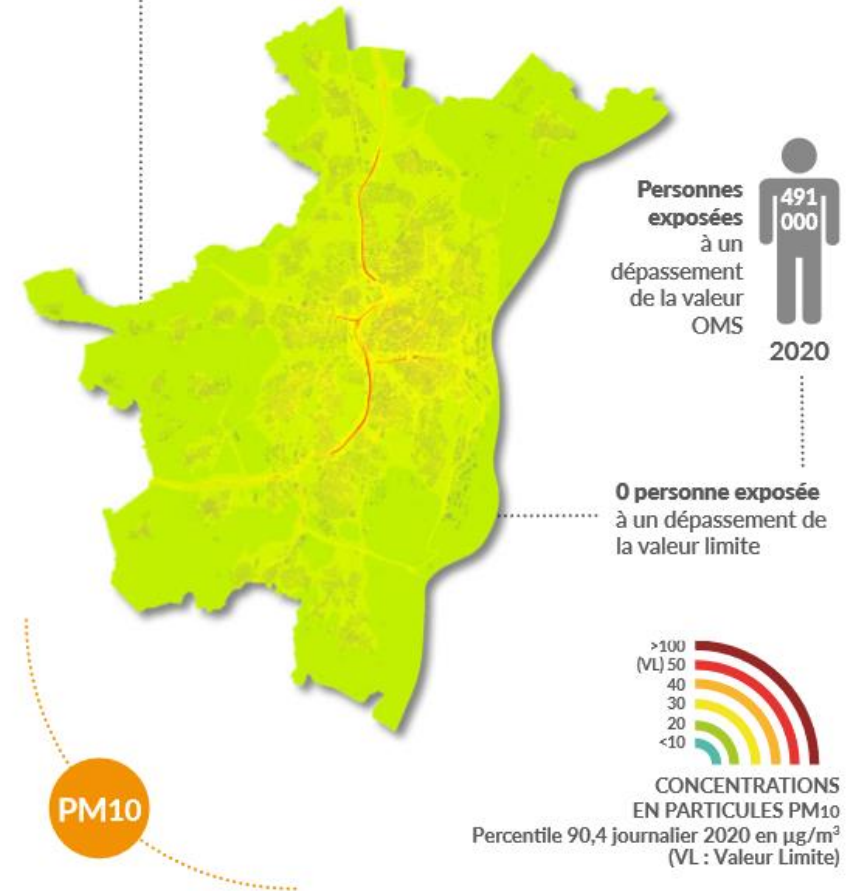
Source : <http://www.atmo-grandest.eu/lair-du-grand-est-en-2018>

QUALITÉ DE L'AIR AU NIVEAU DE L'EUROMÉTROPOLE DE STRASBOURG (BILAN 2020)

Source : ATMO Grand Est / ZAG Strasbourg⁽¹⁾ V2020a_A2020

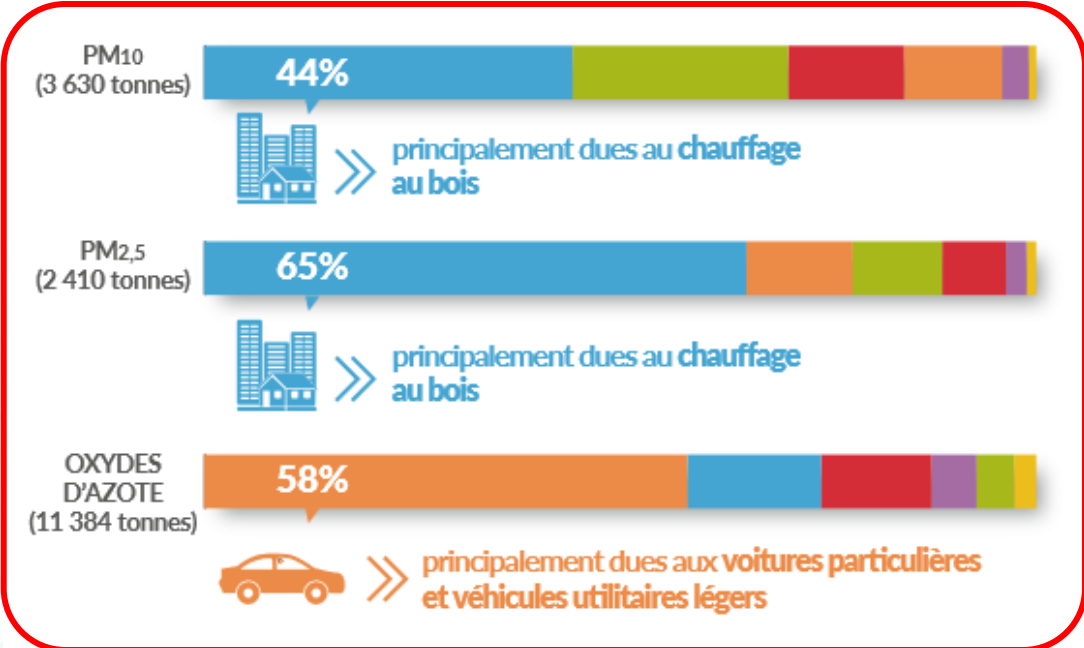


Source : ATMO Grand Est / ZAG Strasbourg⁽¹⁾ V2020a_A2020



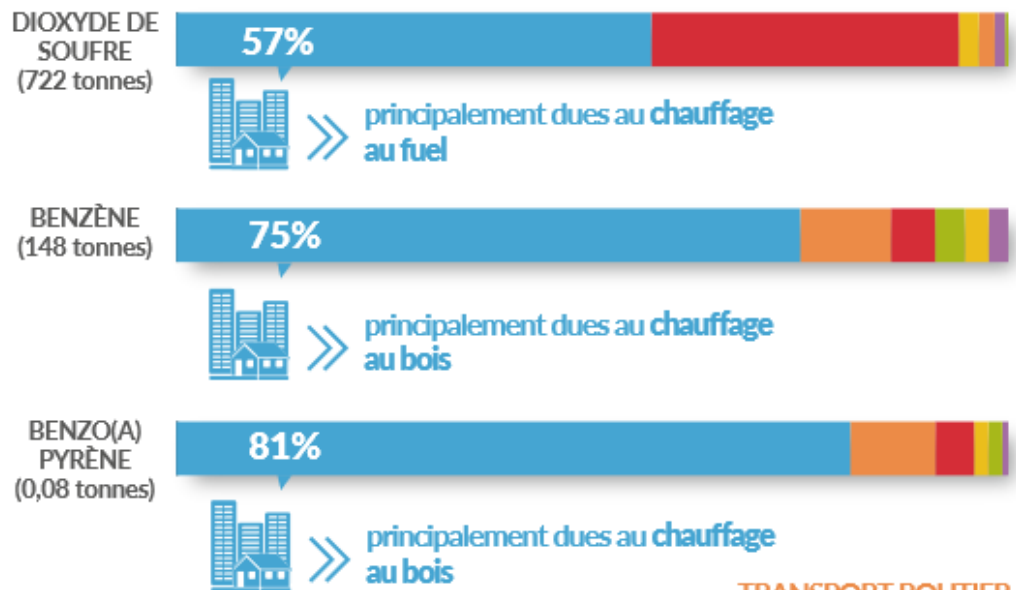
ORIGINE DES ÉMISSIONS AU NIVEAU DE L'EMS (BILAN 2020)

Émissions



Répartition sectorielle des émissions de polluants dans le Bas-Rhin en 2018

Source : ATMO Grand Est / Invent'Air V2020



TRANSPORT ROUTIER
 AUTRES TRANSPORTS
 RÉSIDENTIEL ET TERTIAIRE
 AGRICULTURE
 INDUSTRIE ET DÉCHETS
 BRANCHE ÉNERGIE

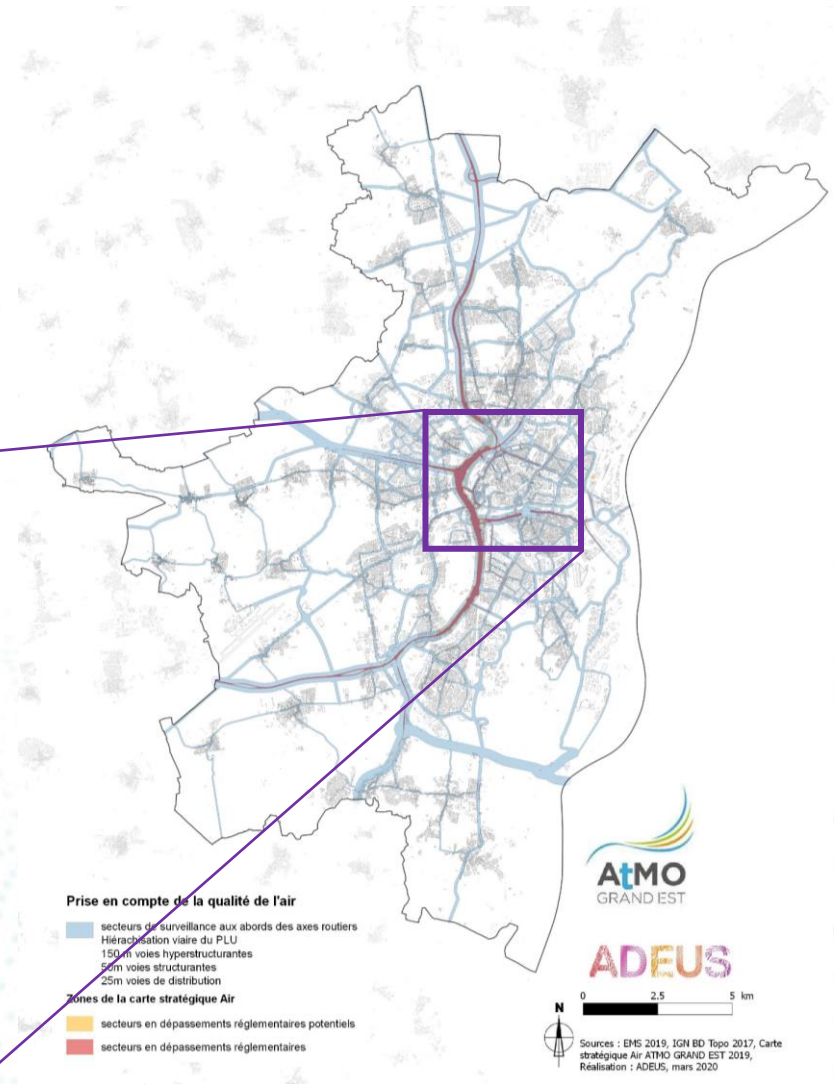
PPA ET DEMANDE ÉMERGENTE D'ÉTUDES DE QUALITÉ DE L'AIR

Le PPA définit les objectifs et les mesures permettant d'amener, à l'intérieur du territoire concerné, les concentrations en polluants atmosphériques à un niveau inférieur aux valeurs limites réglementaires. Il présente entre autres les zones de vigilance où la qualité de l'air doit être prise en compte.

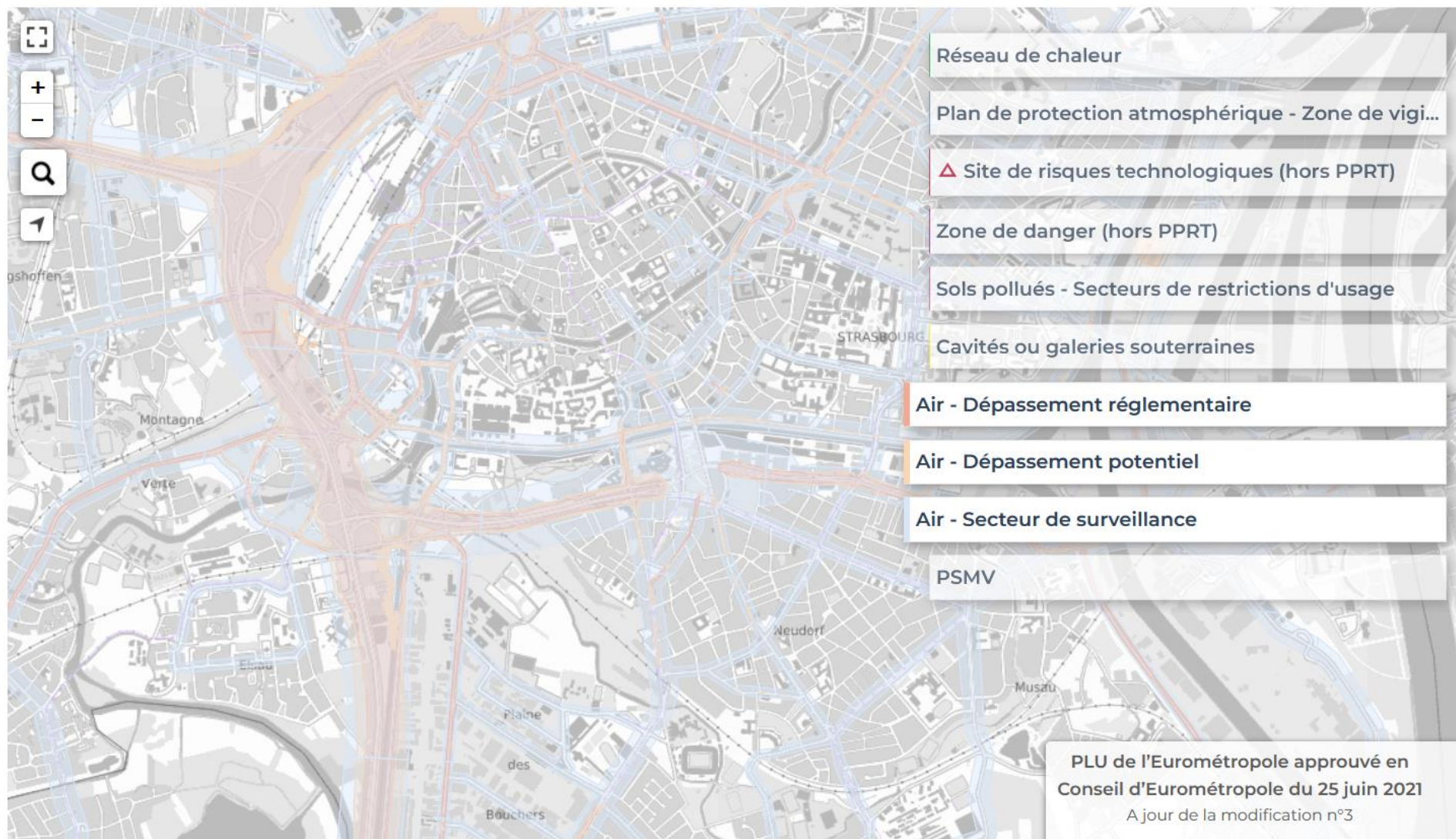
Le PPA de Strasbourg a été approuvé par arrêté préfectoral le 4 juin 2014.

Dispositions 1 à 6 : Réduire les émissions liées au trafic routier

Disposition 7 : intégrer dans l'aménagement urbain la nécessité de limiter l'exposition de la population aux dépassements de valeurs limites.



PLAN LOCAL D'URBANISME PLU



AMÉLIORER LA QUALITÉ DE L'AIR :

EXEMPLES D' ACTIONS ET MESURES

LES DIFFÉRENTS TYPES D' ACTIONS

Incitatives

Gratuité des transports en commun



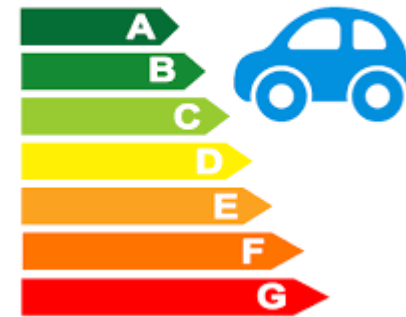
Aides financières (prime à la reconversion, prime à l'électrique, etc.)

Restrictives



Circulation différenciée

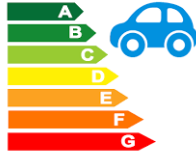
BONUS MALUS



Malus écologique

Vignette Crit'Air





MALUS ÉCOLOGIQUE

Taxe à payer au moment de la première immatriculation d'un véhicule en France en fonction de ses émissions en CO₂

Ne concerne que les véhicules de tourisme (catégorie M1 et N1 type pick-up ou transport de voyageurs).

Les véhicules utilitaires à usage de transport de marchandise ne sont pas concernés.

M1 : Véhicule conçu pour le transport de personnes et comportant, outre le siège du conducteur, 8 places assises au maximum.

N1 : Véhicule utilitaire léger de moins de 3,5 tonnes conçu et construit pour le transport de marchandises.

CO2 (g/km)	Malus 2021	Malus 2022	Hausse
128	0	50	50
129	0	75	75
130	0	100	100
131	0	125	125
132	0	150	150
133	50	170	120
134	75	190	115
135	100	210	110
136	125	230	105
137	150	240	90
138	170	260	90
139	190	280	90
140	210	310	100
141	230	330	100
142	240	360	120
143	260	400	140
144	280	450	170
145	310	540	230
146	330	650	320
147	360	740	380
148	400	818	418
149	450	898	448

CO2 (g/km)	Malus 2021	Malus 2022	Hausse
201	15506	18905	3399
202	16149	19641	3492
203	16810	20396	3586
204	17490	21171	3681
205	18188	21966	3778
206	18905	22781	3876
207	19641	23616	3975
208	20396	24472	4076
209	21171	25349	4178
210	21966	26247	4281
211	22781	27166	4385
212	23616	28107	4491
213	24472	29070	4598
214	25349	30056	4707
215	26247	31063	4816
216	27166	32094	4928
217	28107	33147	5040
218	29070	34224	5154
219	30000	35324	5324
220	30000	36447	6447
221	30000	37595	7595
222	30000	38767	8767
223	30000	39964	9964
224 et +	30000	40000	10000

Malus et hausses en euros (d'après <https://www.service-public.fr/particuliers/vosdroits/F35947>)

MALUS ÉCOLOGIQUE : QUELQUES EXEMPLES



Citroën C4 2022

Essence
130 ch
1,275 t

132 g CO₂/km

150 €



Porsche Cayenne V6 2022

Essence
340 ch
1,985 t

260 g CO₂/km

40 000 €

MALUS ÉCOLOGIQUE : QUELQUES EXEMPLES



Citroën C4 2022

Essence
130 ch
1,275 t

132 g CO₂/km

150 €



Porsche Cayenne V6 2022

Essence
340 ch
1,985 t

260 g CO₂/km

40 000 €



Porsche Cayenne E-Hybrid 2022

Hybride
460 ch
2,295 t

73 g CO₂/km



CO2 (g/km)	Malus 2021	Malus 2022	Hausse	CO2 (g/km)	Malus 2021	Malus 2022	Hausse
128	0	50	50	201	15506	18905	3399
129	0	75	75	202	16149	19641	3492
130	0	100	100	203	16810	20396	3586
131	0	125	125	204	17490	21171	3681
132	0	150	150	205	18188	21966	3778
133	50	170	120	206	18905	22781	3876
134	75	190	115	207	19641	23616	3975
135	100	210	110	208	20396	24472	4076
136	125	230	105	209	21171	25349	4178
137	150	240	90	210	21966	26247	4281
138	170	260	90	211	22781	27166	4385
139	190	280	90	212	23616	28107	4491
140	210	310	100	213	24472	29070	4598
141	230	330	100	214	25349	30056	4707
142	240	360	120	215	26247	31063	4816
143	260	400	140	216	27166	32094	4928
144	280	450	170	217	28107	33147	5040
145	310	540	230	218	29070	34224	5154
146	330	650	320	219	30000	35324	5324
147	360	740	380	220	30000	36447	6447
148	400	818	418	221	30000	37595	7595
149	450	898	448	222	30000	38767	8767
				223	30000	39964	9964
				224 et +	30000	40000	10000

Malus et hausses en euros (d'après <https://www.service-public.fr/particuliers/vosdroits/F35947>)

MALUS ÉCOLOGIQUE : LE PROTOCOLE WLTP

Comment sont calculées les émissions en CO₂ ?

WLTP : Worldwide harmonized Light vehicles Test Procedures

	Unité	Basse	Moyenne	Haute	Extra haute	Total
Durée	s	589	433	455	323	1 800
Durée des arrêts	s	156	48	31	7	242
Distance	m	3 095	4 756	7 158	8 254	23 262
Proportion des arrêts	-	26,5%	11,1%	6,8%	2,2%	13,4 %
Vitesse maximale	km/h	56,5	76,6	97,4	131,3	
Vitesse moyenne sans les arrêts	km/h	25,7	44,5	60,8	94,0	53,8
Vitesse moyenne avec les arrêts	km/h	18,9	39,5	56,6	92,0	46,5
Accélération minimale	m/s ²	-1,5	-1,5	-1,5	-1,2	
Accélération maximale	m/s ²	1,5	1,6	1,6	1,0	



Autonomie moyenne annoncée sur batterie seule : 43 km

VIGNETTE CRIT'AIR

Vignette Crit'Air
certificat qualité de l'air






Voitures particulières


NORME EURO
(inscrite sur la carte grise)
ou, à défaut, date
de 1^{re} immatriculation



 Véhicules 100 % électriques et véhicules à hydrogène

 Véhicules gaz et véhicules hybrides rechargeables

ESSENCE ET ASSIMILÉS	DIESEL ET ASSIMILÉS
 EURO 5 et 6 à partir du 1 ^{er} janvier 2011	
 EURO 4 Entre le 1 ^{er} janvier 2006 et le 31 décembre 2010 inclus	EURO 5 et 6 A partir du 1 ^{er} janvier 2011
 EURO 2 et 3 Entre le 1 ^{er} janvier 1997 et le 31 décembre 2005 inclus	EURO 4 Entre le 1 ^{er} janvier 2006 et le 31 décembre 2010 inclus
 4	EURO 3 Entre le 1 ^{er} janvier 2001 et le 31 décembre 2005 inclus
 5	EURO 2 Entre le 1 ^{er} juillet 1997 et le 31 décembre 2000 inclus

 **EURO 1 ET AVANT** Véhicules non classés pour lesquels il n'y a pas de délivrance de vignettes
Jusqu'au 31 décembre 1996

<https://www.ecologie.gouv.fr/certificats-qualite-lair-critair>

VIGNETTE CRIT'Air : CAS DE L'EUROMÉTROPOLE DE STRASBOURG



Illustration DNA

Interdiction progressive des véhicules les plus émetteurs

Illustration DNA

Calendrier de l'interdiction des véhicules les plus polluants dans la ZFE* de l'Eurométropole



* Zone à faibles émissions.

** En projet, concernerait pour l'instant les communes suivantes : Strasbourg, Schiltigheim, Ostwald et Holtzheim.

Infographie L'Alsace-DNA/PLM

VIGNETTE CRIT'AIR : NORMES EURO



Norme EURO : Doit émettre moins qu'un certain seuil pour être octroyée

Technologie diesel

Norme	Euro 1	Euro 2	Euro 3	Euro 4	Euro 5a	Euro 5b	Euro 6b	Euro 6c	Euro 6d -TEMP	Euro 6d
Cycle d'homologation	NEDC							WLTP-RDE		
Oxydes d'azote (NO _x)	-	-	500	250	180	180	80	80	80	80
Monoxyde de carbone (CO)	2 720	1 000	640	500	500	500	500	500	500	500
Hydrocarbures (THC)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Hydrocarbures non méthaniques (HCNM)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
HC + NO _x	970	700	560	300	230	230	170	170	170	170
Particules (PM)	140	80	50	25	5	4,5	4,5	4,5	4,5	4,5
Particules (PN) (nb/km)	-	-	-	-	6 × 10 ¹¹	6 × 10 ¹¹	6 × 10 ¹¹	6 × 10 ¹¹	6 × 10 ¹¹	6 × 10 ¹¹

Valeurs, sauf PN, exprimées en mg/km.

VIGNETTE CRIT'AIR : EXEMPLE DE PARADOXE



EURO 2 et 3

Entre le 1^{er} janvier 1997
et le 31 décembre 2005 inclus

EURO 4

Entre le 1^{er} janvier 2006
et le 31 décembre 2010 inclus

Norme	Euro 3	Euro 4	Euro 5a
Cycle d'homologation		NEDC	
Oxydes d'azote (NO _x)	500	250	180
Monoxyde de carbone (CO)	640	500	500
HC + NO _x	560	300	230
Particules (PM)	50	25	5
Particules (PN) (nb/km)	-	-	6 × 10 ¹¹

Valeurs, sauf PN, exprimées en mg/km.

Paradoxe :

Véhicules diamétralement opposés
Même contrainte réglementaire à l'usage

Notion d'égalité (≠ équité)








Renault, Clio III
2007
Diesel
1,09 t
75 ch (5 CV)



Land Rover, Range Rover
2007
Diesel
2,53 t
190 ch (13 CV)

VIGNETTE CRIT'AIR : AUTRE EXEMPLE

ESSENCE ET ASSIMILÉS	DIESEL ET ASSIMILÉS
 EURO 5 et 6 à partir du 1 ^{er} janvier 2011	
 EURO 4 Entre le 1 ^{er} janvier 2006 et le 31 décembre 2010 inclus	EURO 5 et 6 A partir du 1 ^{er} janvier 2011
 EURO 2 et 3 Entre le 1 ^{er} janvier 1997 et le 31 décembre 2005 inclus	EURO 4 Entre le 1 ^{er} janvier 2006 et le 31 décembre 2010 inclus
 4	EURO 3 Entre le 1 ^{er} janvier 2001 et le 31 décembre 2005 inclus
 5	EURO 2 Entre le 1 ^{er} juillet 1997 et le 31 décembre 2000 inclus



Renault, Clio III, Diesel

Modèle produit entre 2005 (septembre) et 2014

Evolution certaine de la motorisation entre 2005 et 2014, notamment pour anticiper la prochaine norme EURO

Paradoxe : Deux véhicules sortis d'usine (1) le 31 décembre 2005 et (2) le 1^{er} janvier 2006, technologie identique, mais contraintes réglementaires différentes

ÉTUDIER LA QUALITÉ DE L'AIR

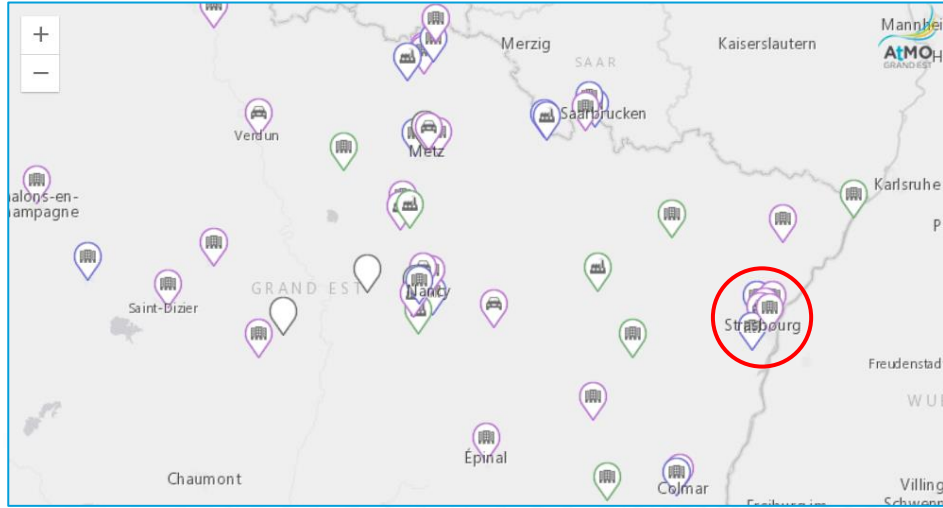


MESURE DE LA QUALITÉ DE L'AIR : LES STATIONS DU RÉSEAU ATMO

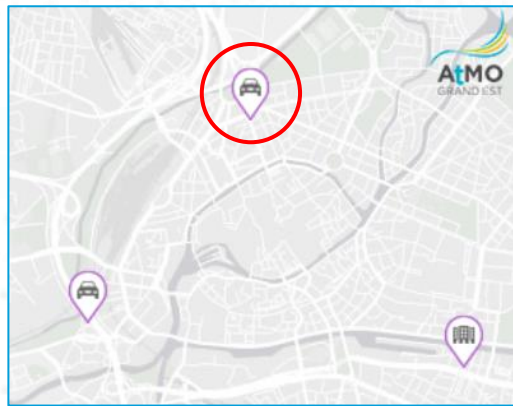
Stations de mesure très perfectionnées et précises, mais coûteuses (ordre de prix : 100 000 €).



MESURE DE LA QUALITÉ DE L'AIR : LES STATIONS DU RÉSEAU ATMO

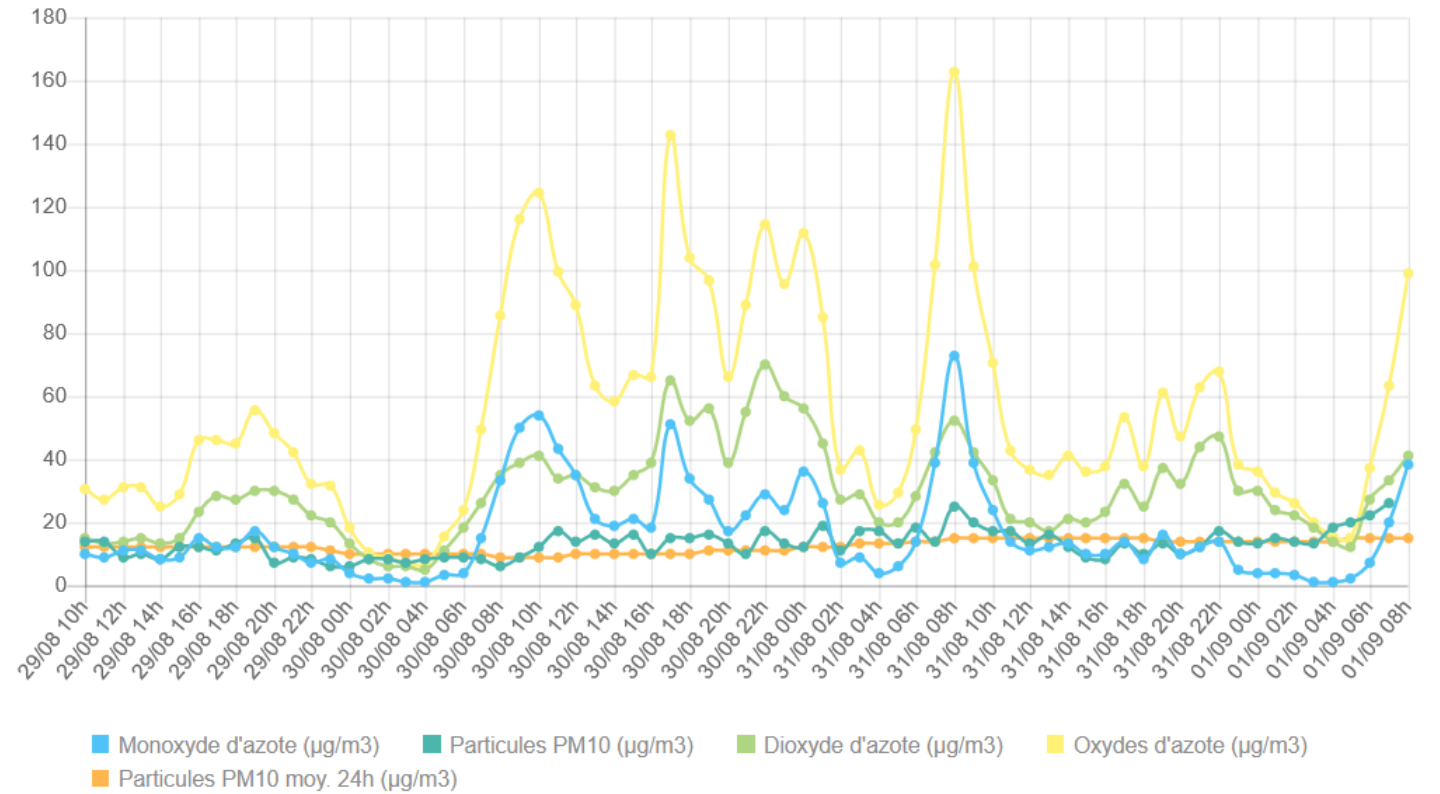


- Typologie**
- Urbaine
 - Périurbaine
 - Rurale
 - Observation spécifique
- Influence**
- Fond
 - Industrielle
 - Trafic



Strasbourg Clemenceau

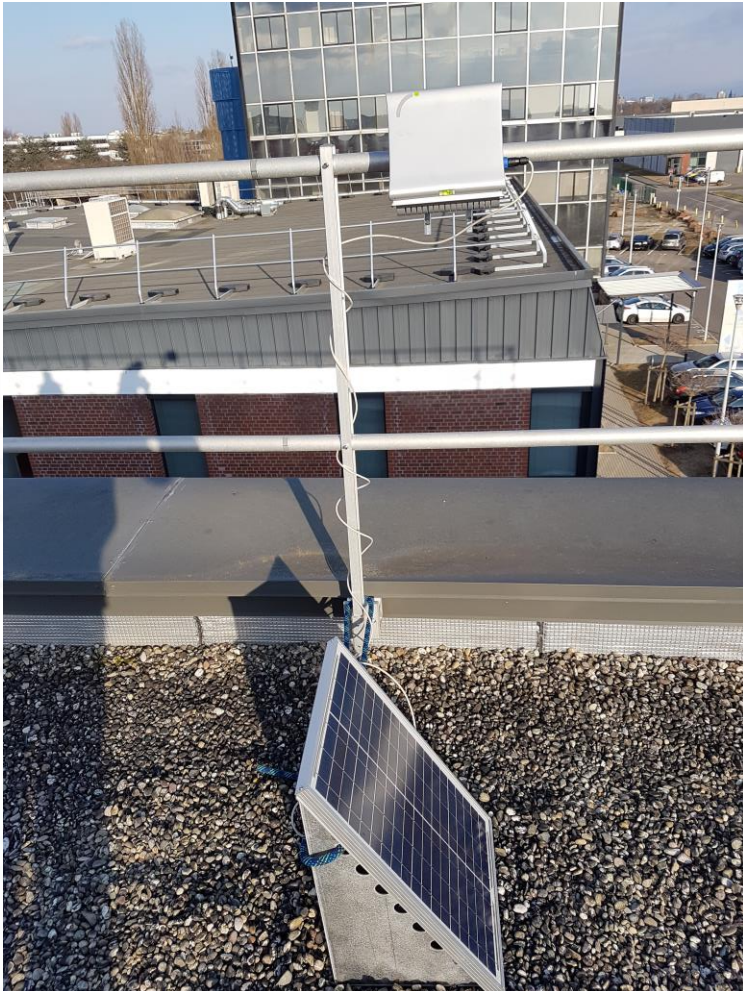
Période : 72h



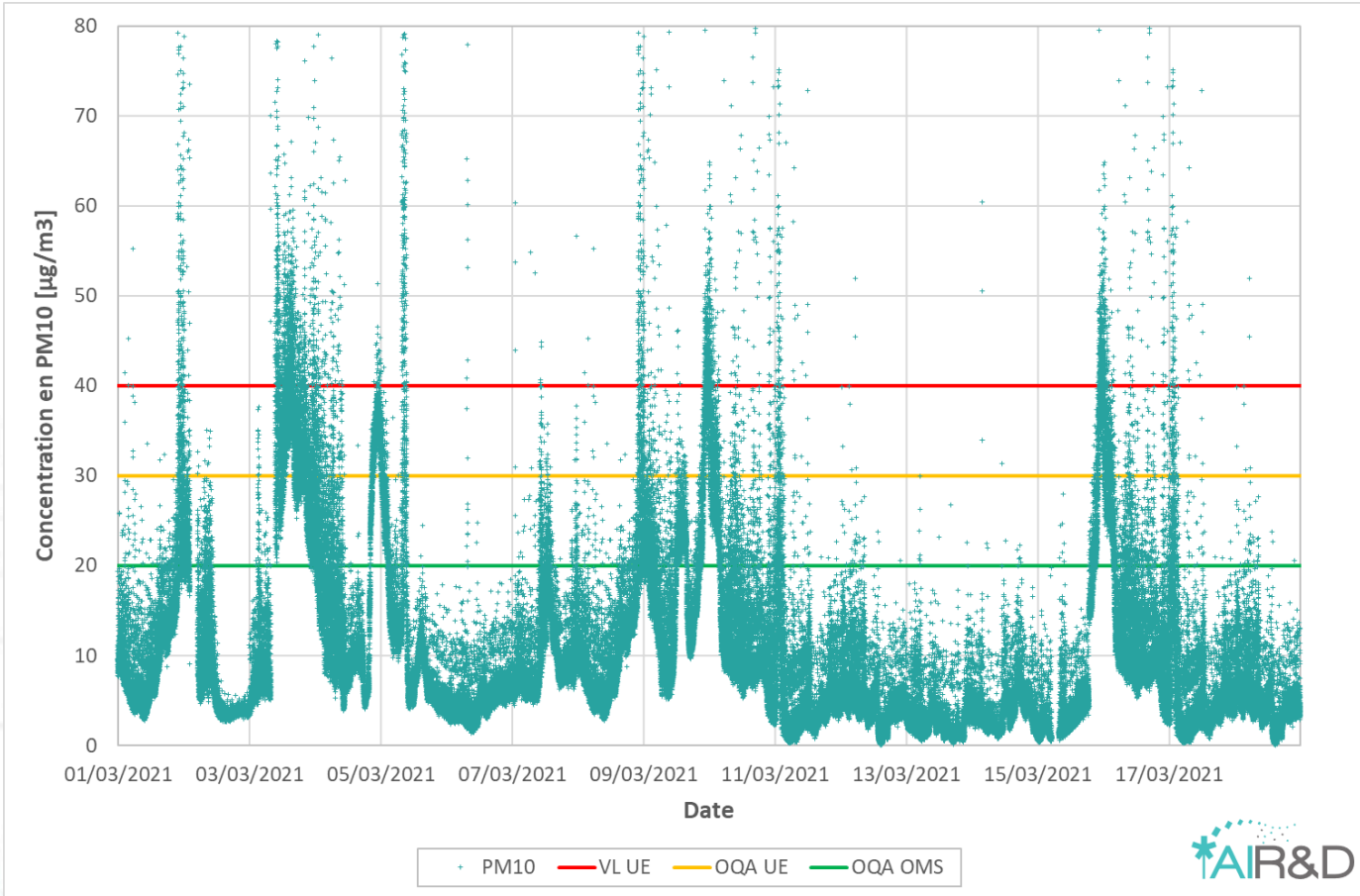
<http://www.atmo-grandest.eu/donnees-par-station>

MESURE DE LA QUALITÉ DE L'AIR : DES SOLUTIONS POUR L'INGÉNIERIE

Alternatives adaptées à l'ingénierie : moins précises mais facilement déployables et plus abordables (ordre de prix : 6 000 €)



EXEMPLE DE RÉSULTATS DE MÉTROLOGIE

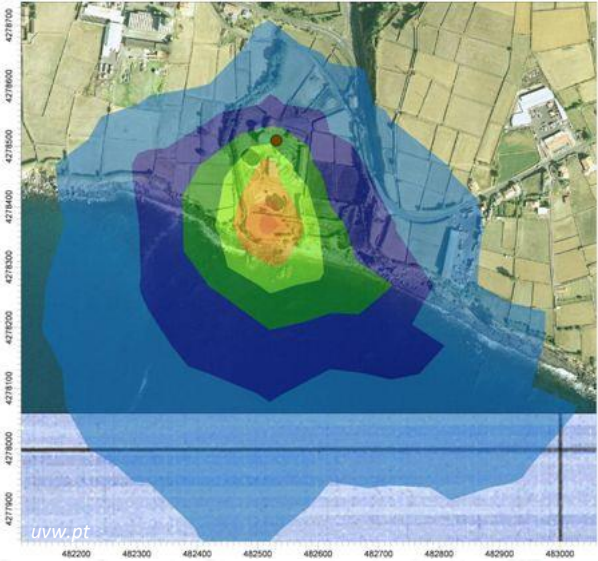
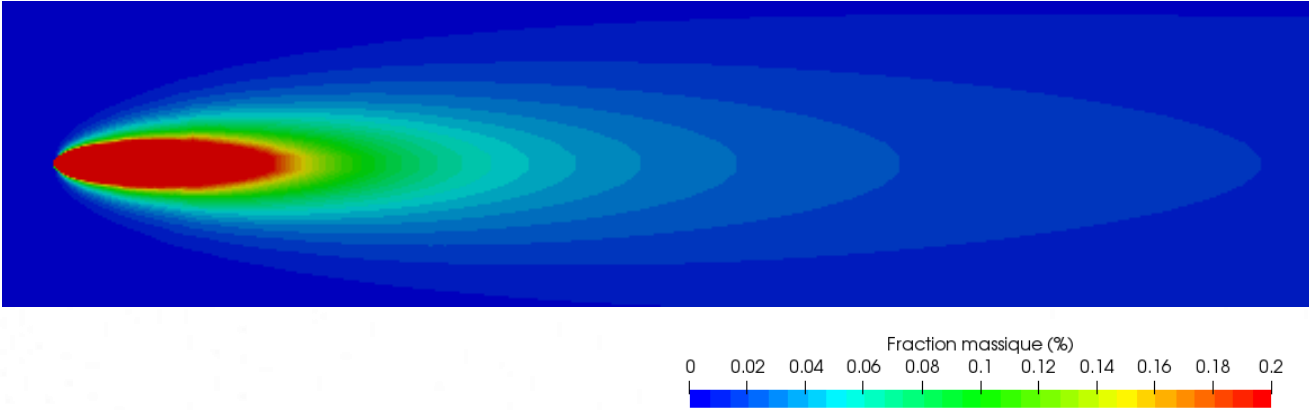
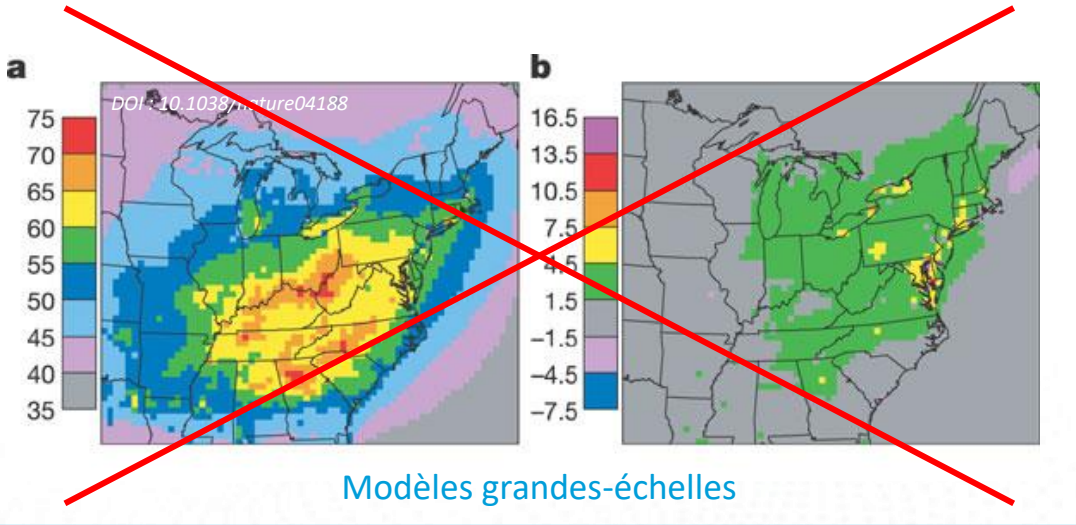


Paramètre	25 ^e centile	50 ^e centile	75 ^e centile	95 ^e centile	Moyenne
Valeur (µg/m ³)	4	7	13	34	11

Directive 2008/50/CE	PM10
Valeur limite (moyenne annuelle)	40 µg/m ³
Valeur limite (moyenne journalière)	50 µg/m ³ (ne pas dépasser plus de 35 fois par an)
Valeur limite (moyenne horaire)	-
Objectif de qualité (en moyenne annuelle)	30 µg/m ³

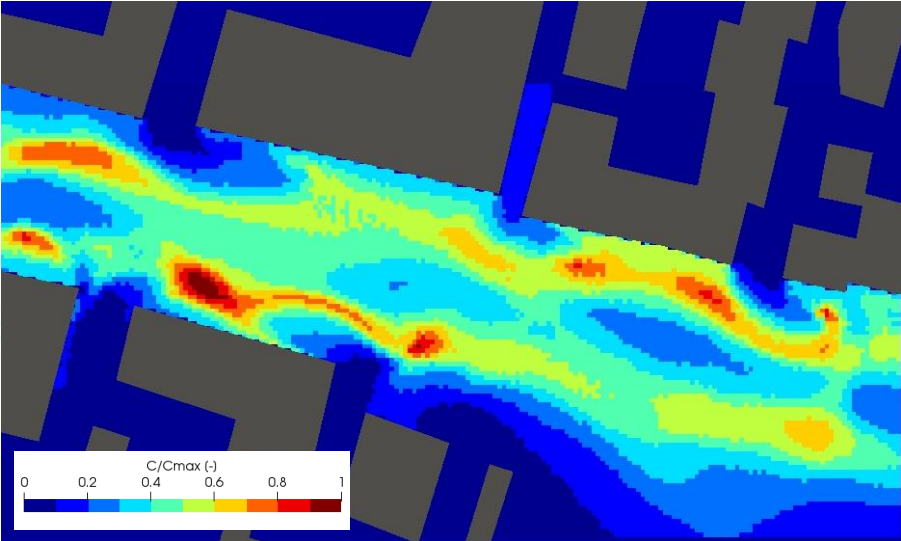
OMS	PM10
Moyenne annuelle	15 µg/m ³
Moyenne journalière	45 µg/m ³ (maximum 3 jours par an)
Moyenne horaire	-

MODÉLISATION DE LA QUALITÉ DE L'AIR : DIFFÉRENTES ÉCHELLES, DIFFÉRENTS MODÈLES

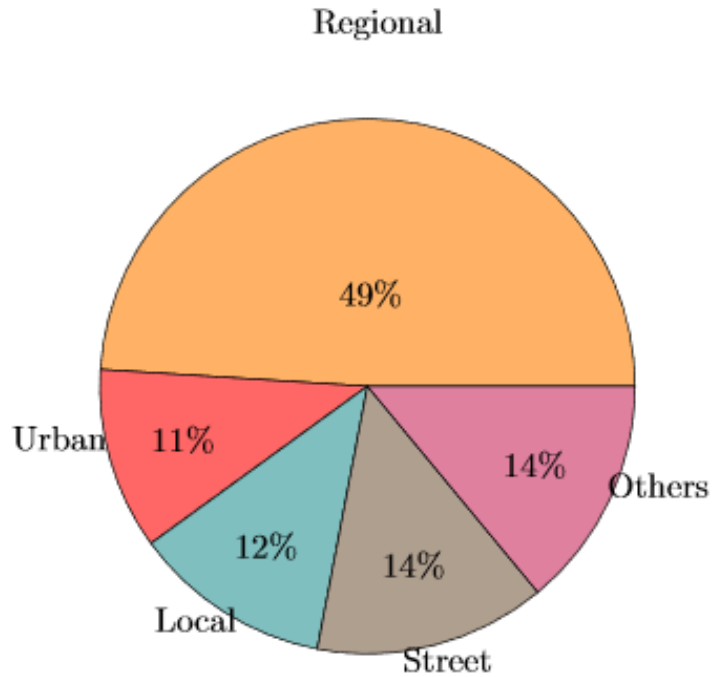


Modèles Gaussiens

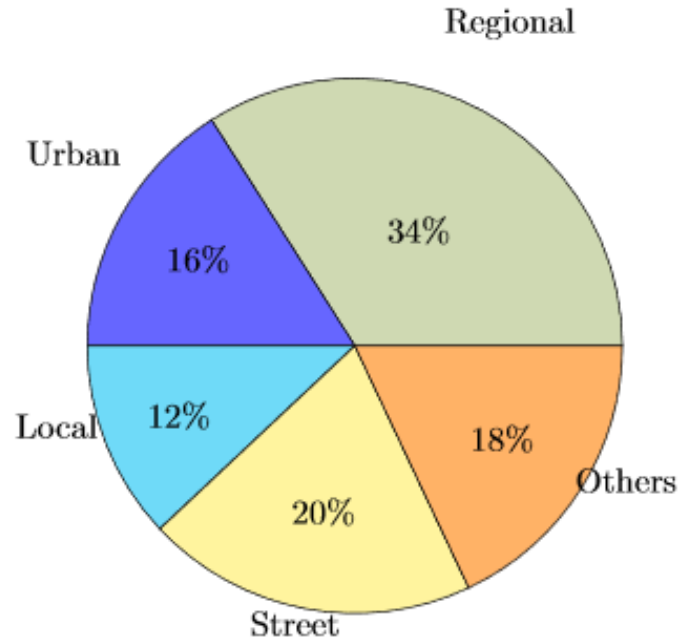
Modèles CFD



MODÉLISATION DE LA QUALITÉ DE L'AIR : RÉPARTITION DES MODÈLES



(a) Research Project



(b) Air Quality Plans

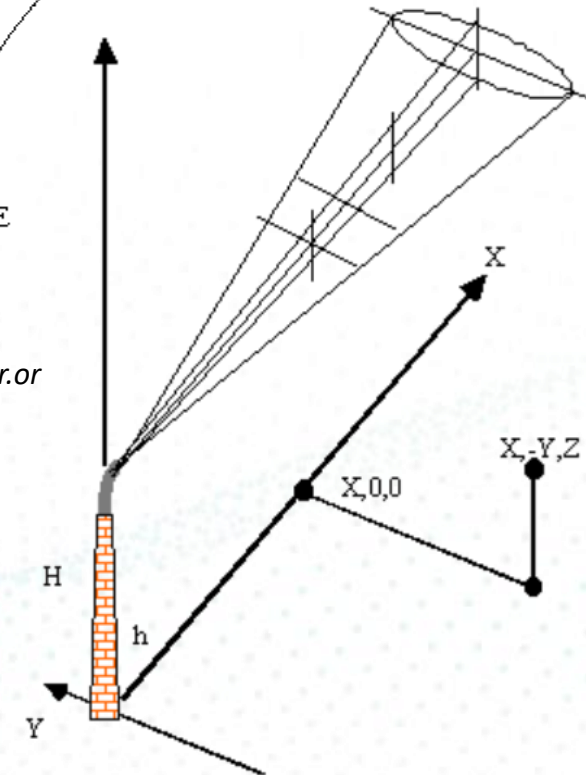
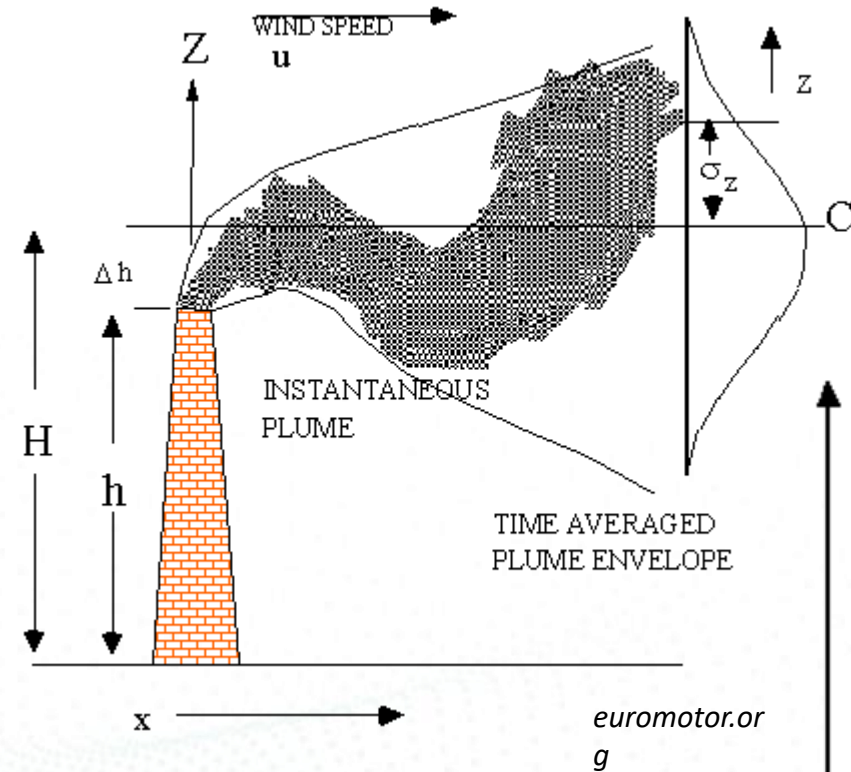
Régional : 10 à 50 km

Urbain : 1 à 5 km

Local : < 1 km

Thunis, P., Miranda, A., Baldasano, J., Blond, N., Douros, J., Graff, A., Janssen, S., Juda-Rezler, K., Karvosenoja, N., Maffei, G., Martilli, A., Rasoloharimahefa, M., Real, E., Viaene, P., Volta, M., and White, L. Overview of current regional and local scale air quality modelling practices: Assessment and planning tools in the EU. Environmental Science & Policy 65 (Nov. 2016), 13–21.

LE MODÈLE GAUSSIEN : UN MODÈLE BASÉ SUR L'ÉQUATION D'ADVECTION-DIFFUSION

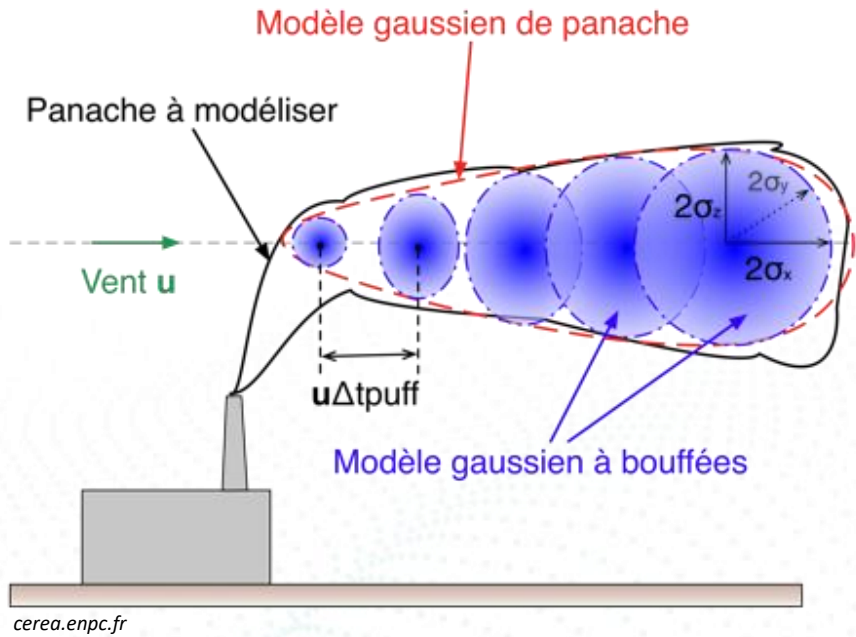


Equation d'advection-diffusion $\frac{\partial C}{\partial t} + \nabla \cdot (CU) - \nabla \cdot (D\nabla C) = 0$

$$\equiv \frac{\partial C}{\partial t} + u_x \frac{\partial C}{\partial x} + u_y \frac{\partial C}{\partial y} + u_z \frac{\partial C}{\partial z} = K_x \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + K_y \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} + K_z \frac{\partial^2 C}{\partial z^2}$$

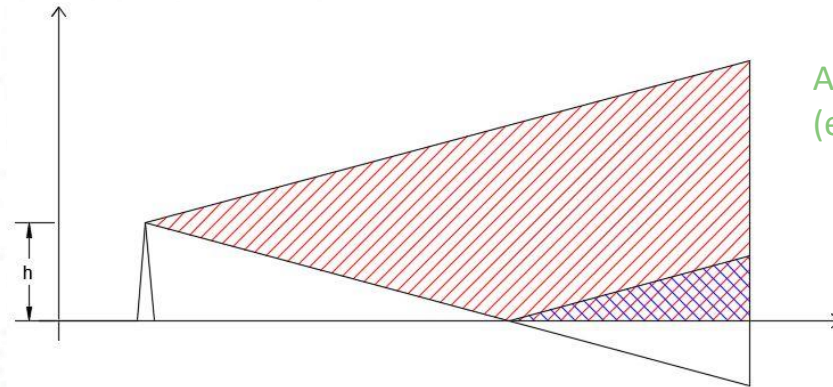
LE MODÈLE GAUSSIEN : UN MODÈLE BASÉ SUR L'ÉQUATION D'ADVECTION-DIFFUSION

Modèles « à panache »



$$\bar{c}(x, y, z) = \frac{q_m}{2\pi U \sigma_y \sigma_z} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{y^2}{\sigma_y^2} + \frac{z^2}{\sigma_z^2} \right) \right] \quad \text{Sans réflexion au sol (ex: particules)}$$

$$\bar{c}(x, y, z) = \frac{q_m}{2\pi U \sigma_y \sigma_z} \exp \left(-\frac{y^2}{2\sigma_y^2} \right) \left[\exp \left(-\frac{(z-h)^2}{2\sigma_z^2} \right) + \exp \left(-\frac{(z+h)^2}{2\sigma_z^2} \right) \right]$$



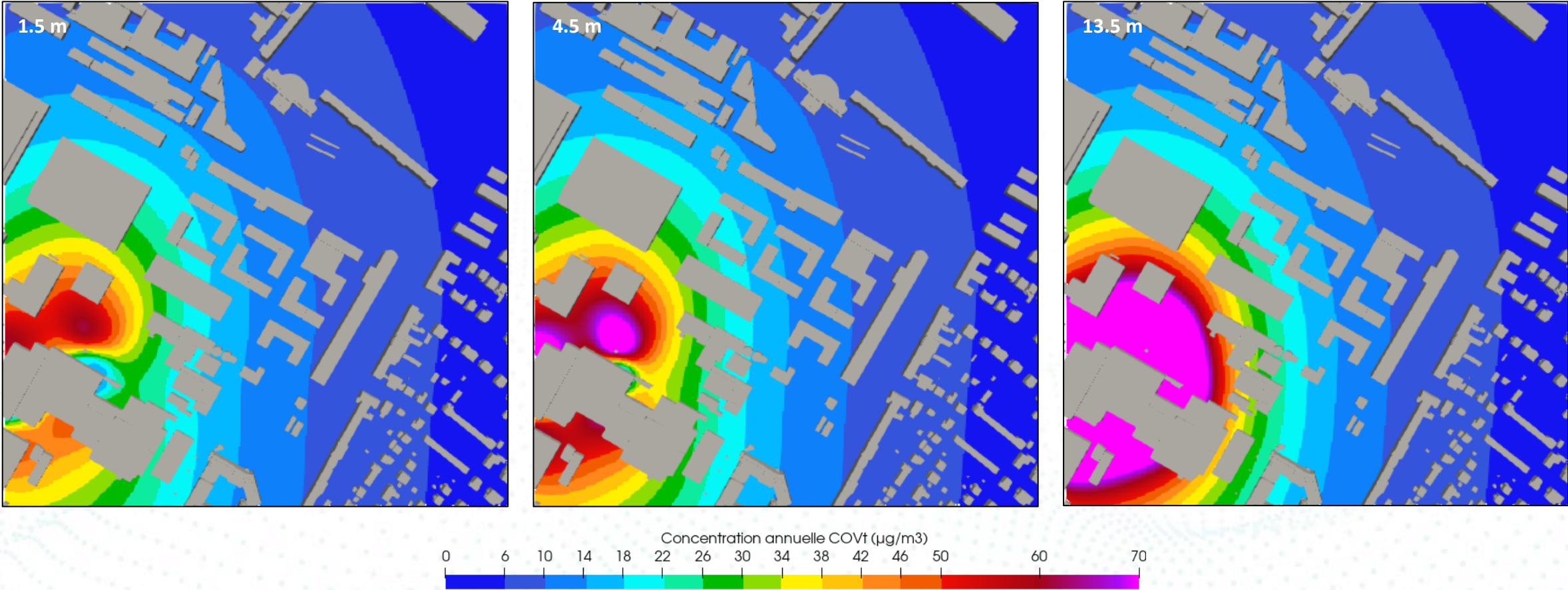
Avec réflexion
(ex: NO₂, autres gaz)

Hypothèses : régime permanent, vitesse constant uniforme, émission constante, vent selon x, etc.

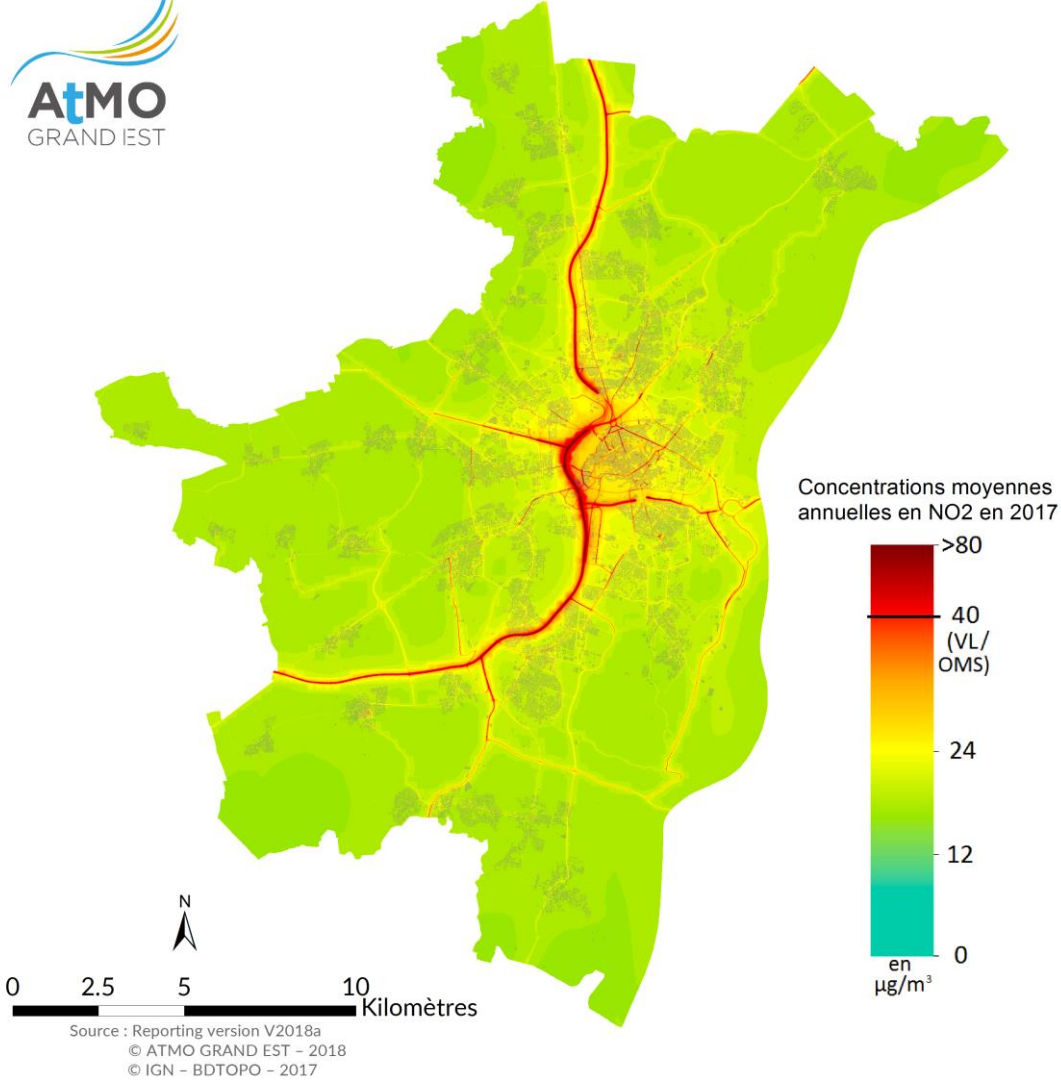
Modèles « à bouffées »

$$\bar{c}(x, y, z, t) = \frac{1}{[2\pi]^{\frac{3}{2}}} \sum_{i=1}^{i=N} \frac{S_i \Delta t}{\sigma_x \sigma_y \sigma_z} \exp \left[-\frac{(x - x_i(t))^2}{2\sigma_x^2} - \frac{(y - y_i(t))^2}{2\sigma_y^2} \right] \times \left[\exp \left(-\frac{(z - z_i(t) - h)^2}{2\sigma_z^2} \right) + \exp \left(-\frac{(z - z_i(t) + h)^2}{2\sigma_z^2} \right) \right]$$

LE MODÈLE GAUSSIEN : EXEMPLE DE MODÉLISATION GAUSSIENNE POUR LE SUIVI DES REJETS INDUSTRIELS (MODÈLE À PANACHE)



LE MODÈLE GAUSSIEN : EXEMPLE DE MODÉLISATION GAUSSIENNE À GRAND ÉCHELLE SUR L'EMS (MODÈLE LINÉAIRE)



LE MODÈLE GAUSSIEN : EXEMPLE DE MODÉLISATION GAUSSIENNE À GRAND ÉCHELLE (EMS)



MODÉLISATION 3D CFD : UNE MODÉLISATION FINE POUR DES RÉSULTATS PRÉCIS ET LOCALISÉS ...

Des équations plus complexes ...

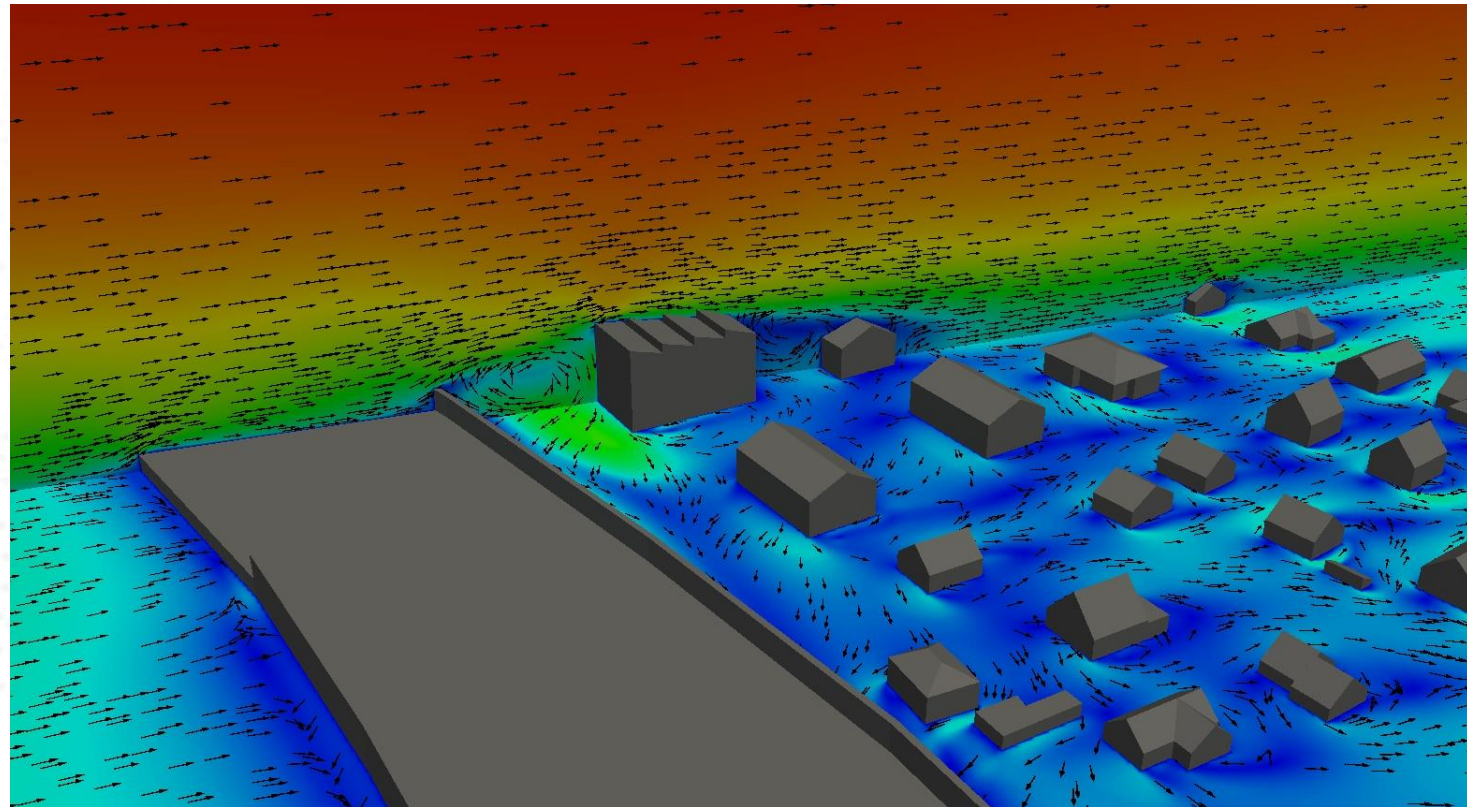
$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u) = 0 \quad \rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \cdot \nabla u \right) = -\nabla p + \nabla \cdot (2\mu_{eff} D(u)) - \nabla \cdot \left(\frac{2}{3} \mu_{eff} (\nabla \cdot u) \right) + \rho g$$

$$\frac{\partial \rho e}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u e) + \frac{\partial \rho K}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u K) + \nabla \cdot (u p) = \nabla \cdot (\alpha_{eff} \nabla e) + \rho g \cdot u$$

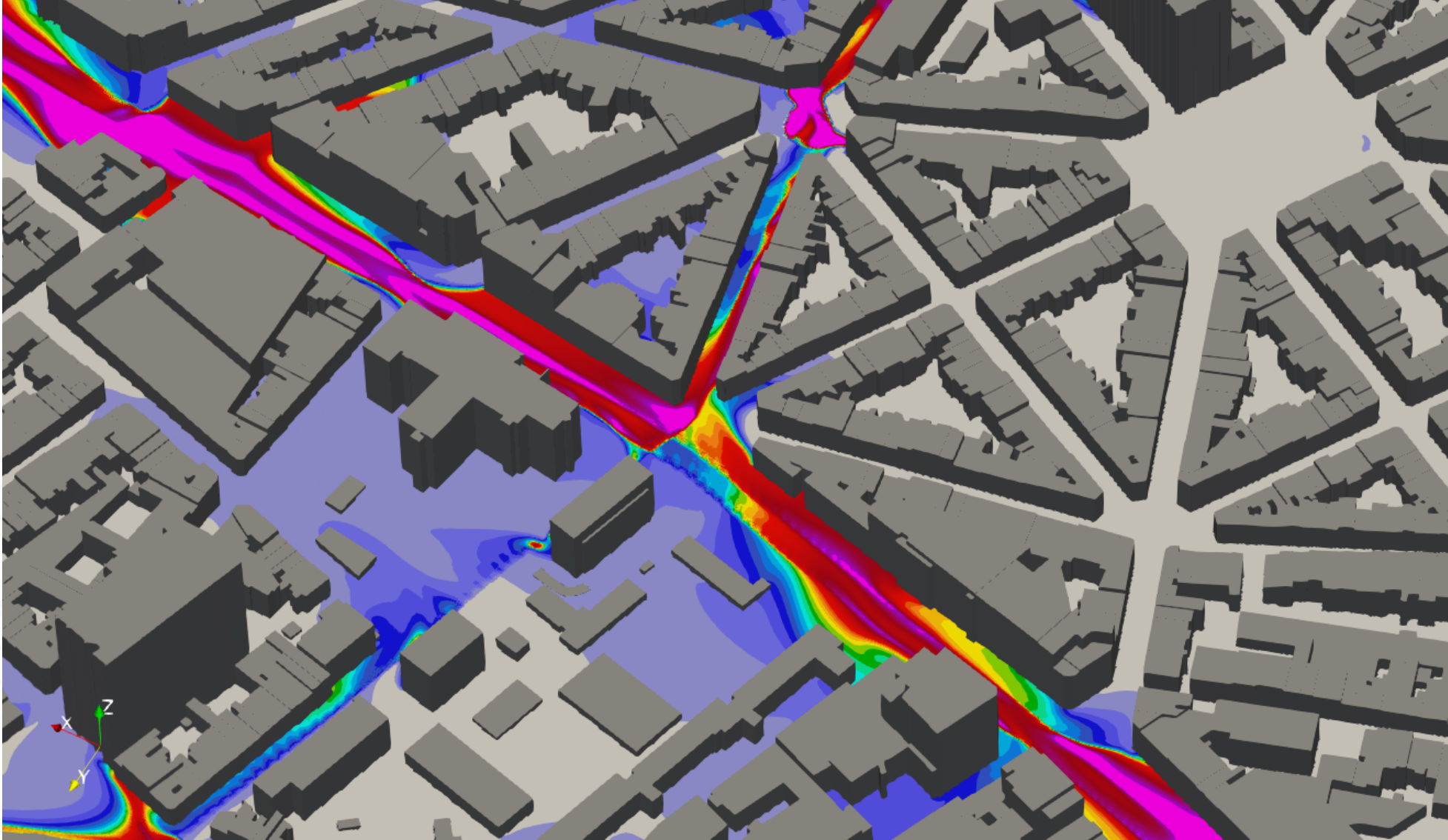
... pour des résultats plus spécifiques

Prise en compte :

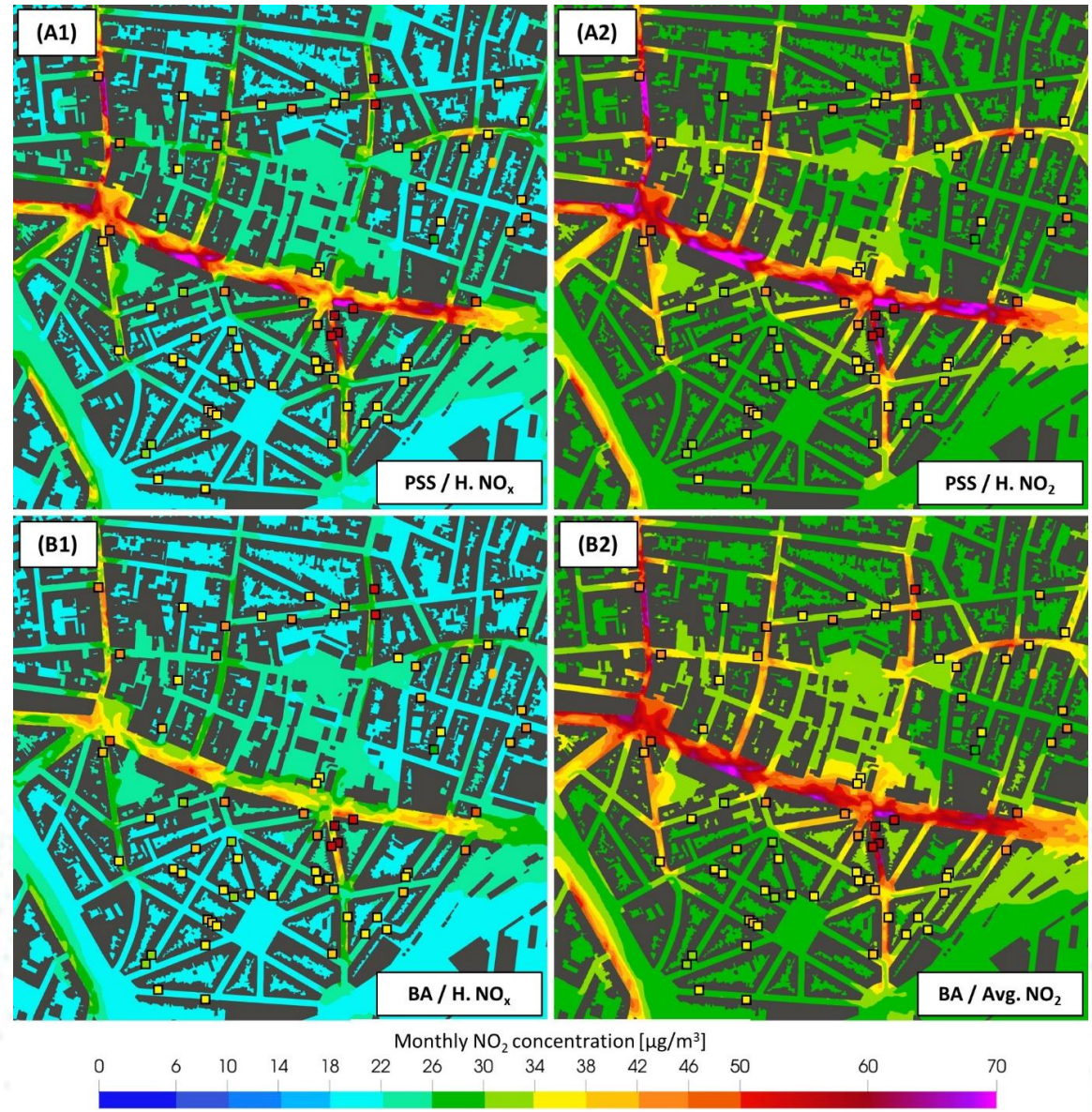
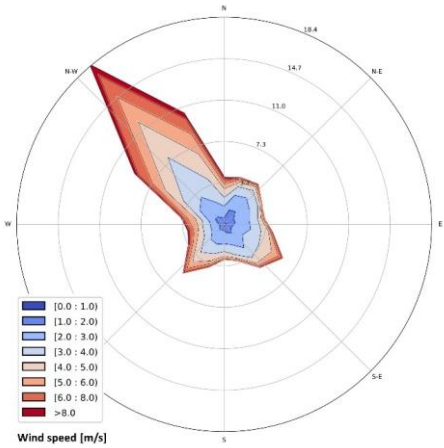
- Du bâti
- De la turbulence
- Des variations de vitesse
- Des recirculations
- Des effets transitoires
- De la stabilité atmosphérique
- ...



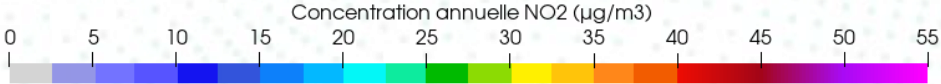
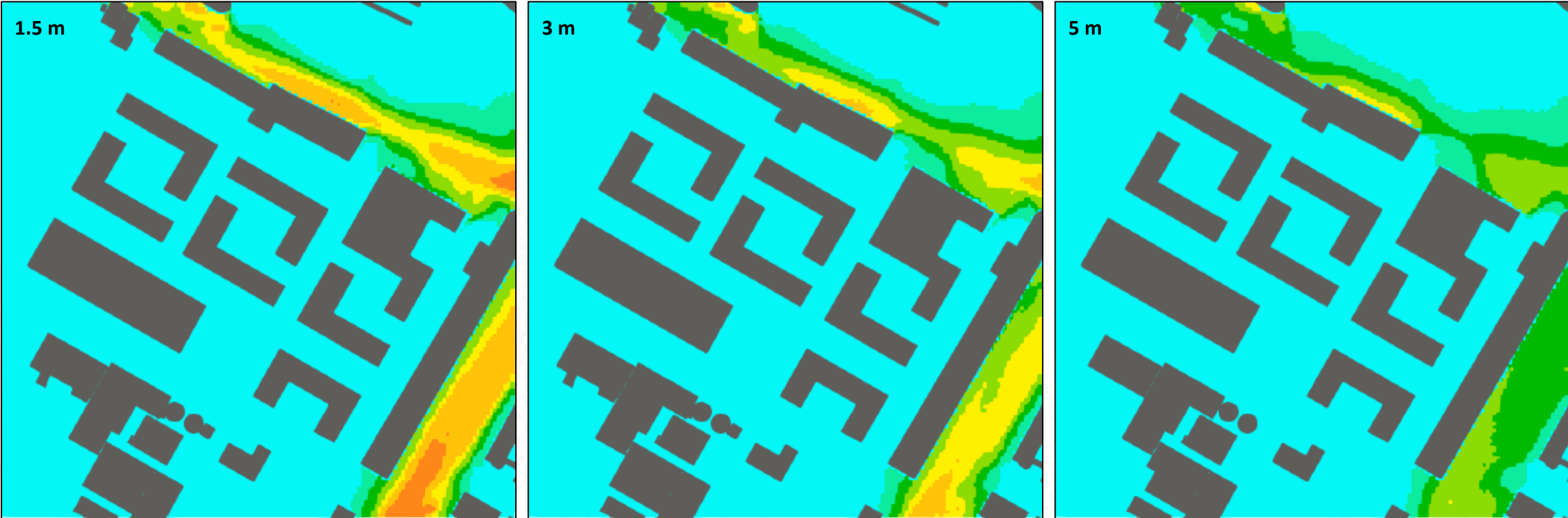
MODÉLISATION 3D CFD : ... MAIS AUSSI À PLUS GRANDE ÉCHELLE



MODÉLISATION 3D CFD : ... MAIS AUSSI À PLUS GRANDE ÉCHELLE

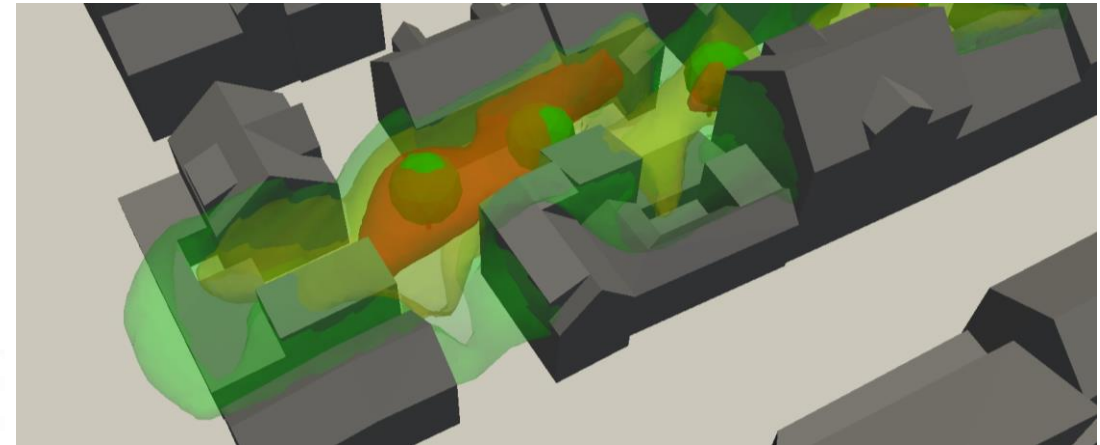
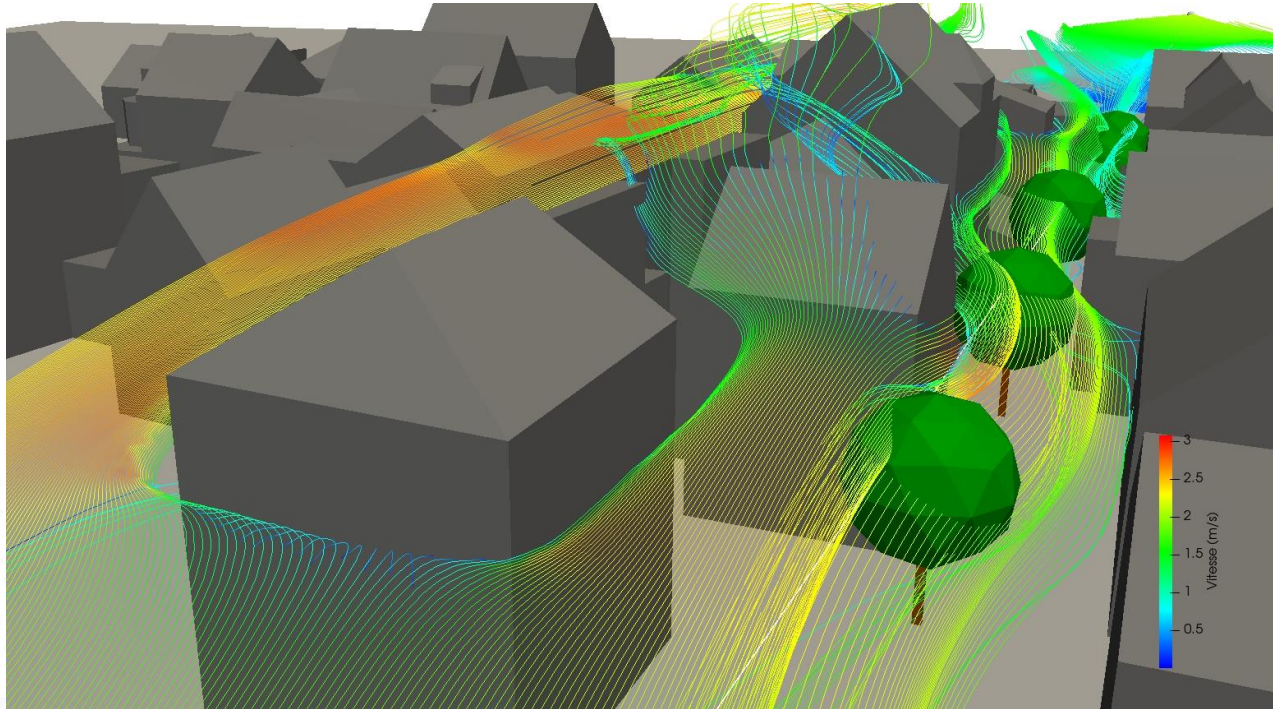


MODÉLISATION 3D CFD : ... ET UTILISABLE POUR LES ÉTUDES D'IMPACT

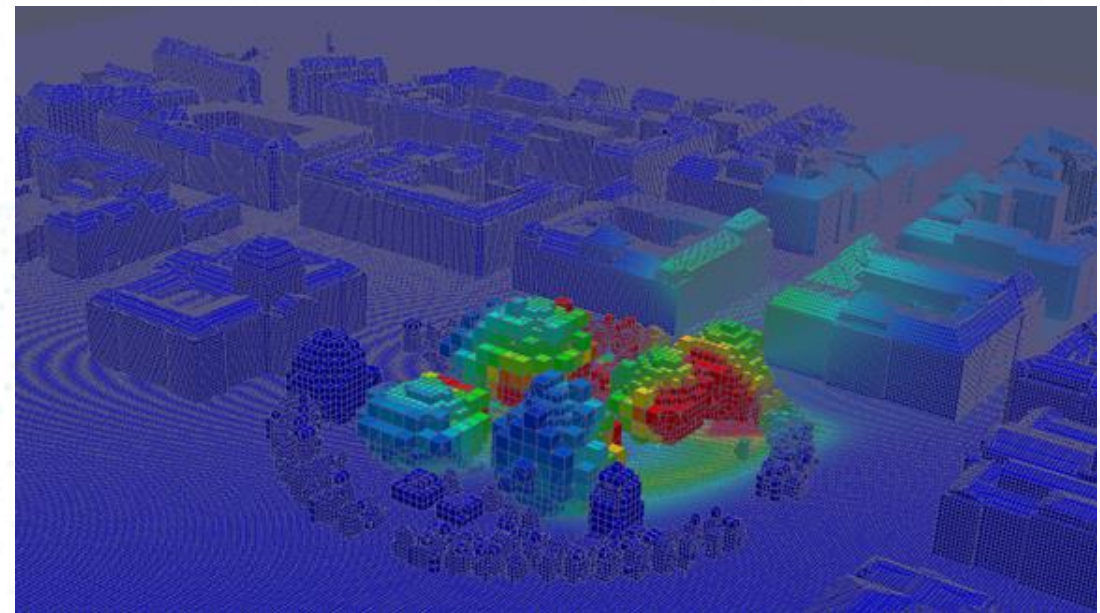


MODÉLISATION 3D CFD : PRISE EN COMPTE DE SITUATIONS COMPLEXES

Prise en compte de la végétation ...

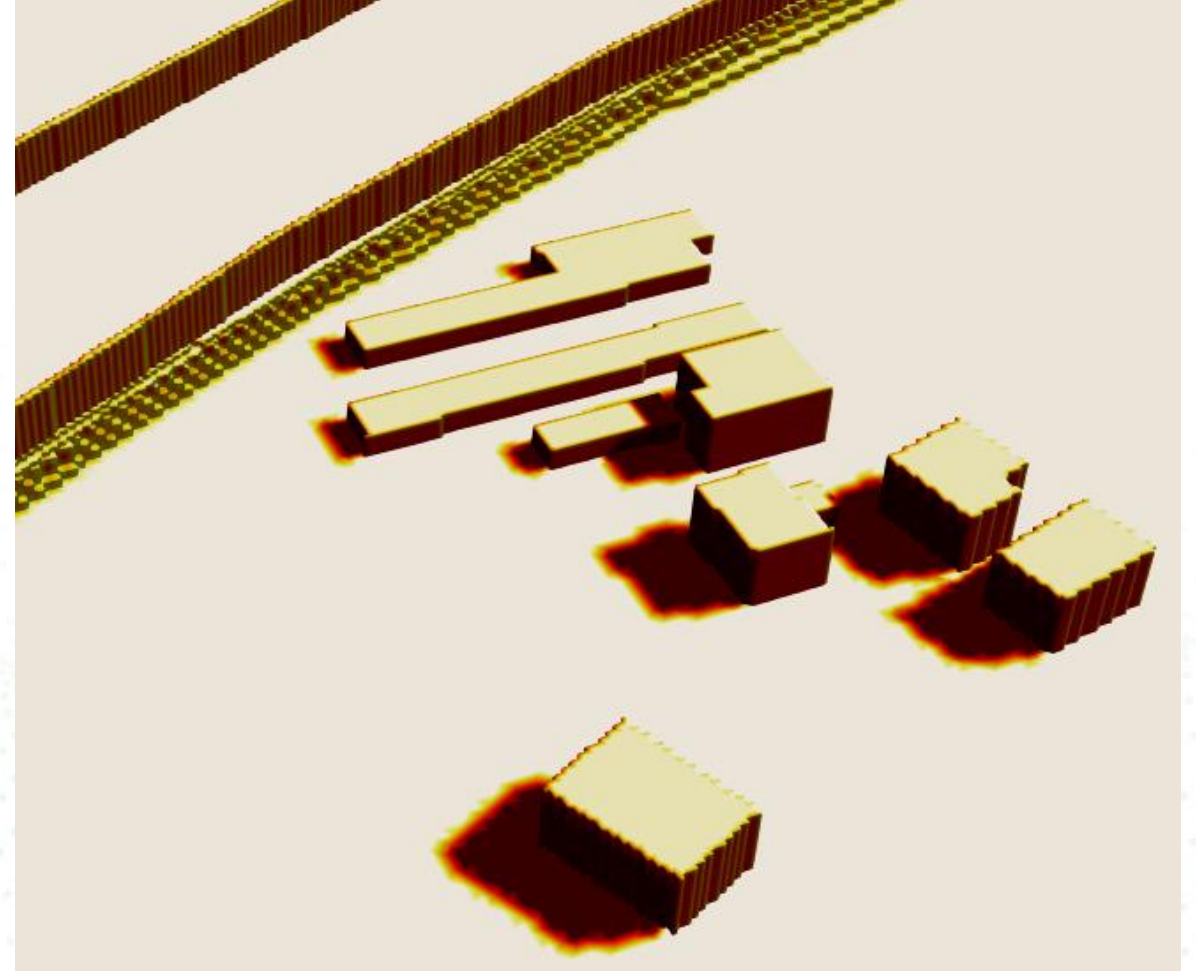


... et étude de la dispersion de polluants biologiques (pollens) ...



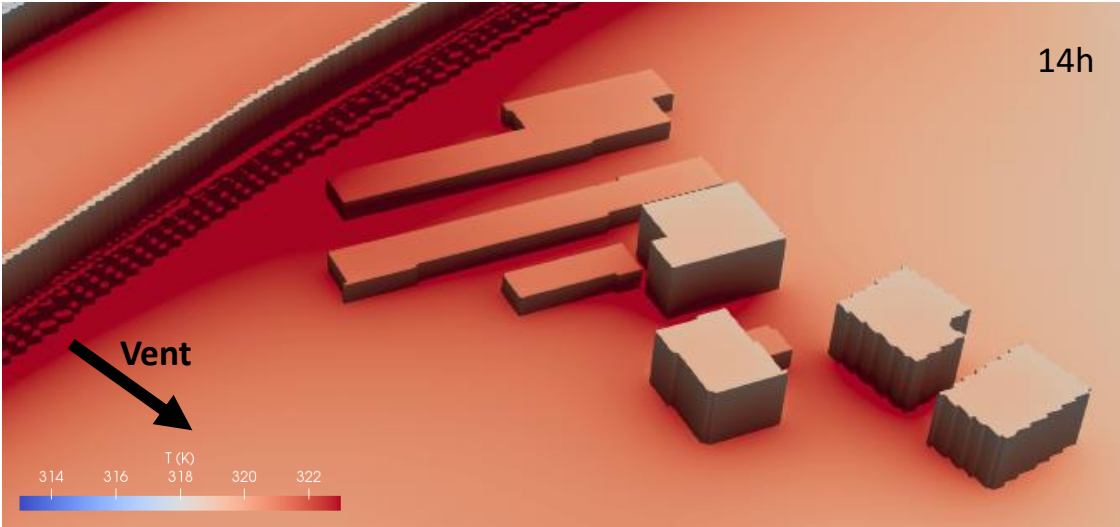
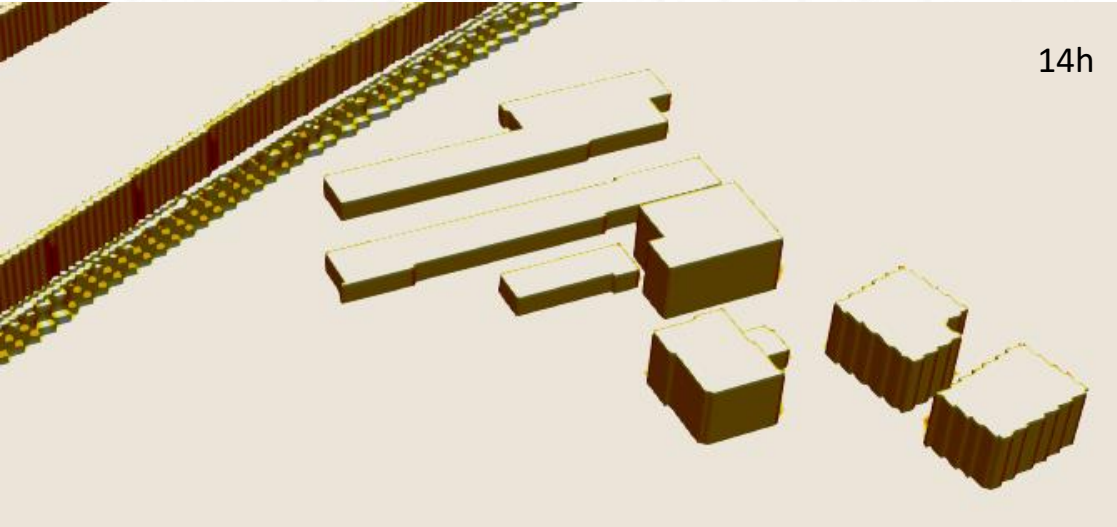
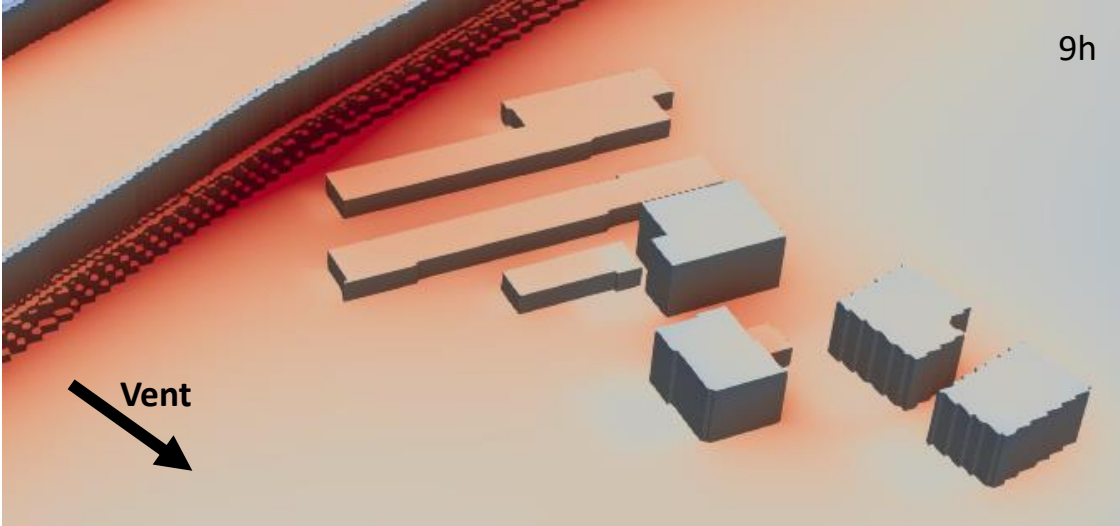
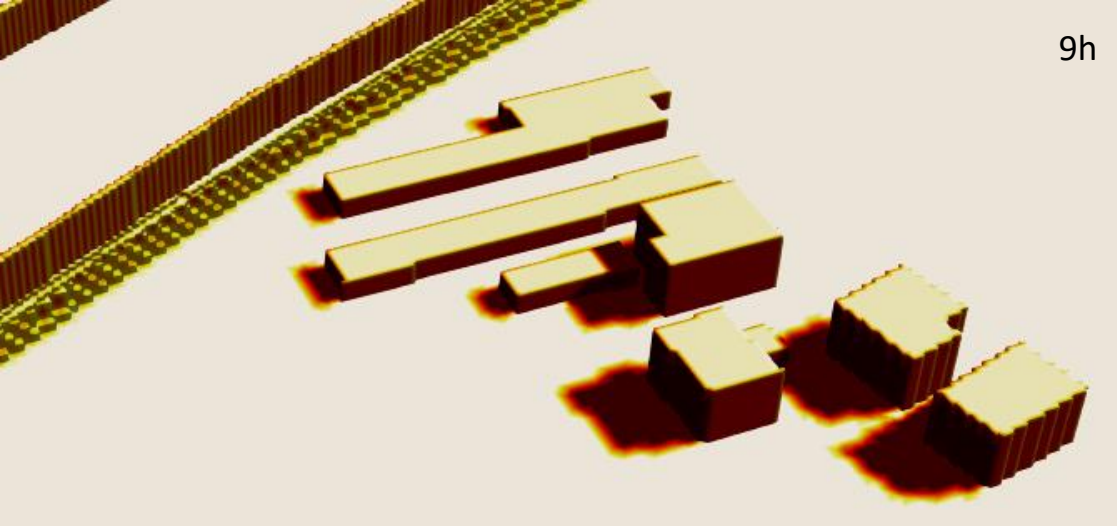
MODÉLISATION 3D CFD : PRISE EN COMPTE DE SITUATIONS COMPLEXES

Autres exemples en cas réel ...



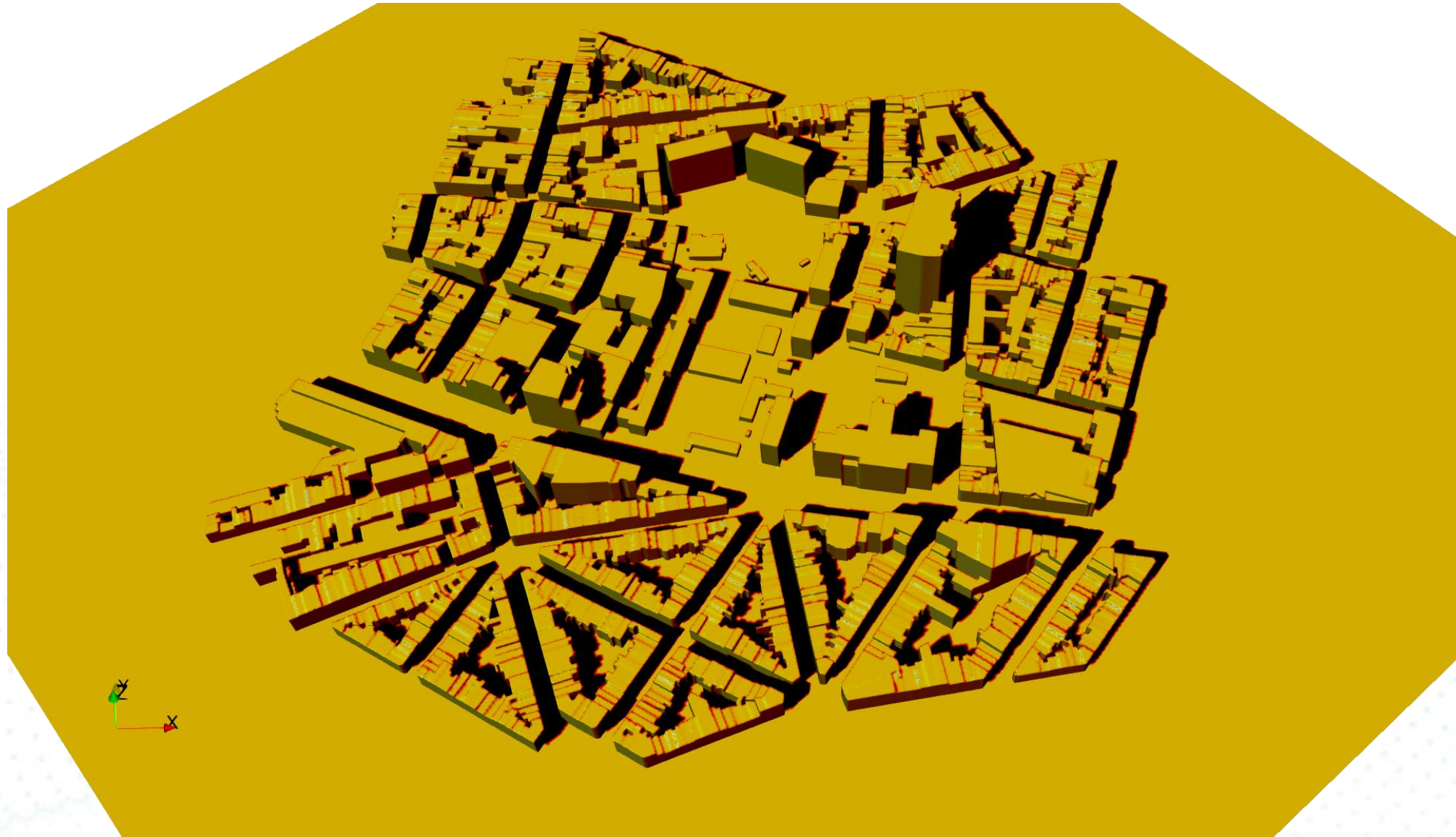
MODÉLISATION 3D CFD : PRISE EN COMPTE DE SITUATIONS COMPLEXES

... en fonction du moment de la journée ...



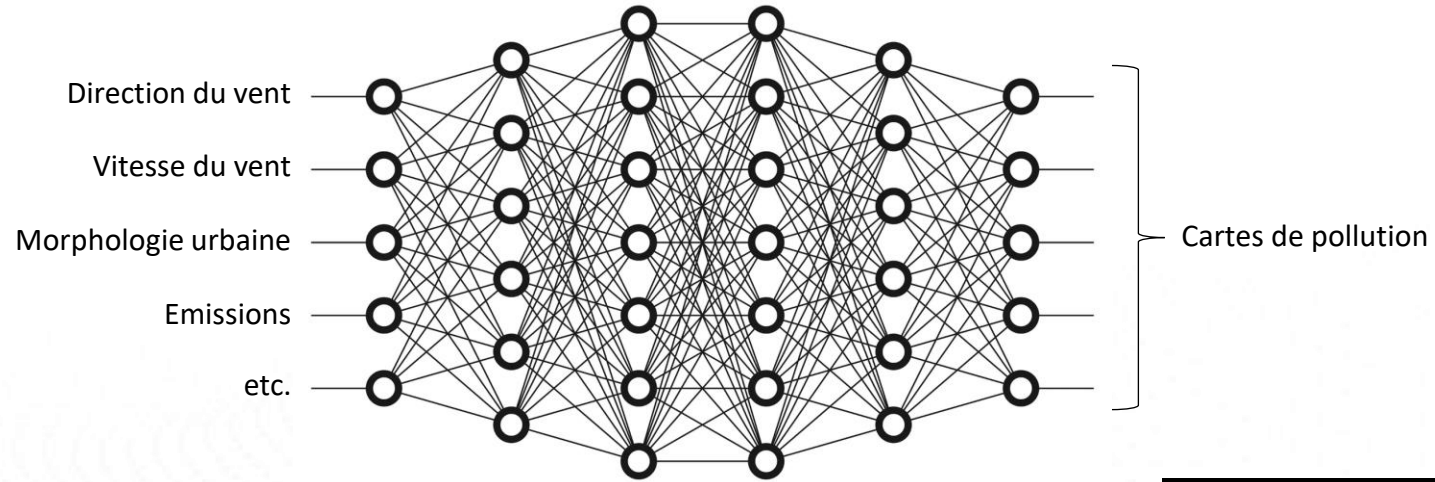
MODÉLISATION 3D CFD : PRISE EN COMPTE DE SITUATIONS COMPLEXES

... et à plus grande échelle

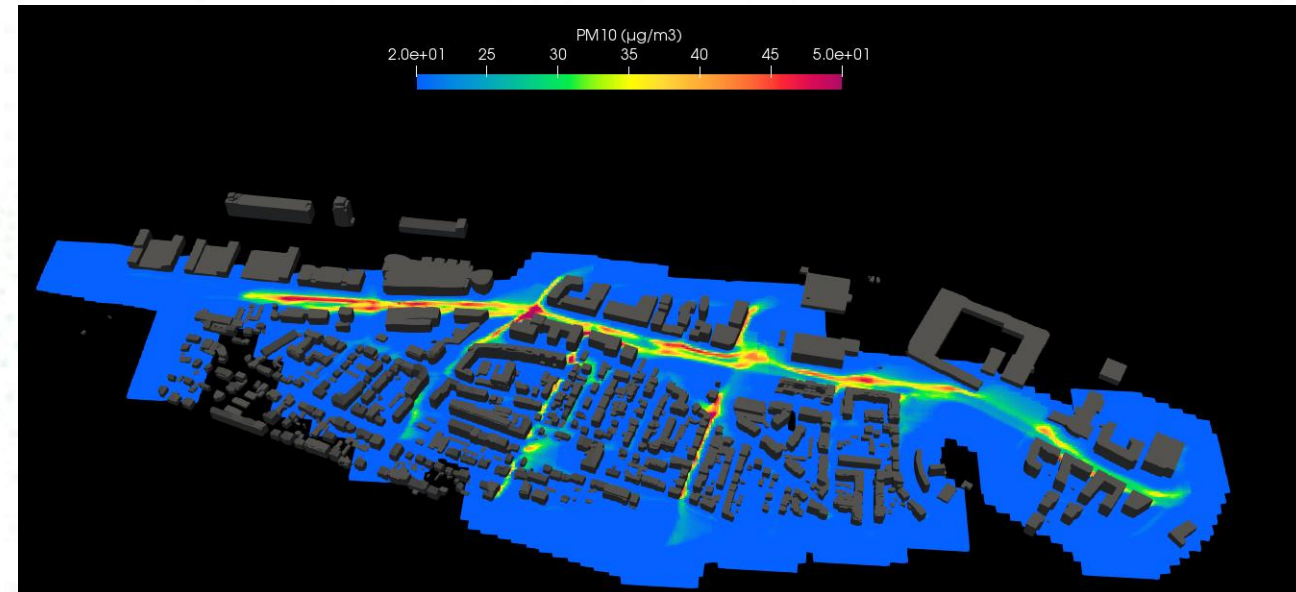


MODÉLISATION PAR INTELLIGENCE ARTIFICIELLE : UN OUTIL INNOVANT

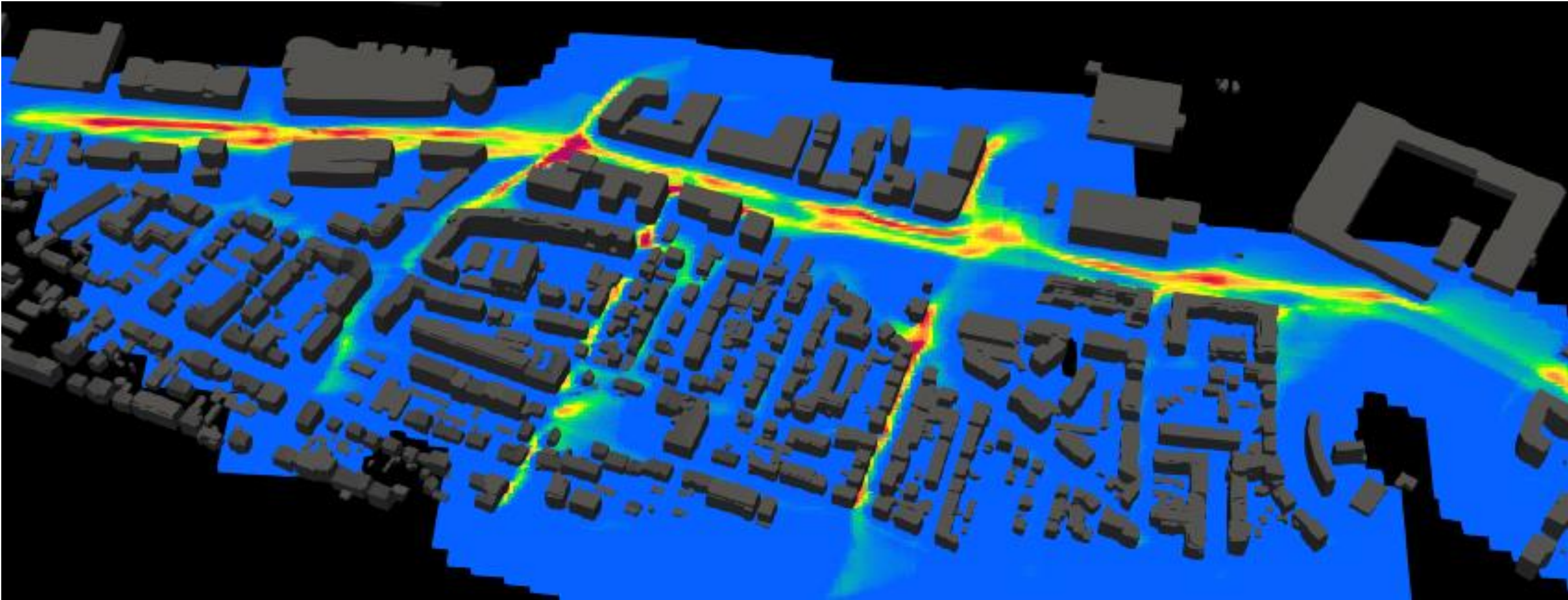
Modèle d'intelligence artificiel par apprentissage supervisé profond



Exemple de résultat au niveau de l'Avenue du Rhin



MODÉLISATION PAR INTELLIGENCE ARTIFICIELLE : UN OUTIL INNOVANT



MODÉLISATION PAR INTELLIGENCE ARTIFICIELLE : UN OUTIL INNOVANT

X. Jurado et al.

Sustainable Cities and Society 99 (2023) 104951

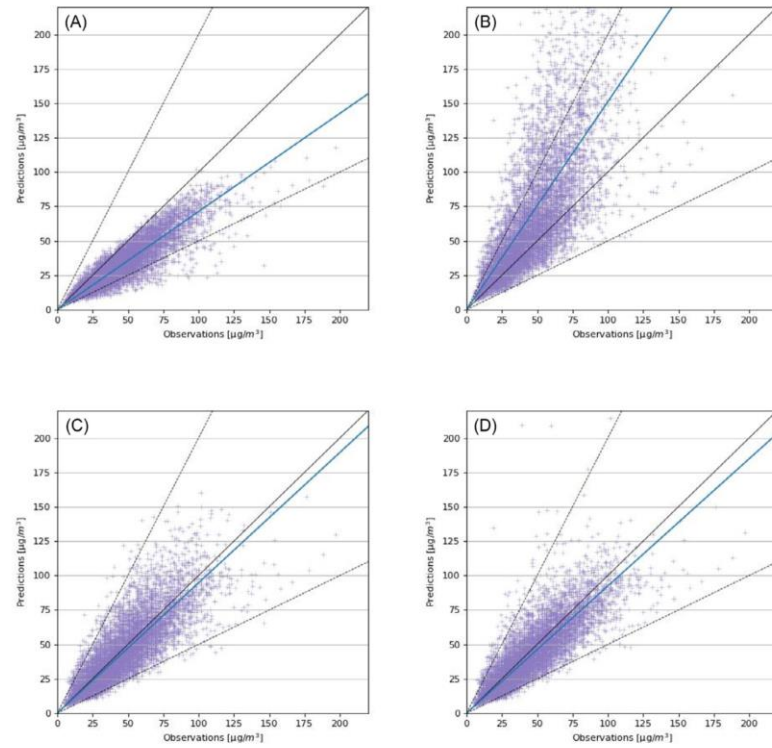


Fig. 8. Observed concentration vs. predicted concentration for (A) using background model (B) using background model + deep learning model with $[NO_x] = [NO_2]$ (C) using background model + Bächlin function for $[NO_x]/[NO_2]$ ratio (D) using background model + deep learning model with PSS for $[NO_x]/[NO_2]$ ratio for the daytime and Bächlin function for the nighttime. In black the first bisector, in teal the linear regression, in dotted line $\pm 50\%$ bisector.

X. Jurado et al.

Sustainable Cities and Society 99 (2023) 104951

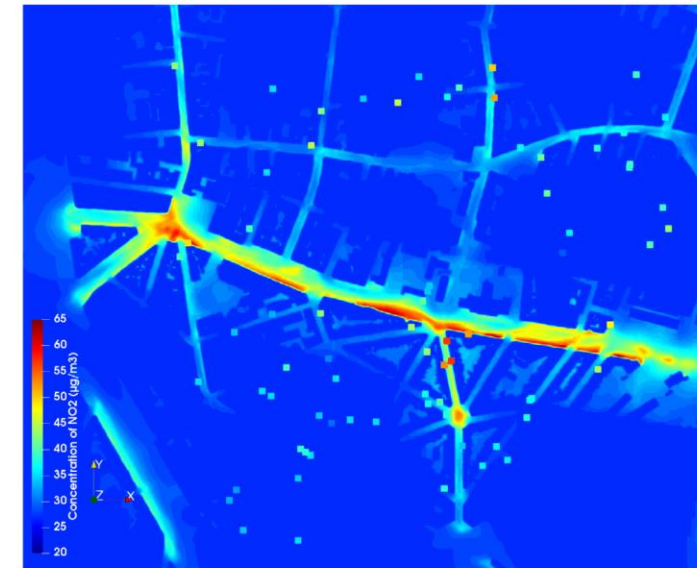


Fig. 12. The dispersion map displays the average NO_2 concentrations obtained using the deep learning model and Bächlin function for the period between April 30th and May 28th in the area of interest at a height of 4.5 m. Additionally, the concentrations measured by the samplers are also presented for comparison.

MODÉLISATION PAR INTELLIGENCE ARTIFICIELLE : UN OUTIL INNOVANT



<https://rtm.follow-air.com/fr/pollutantRealTime>

