

Cartes en haute résolution spatiale des PM_{2.5} à partir des capteurs mobiles du réseau Pollutrack : l'exemple de Paris

E. Poincelet², J.-B. Renard¹, C. Marchand²

¹ Laboratoire de Physique et Chimie de l'Environnement, CNRS, Orléans, France

² Pollutrack SAS, Paris



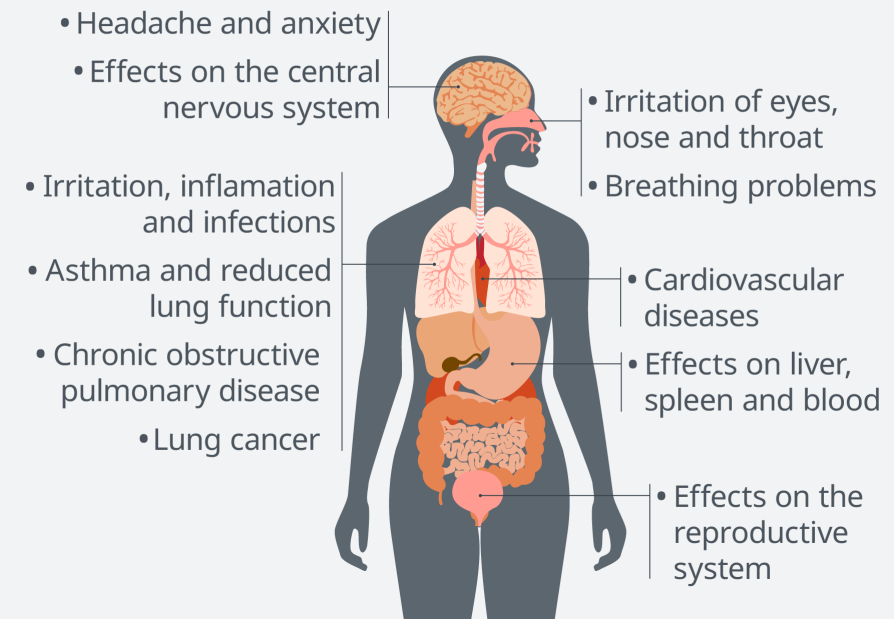
LA RÉPARTITION DE LA POLLUTION EST HÉTÉROGÈNE

IL FAUT MESURER POUR COMPRENDRE,
IL FAUT COMPRENDRE POUR AGIR.

- Les particules fines inférieures à $2.5\text{ }\mu\text{m}$ ont un fort impact sanitaire :
 - Maladies à « court terme » : Asthme, crises cardiaques, AVC, infections respiratoires incluant la Covid19 ...
 - Maladies à long terme : Cancer, Diabète, Alzheimer, ...
- Nécessité de mesurer les concentrations (en masse et en nombre) des PM2.5 avec la meilleure résolution spatiale possible, afin d'évaluer l'exposition des populations au long de la journée



Health effects of air pollution



PLUS C'EST FIN, PLUS C'EST DANGEREUX

LES PM (« PARTICULATE MATTER ») SONT INVISIBLES ET INODORES

Composition :

- Suie
- Particules minérales
- Particules métalliques oxydantes
- Composés organiques volatils (odeurs)
- Bactéries, virus
- Ammoniac
- Nitrates
- Soufre
- Chlore
- Eau



Organisation
mondiale de la Santé

Recommandations OMS
(mises à jour en 2021) :

$5 \mu\text{g}/\text{m}^3$
moyenne annuelle

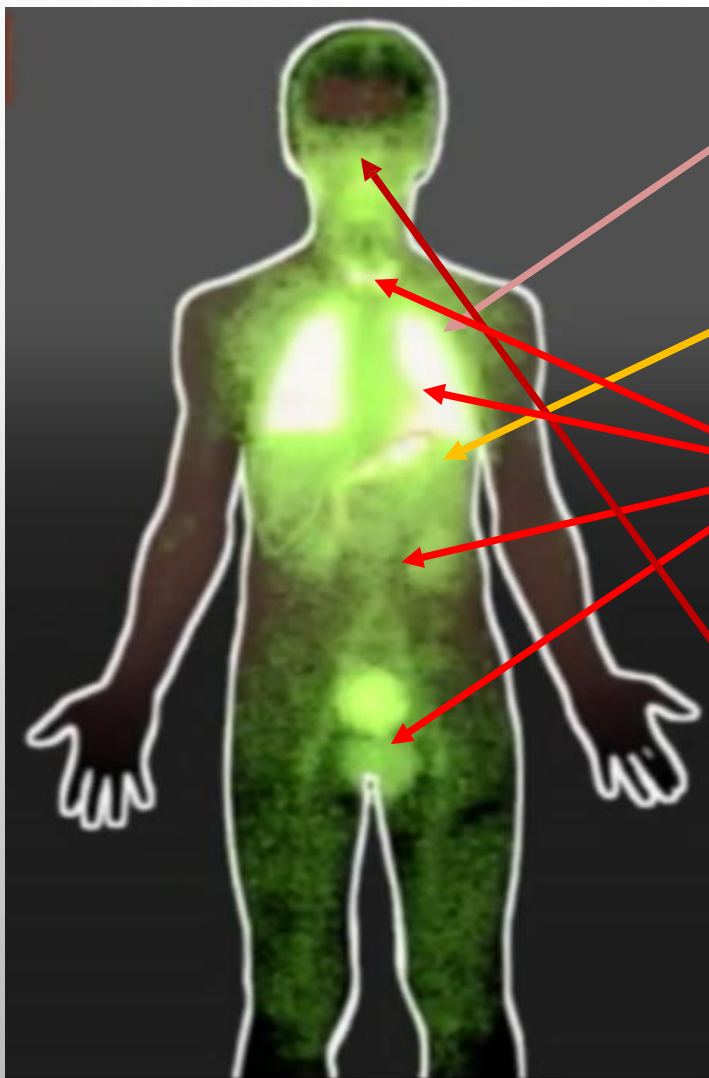
$15 \mu\text{g}/\text{m}^3$
moyenne journalière max

50 fois plus petit
qu'un cheveu :
totalement invisible



Diffusion dans le
corps humain





Les particules plus grossières (PM10) restent bloquées dans la partie supérieure des poumons

Les particules fines PM2.5 ($<2.5\mu\text{m}$) pénètrent la partie inférieure des poumons (effets immédiats + de long terme)

Les particules très fines ($<1\mu\text{m}$) traversent la barrière alvéolo-capillaire et passent dans notre sang où ils atteignent le cœur, le système nerveux, le système digestif et reproductif, la thyroïde...

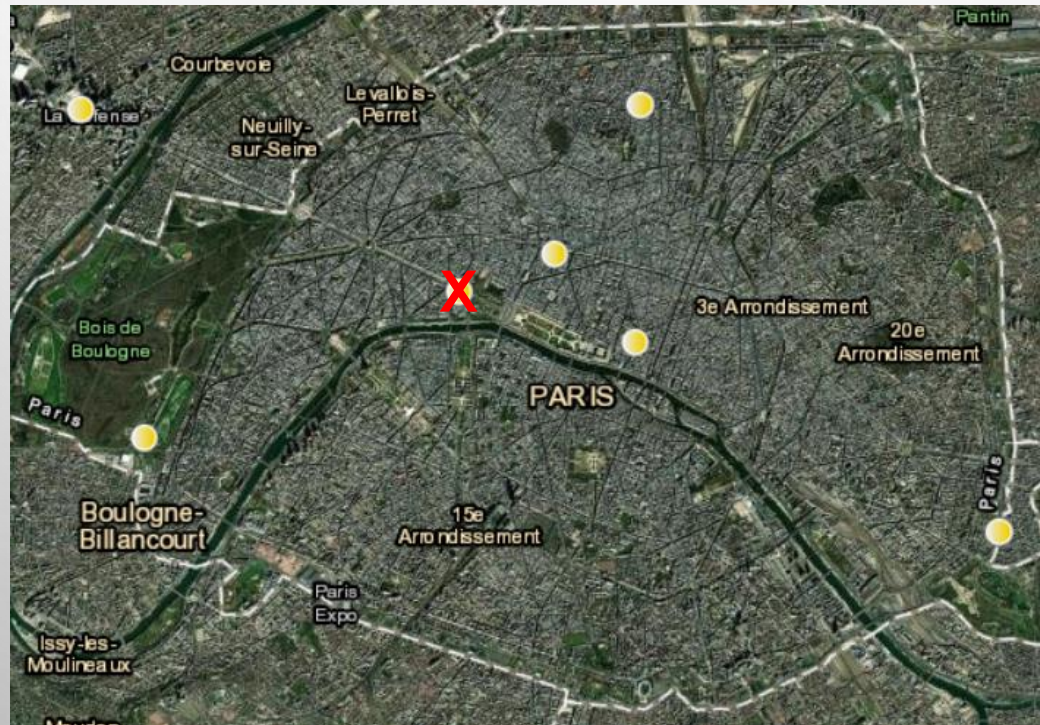
Les particules ultra-fines ($<0.1\mu\text{m}$) traversent la barrière hémato-encéphalique et créent des troubles neurodégénératifs irréversibles.

Pour comparaison:
Taille d'un globule rouge = $6\mu\text{m}$



L'exemple de Paris

- Peu de sources industrielles locales, mais des sources multiples de PM_{2.5} liées au trafic, aux transports en commun, aux chantiers, au chauffage, et à la pollution importée
- Actuellement 5 stations d'Airparif pour les PM_{2.5} (et non 6 comme sur la carte officielle), mais des zones entières non couvertes : toute la rive gauche et l'est parisien
- Nécessité de mesures complémentaires pour étudier la variabilité spatiale et valider les modèles de transport et d'évolution des aérosols

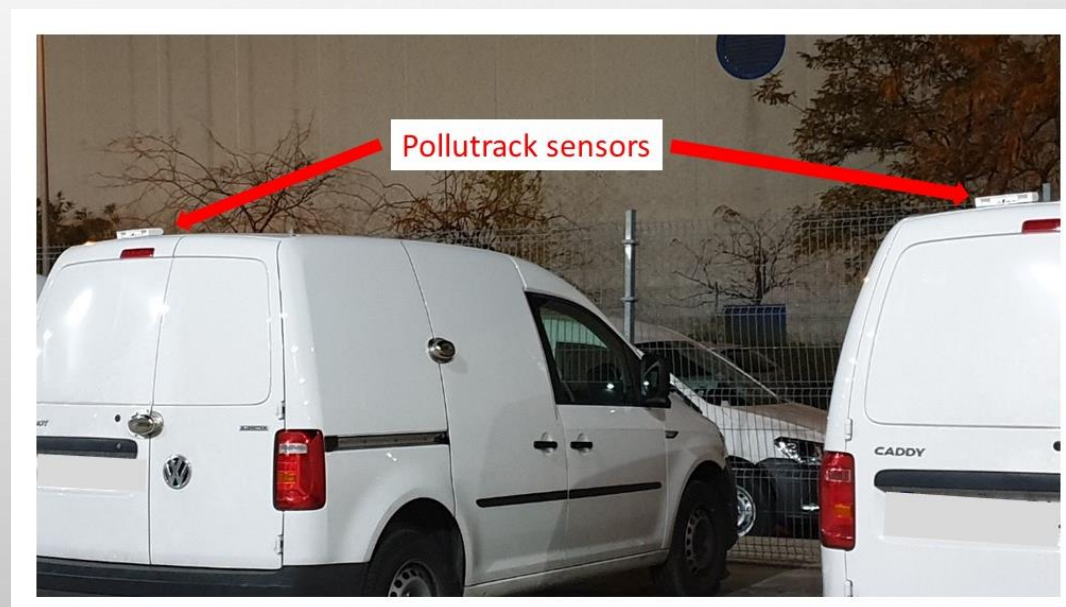
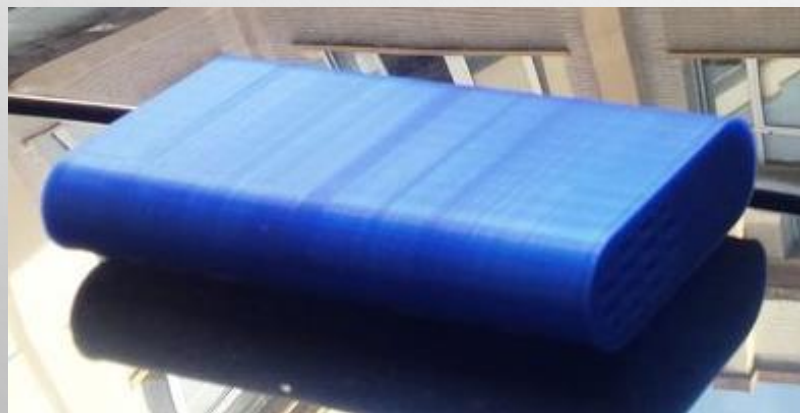


*Stations PM_{2.5}
d'Airparif*

Réseau Pollutrack

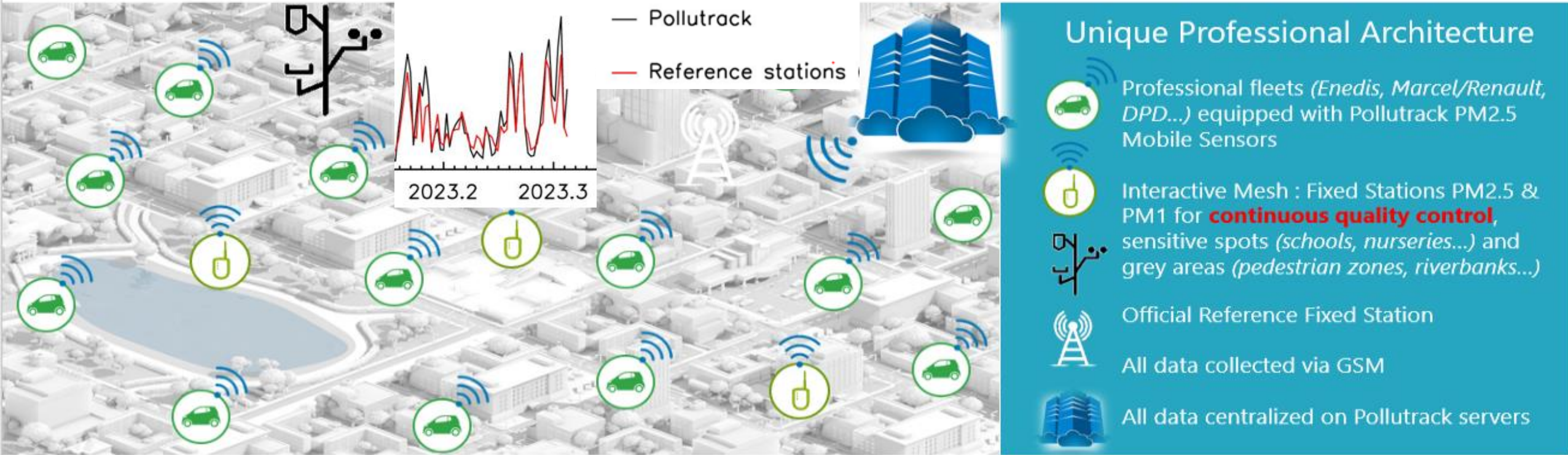


- Capteurs optiques mobiles montés sur le toit de plusieurs centaines de véhicules électriques : Enedis et VTC Marcel depuis 2018, puis Geopost/DPDgroup depuis 2019 (#1 européen de la livraison de colis)
- Optimisés pour des vitesses de prélèvement < 50 km/h
- Stations Fixes en triple redondance (*trois lasers en autocheck*) pour le contrôle des mesures par inter-comparaison plurijournalière à chaque passage d'un capteur mobile à proximité d'une station fixe
- Concentrations massiques pour les PM₁, PM_{2.5}, PM₁₀ ; concentrations en nombre pour 5 gammes de tailles entre 0,3 et 10 µm



Technical Implementation

Unique Professional Architecture & dense meshing between Mobile Sensors and Fixed Stations

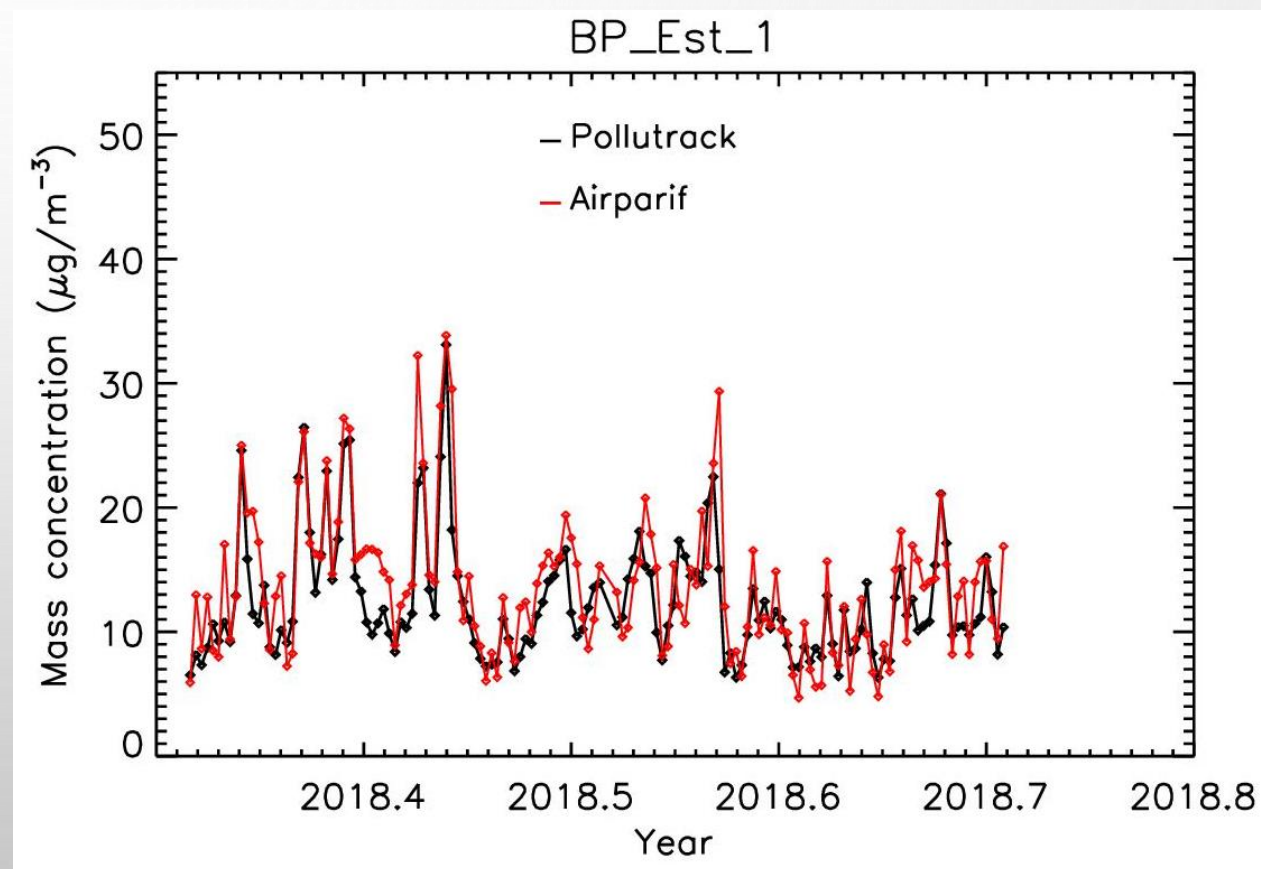


- **Daily Loop Quality Control** between Mobile Sensors and Fixed Stations
- Fixed Stations in **Triple Redundancy**: 3 lasers in autocheck mode

- **Validation des mesures : campagnes en 2018 d'inter-comparaison sur différents sites avec le concours d'Airparif et de la mairie de Paris**
- **Très bon accord, les mesures Pollutrack respectent les normes de « mesures indicatives »**

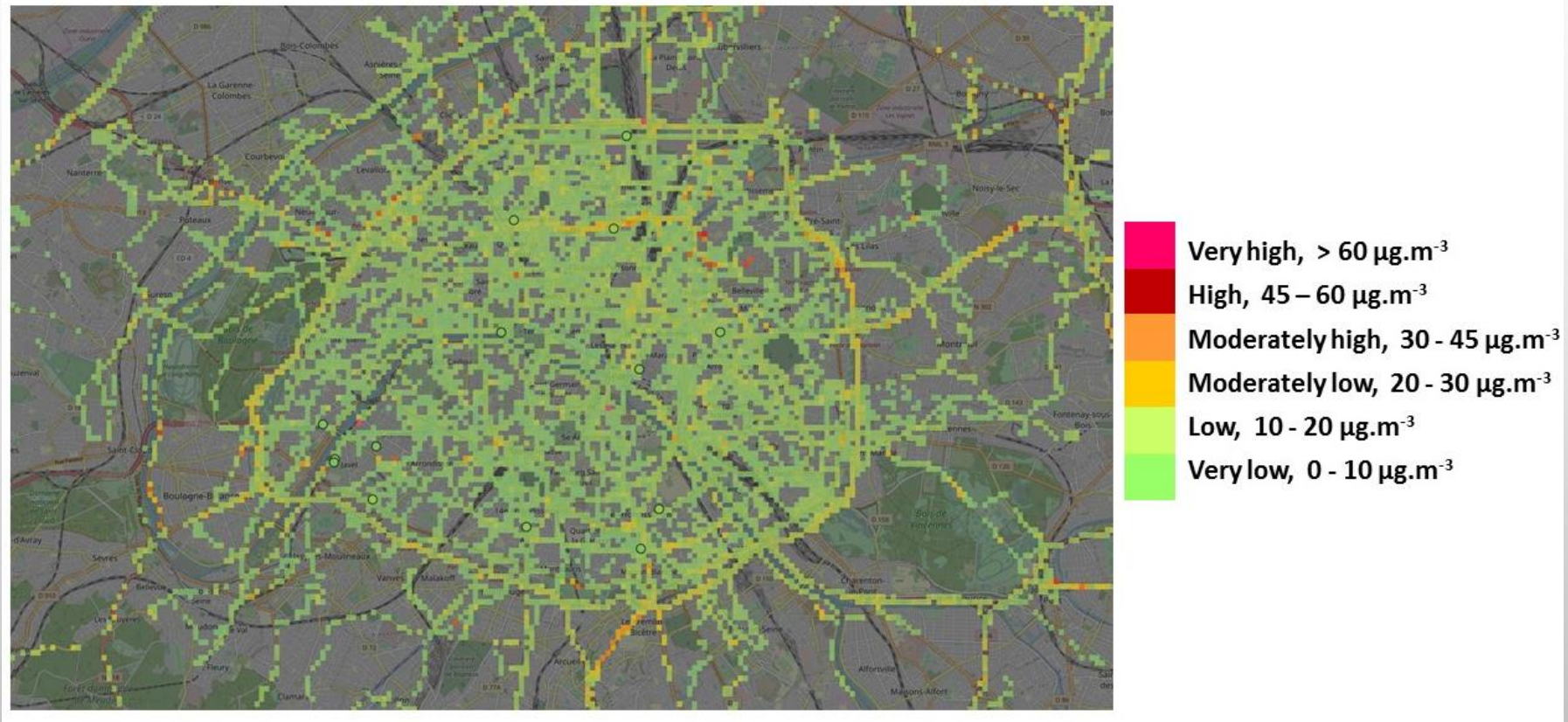


Station Airparif BP Est



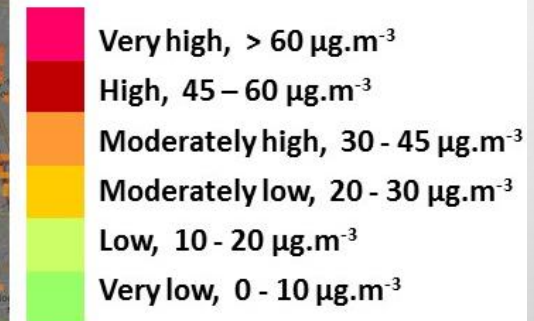
Données mobiles agrégées quotidiennement sur des carrés de 100 m de coté

- Exemple d'un jour de faible pollution (1 juillet 2020)

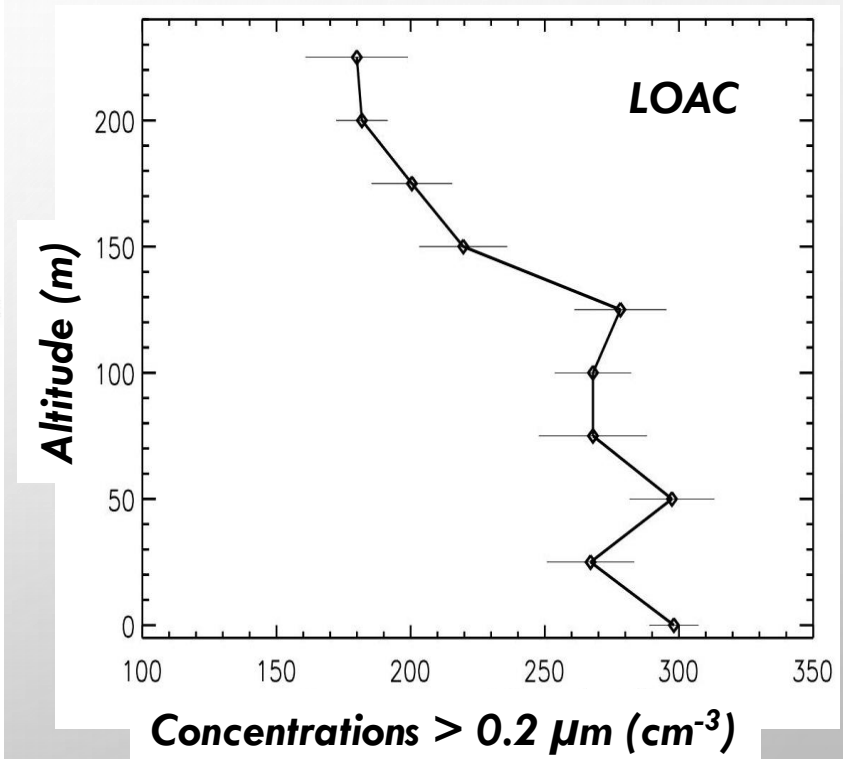
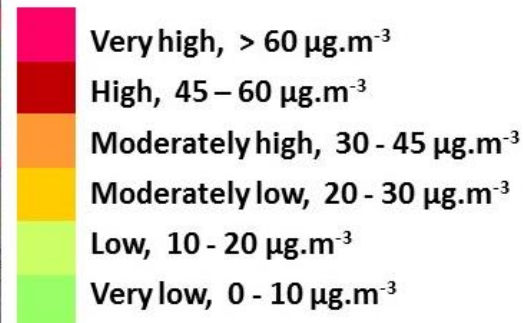
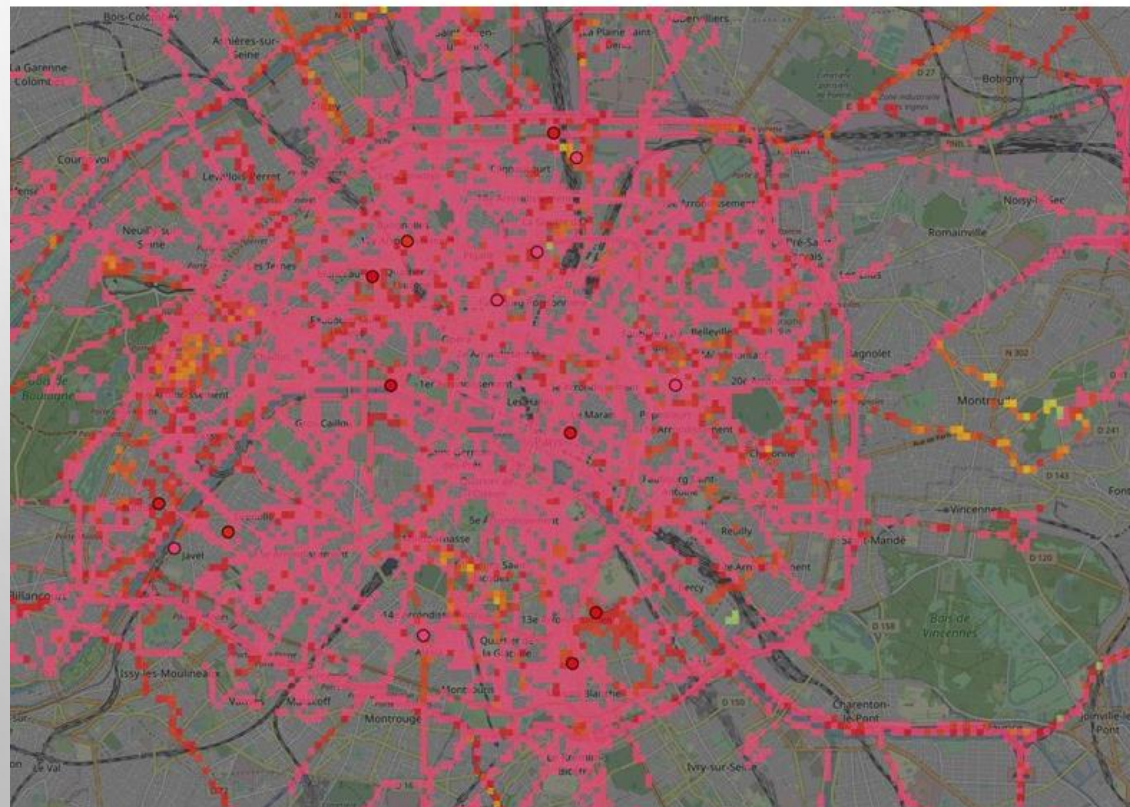


*Extrait de Renard et Marchand, High Resolution Mapping of PM_{2.5} Concentrations in Paris (France)
Using Mobile Pollutrack Sensors Network in 2020, Atmosphere, 12, 529. 2021*

- Moyennes pour le 26-28 mars durant le 1^{er} confinement lié au Covid-19, lors d'un épisode de pollution (*activités agricoles et incinérateurs*) lié à une situation anticyclonique
- Variabilité des concentrations jusqu'à un facteur 5

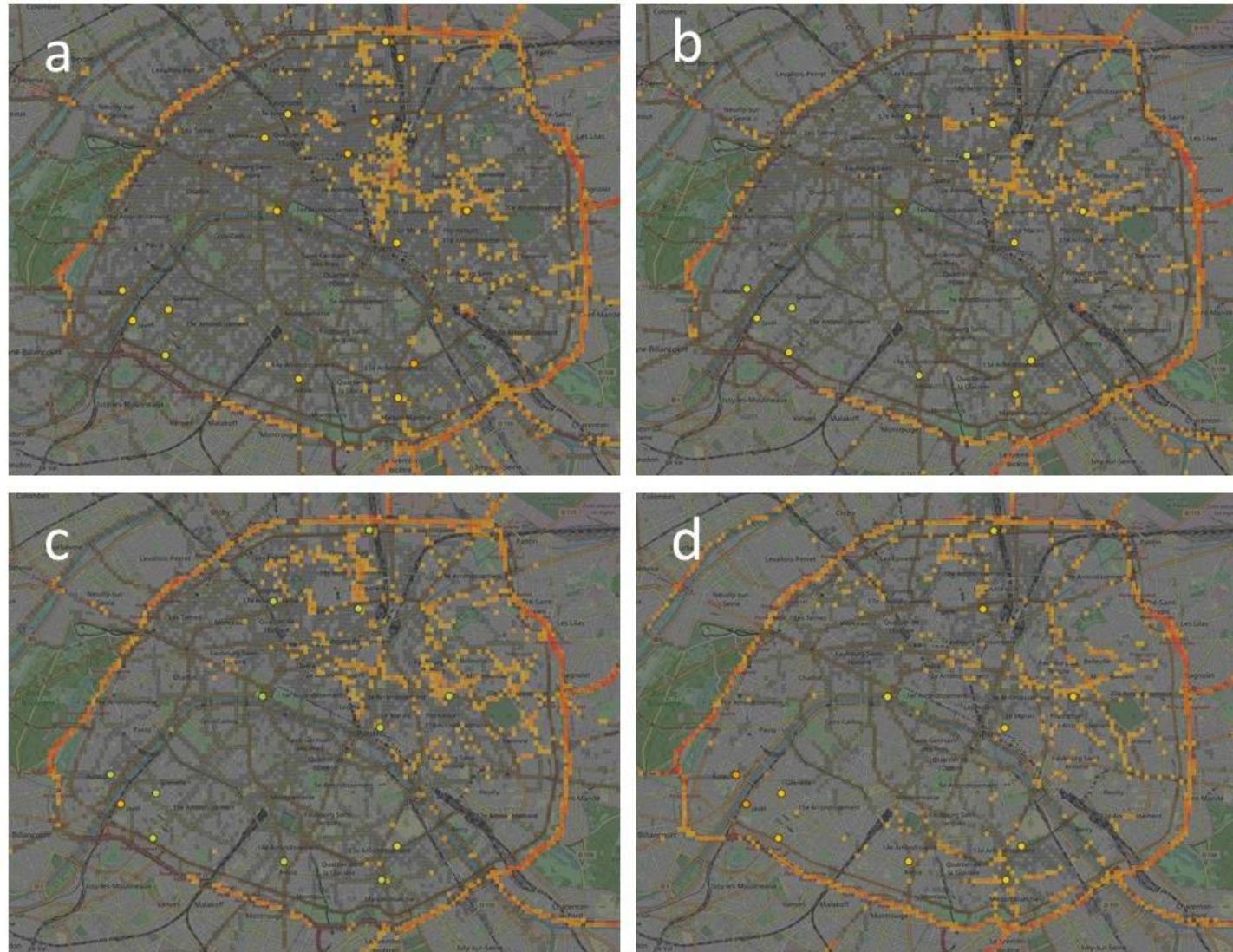


- Exemple de pollution hivernale, 25 janvier 2020 (couche d'accumulation jusqu'à 150 m d'altitude confirmée par les mesures du mini-compteur d'aérosols LOAC au Ballon de Paris, Parc André Citroën)



Zones d'excès récurrents (par rapport à la moyenne) de PM2.5

- Excès sur le périphérique (comme attendu) mais aussi dans l'est de Paris
- Sources locales, « points chauds » plus ou moins temporaires, rues canyons

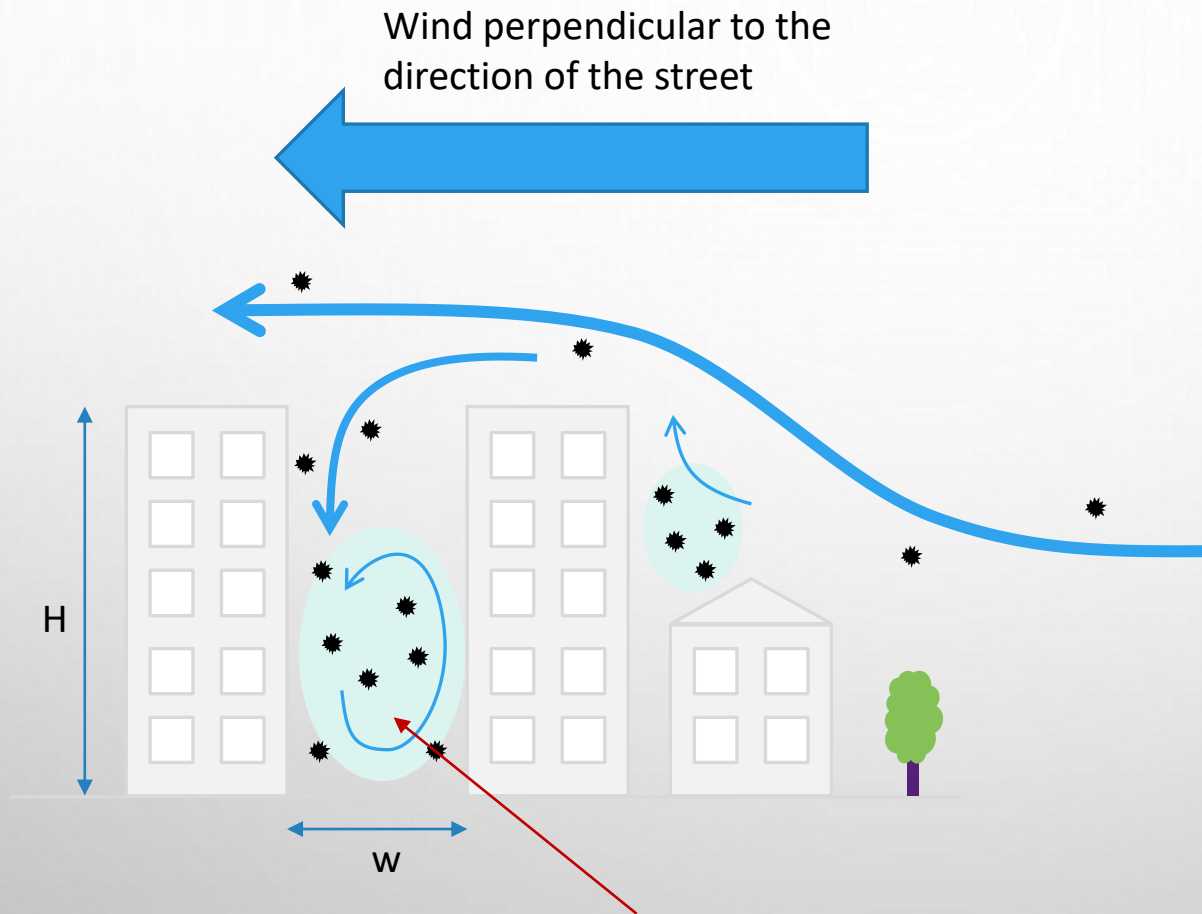


Orange: > Moyenne 50% du temps

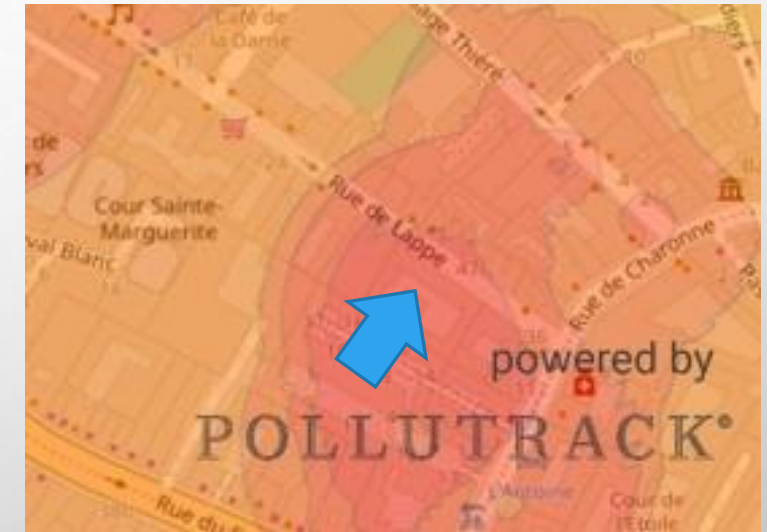
Rouge: > Moyenne 100% du temps



Canyon Streets



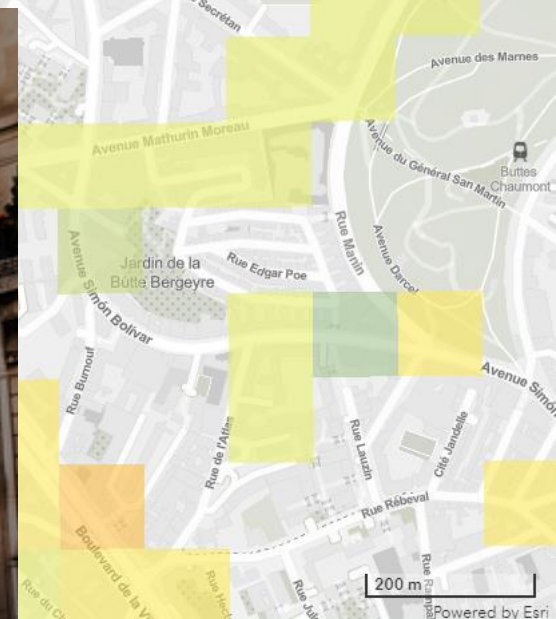
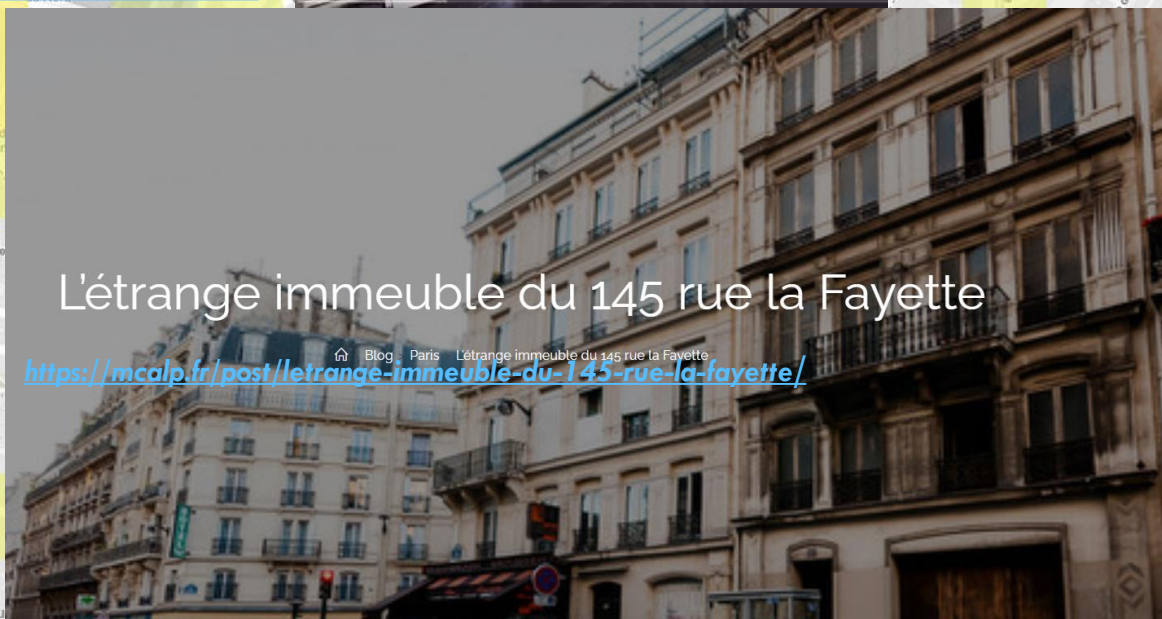
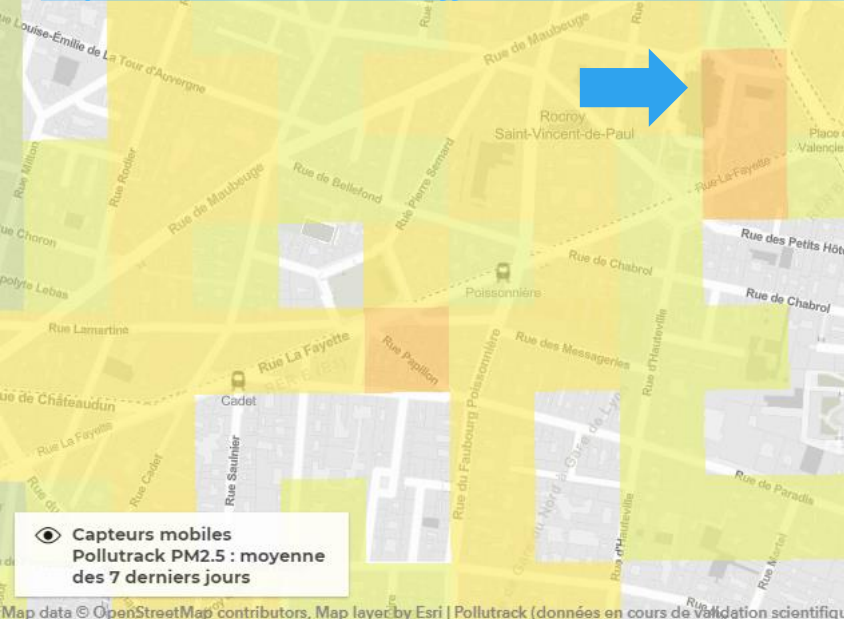
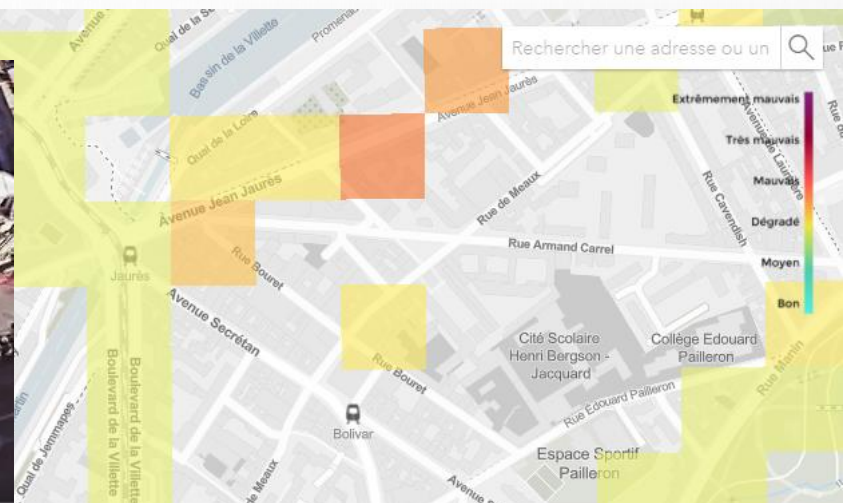
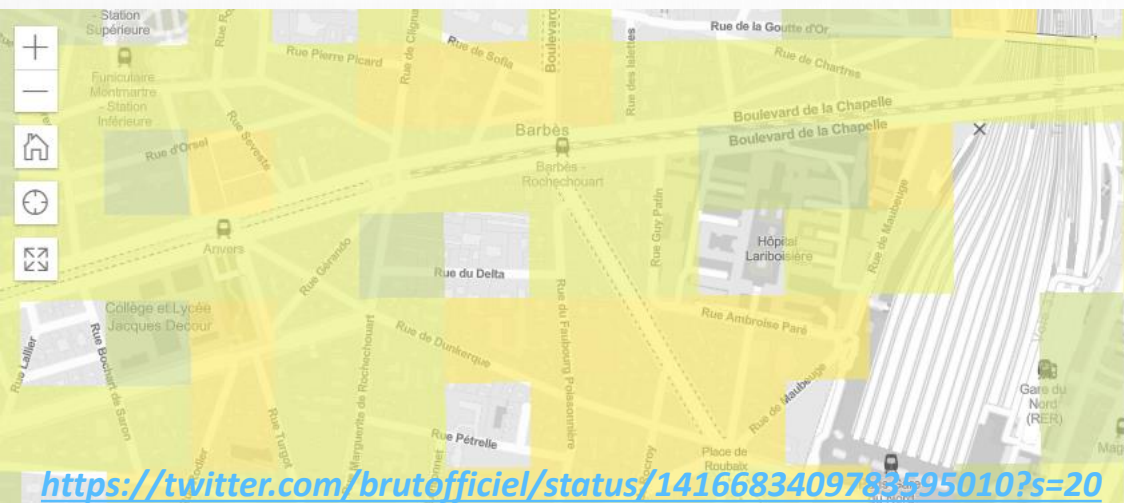
Pollutrack measures a higher pollution level in narrow streets perpendicular to the direction of the wind.



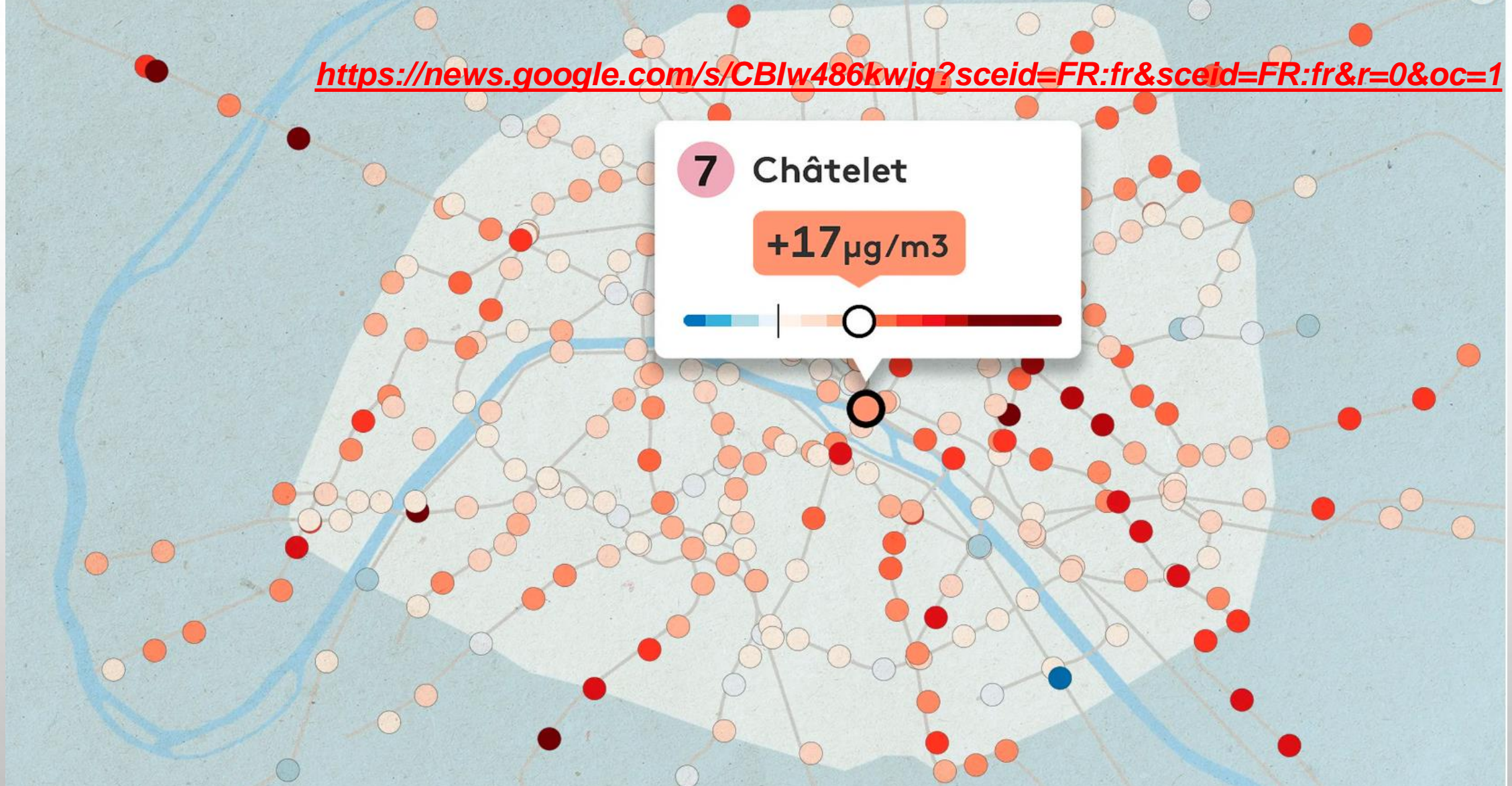
Canyon Street (Height $> 2 \times$ Width):
Particles are « trapped » between the buildings.
They cannot be pushed away and escape -> accumulation.

PARIS THIS WEEK

Etat de la qualité de l'air à Paris



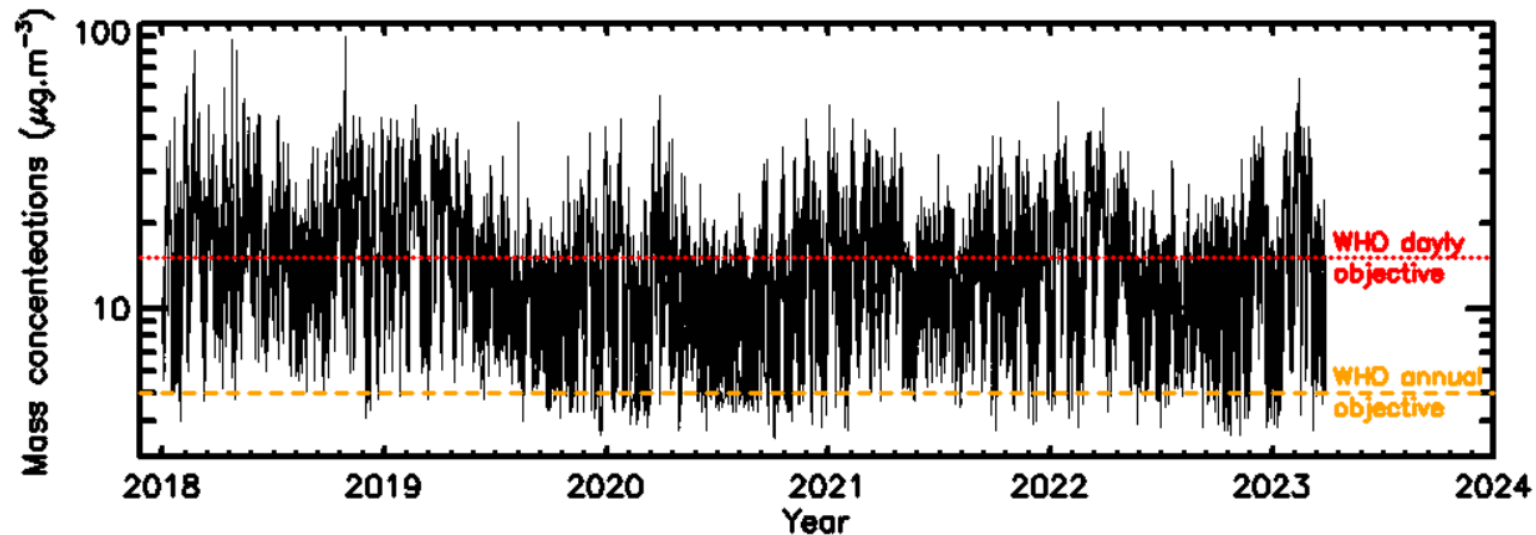
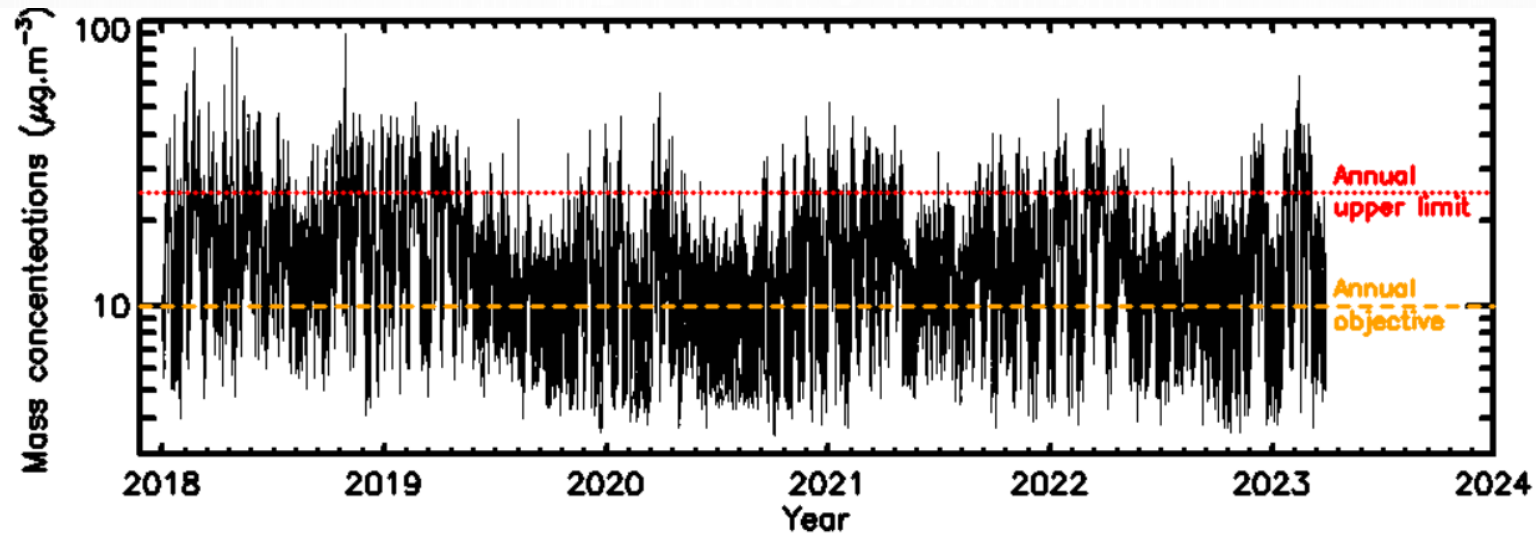
<https://news.google.com/s/CBlw486kwjg?sceid=FR:fr&sceid=FR:fr&r=0&oc=1>



Pendant **8 mois**, l'équipe de Vert de Rage a mesuré les niveaux de particules fines dans le réseau de transport en commun de Paris et sa petite couronne, en heure de pointe : du lundi au vendredi entre 18h et 20h, hors journées de grève. **Sur les 435 quais des 332 stations de métros et RER** (hors zone 3, 4 et 5), dont **392 quais souterrains**.

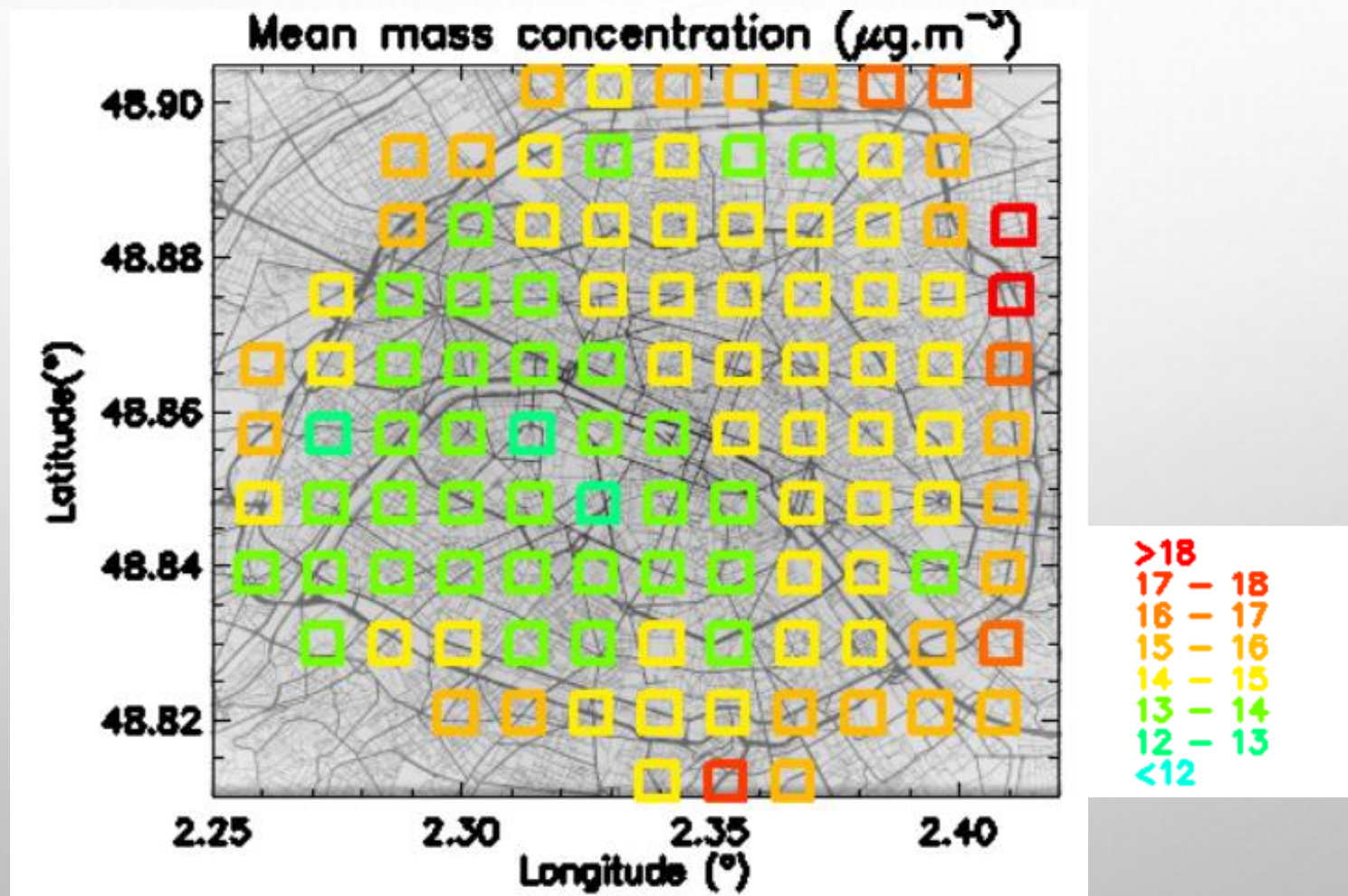
5 ans de données POLLUTRACK (2018-2023)

- Cycles saisonniers, mais aussi variabilité interannuelle



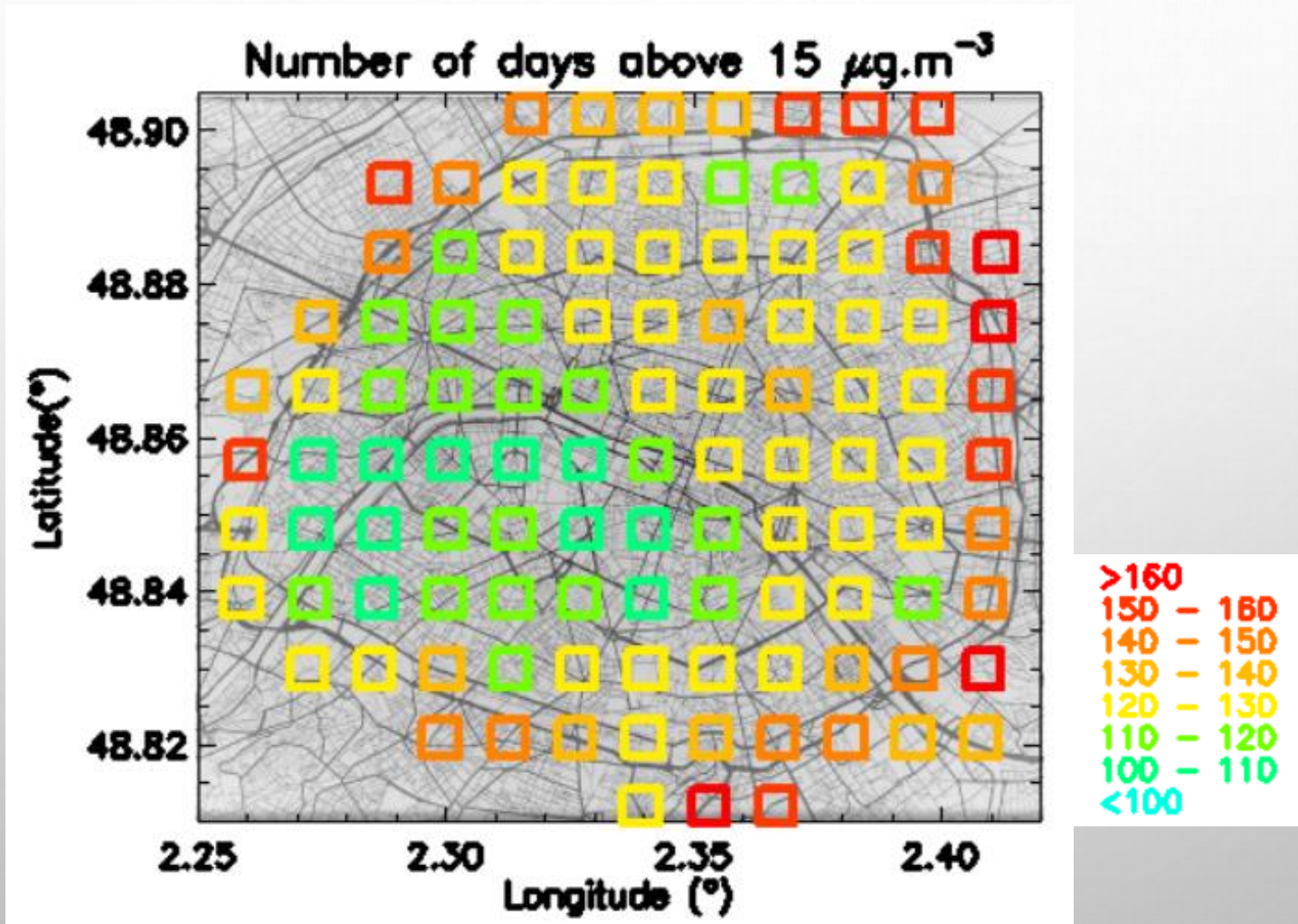
Moyenne des PM2.5 2018-2023 (carrés de 1000m)

- Excès de concentrations dans le nord et l'est de Paris et le long du périphérique
- Points chauds permanents: - Triangle « périphérique – A6a – A6b »
- Portes de Bagnolet et des Lilas – A3

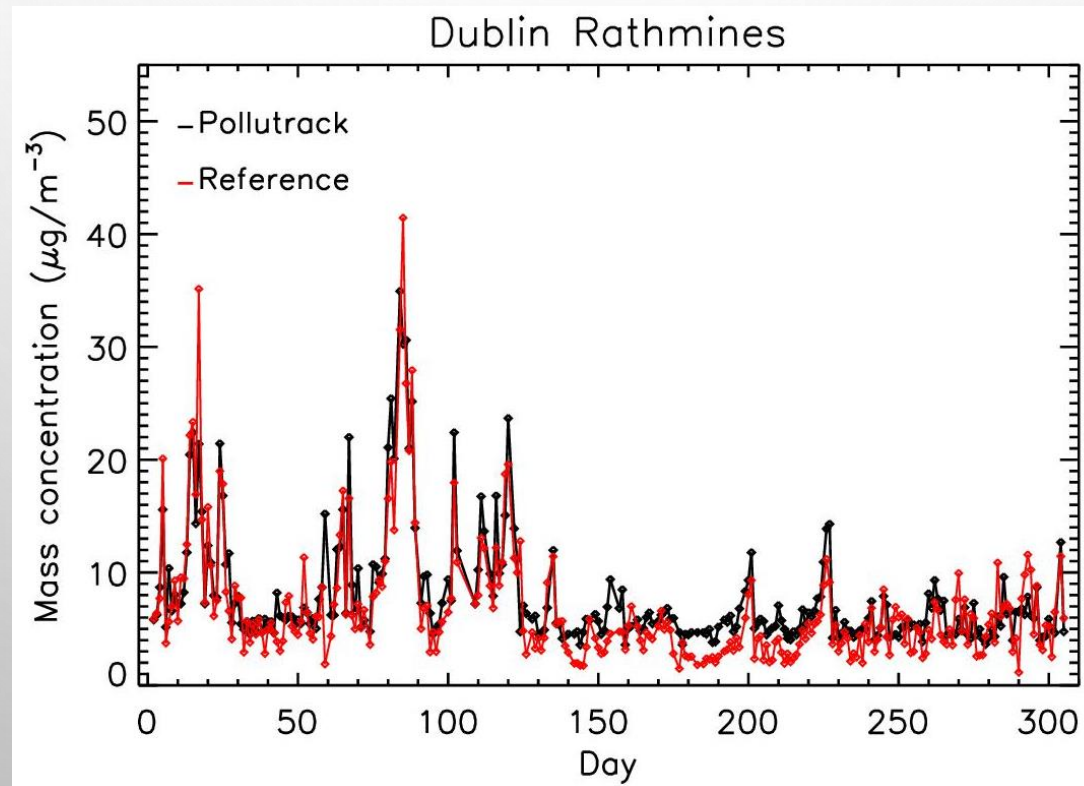


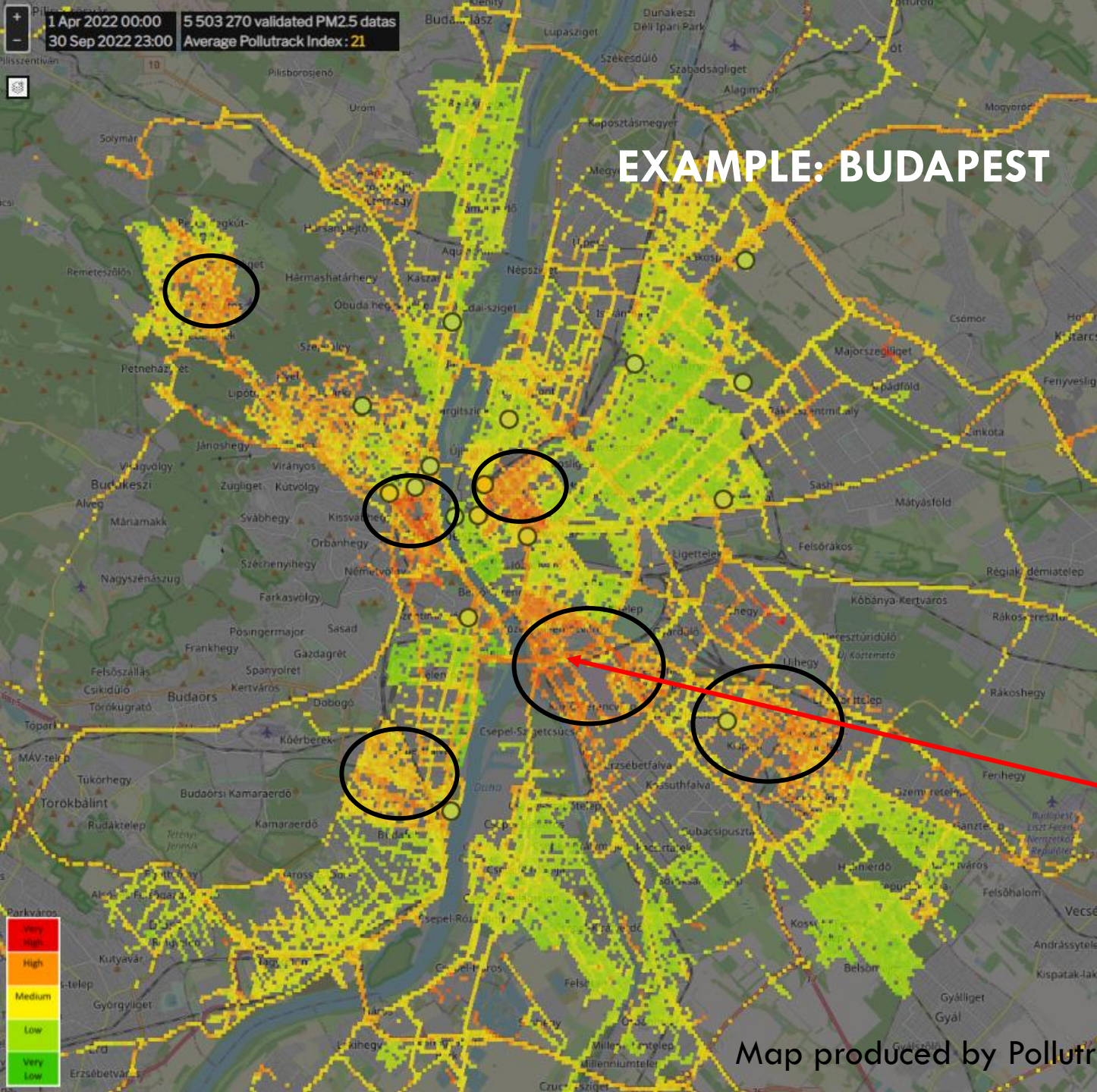
Dépassement du seuil journalier de l'OMS ($15 \mu\text{g.m}^{-3}$)

- En moyenne de 3 mois à 6 mois en fonction du lieu dans Paris
- Dépendance en fonction de l'année (*plus fortes valeurs en 2018 et 2021*)

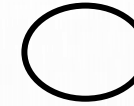


- **Pollutrack est déployé dans plus de trente capitales et grandes métropoles européennes (*Dublin, Madrid, Londres, Birmingham, Rotterdam, Hambourg, Francfort, Genève, Budapest, Bruxelles, Zurich, Berlin...*)**
- **Nombreux projets de recherche en cours pour l'utilisation de ces nouvelles bases de données**
- **L'exemple de Dublin:**
Vérification des données par comparaison à 3 stations de référence (*dont l'Environment Protection Agency, EPA*) de la qualité de l'air (*mêmes performances que pour Paris*)





PM2.5 Low Season: 21 $\mu\text{g}/\text{m}^3$



Areas most affected
even during the PM2.5 Low Season

Major Railway Interchange + Industrial Area



Map produced by Pollutrack

De telles cartes sont indispensables pour préparer les futurs aménagements urbains

- **Mieux comprendre l'effet de la topologie des villes sur la pollution aux particules fines**
- **Identification des points chauds et des rues canyon, plans de circulation, agencement des espaces verts et des espaces d'air, piétonisation des rues aux écoles particulièrement exposées etc.**
- **Suivis sur plusieurs années**



Covid-19 : plus de morts lors des pics de pollution

Une étude montre que les villes les plus polluées ont payé un tribut particulièrement élevé pendant l'épidémie

Jean-Baptiste Renard est convaincu. Si Paris ou la Lombardie, dans le nord de l'Italie, ont été très fortement affectées au plus fort de la pandémie de Covid-19, c'est qu'elles partagent un facteur aggravant : la piètre qualité de l'air que respirent leurs habitants. « Ce sont les villes les plus polluées qui ont connu les taux de mortalité les plus élevés », constate l'expert, directeur de recherche au CNRS au sein du Laboratoire de physique et de chimie de l'environnement et de l'espace. A contrario, des villes comme Bordeaux ou Brest, beaucoup moins polluées du fait de l'influence océanique, ont été largement épargnées. »

Dans une étude publiée début août dans la revue *Science of the Total Environment*, en collaboration notamment avec Isabella Annesi-Maesano, directrice de recherche à l'Inserm et spécialiste reconnue des questions de pollution de l'air, Jean-Baptiste Renard met en évidence une corrélation entre le niveau d'exposition aux particules fines (PM_{2,5}, de diamètre inférieur à 2,5 micromètres) et la mortalité due au Covid-19. Ce lien avait déjà été évoqué dans plusieurs travaux. L'originalité de cette publication réside dans sa capacité à quantifier le phénomène.

En s'appuyant sur le cas de Paris (le mieux documenté) et en l'élargissant à 31 autres villes et régions de six pays d'Europe de l'Ouest (France, Allemagne, Italie, Espagne, Pays-Bas et Royaume-Uni) sur 2020-2022, l'étude montre que les niveaux de mortalité les plus élevés sont constatés pendant les

pics de pollution et varient en fonction de leur intensité. Et dans des proportions considérables.

Sur la base de l'analyse de l'ensemble des données, les chercheurs sont parvenus à identifier une tendance : une augmentation de la mortalité de l'ordre d'un facteur de 5 est constatée lorsque les concentrations en PM_{2,5} flirtent avec les 45 microgrammes par mètre cube. Des niveaux atteints à Paris et en Lombardie. Les auteurs en déduisent une augmentation d'environ 10 % de la mortalité par microgramme par mètre cube de particules fines supplémentaires.

« Tempêtes épidémiques »

Cette tendance dépend de la période analysée : elle décroît logiquement avec le temps, à mesure que les autorités améliorent la gestion de l'épidémie (mesures de confinement puis vaccination). Pendant la première phase de propagation rapide de l'épidémie, la mortalité bondit d'environ 20 % par microgramme par mètre cube de PM_{2,5} supplémentaires à la suite des pics de pollution. Elle progresse tout de même de 10 % à chaque pic entre mai 2020 et mai 2021 et les différentes formes de confinement (total et partiel). Et d'environ 5 % après le déploiement massif de la vaccination.

L'exemple de Paris est saisissant tant les courbes de mortalité du Covid-19 et de la pollution se superposent. Lors de la première vague, au printemps 2020, en plein pic de « pollution printanière » (trafic automobile et épandages agricoles), le nombre de décès journaliers par million d'habi-



Visite chez une patiente atteinte du Covid-19, près de Codogno, dans le nord de l'Italie, en avril 2020. GABRIELE MACALIZZ/CEISUR POUR « LE MONDE »

tants a été décuplé, montant jusqu'à 20, soit une brusque augmentation d'un facteur d'environ 10. Lors des pics de pollution hivernaux et de début de printemps suivants, celui-ci s'établit entre cinq et sept décès journaliers.

« A chaque fois qu'on a un pic de pollution au-dessus de 15 à 20 microgrammes par mètre cube pendant une semaine, derrière, on observe une brusque montée de la mortalité », commente Jean-Baptiste Renard. L'étude suggère également un décalage de l'ordre d'une semaine entre le pic de l'épisode de pollution et celui de la mortalité. Le chercheur envisage une nouvelle étude, centrée sur Paris, pour affiner ce constat. D'autres études sont nécessaires pour explorer les mécanismes qui expliquent ce lien entre exposition aux particules fines et décès liés au Covid-19. Il est déjà établi que la pollution de l'air favorise

l'inflammation et diminue la réponse immunitaire de l'organisme face aux infections. « Une des hypothèses est que les particules fines altèrent les cellules de l'épithélium de l'arbre respiratoire et du tissu pulmonaire, facilitant la transmission des virus respiratoires comme ceux du Covid-19 ou de la grippe, et favorisant les formes graves et les complications de la maladie, donc les hospitalisations et les décès », détaille l'épidémiologiste Antoine Flahault.

Dans un article publié dès novembre 2020 dans la revue *Earth Systems and Environment* avec des collègues de l'université de Genève, Antoine Flahault avait montré une corrélation entre la survenue de pics de pollution et des brusques poussées de contaminations. Il évoquait alors des « tempêtes épidémiques ».

Pour éviter que ces « tempêtes » ne se reproduisent, en dépit de la

« Après chaque pic de pollution au-dessus de 15 à 20 µg/m³, on observe une brusque montée de la mortalité »

JEAN-BAPTISTE RENARD
chercheur au CNRS

vaccination, il faut que les autorités intègrent davantage la dimension pollution dans la gestion de la pandémie de Covid-19, recommandent les auteurs de l'article publié dans *Science of the Total Environment*. « Jusqu'ici, la question de la pollution, comme celle de l'aération des espaces publics, à commencer par les écoles, a été l'angle mort des politiques

sanitaires pour endiguer l'épidémie », commente Isabella Annesi-Maesano. De manière plus globale, pour l'ensemble des maladies cardio-pulmonaires, les résultats de cette étude rappellent à quel point il est primordial de mettre en place des politiques publiques capables de réduire significativement les niveaux de pollution dans les grandes villes. »

Au plus fort de la première vague de Covid-19 et en plein pic de pollution printanière, en avril 2020, avec une dizaine de médecins et de chercheurs du collectif Air/Santé/Climat, Isabella Annesi-Maesano avait notamment interpellé les préfets pour leur demander de « limiter drastiquement les épandages agricoles [source importante d'émissions de particules fines] afin de tout mettre en œuvre pour limiter la propagation du virus ». En vain. ■

STÉPHANE MANDARD

Des mesures dans 32 sites européens

L'étude publiée dans *Science of the Total Environment* se fonde sur l'analyse des données de pollution et de mortalité liées au Covid-19 de 32 sites répartis dans six pays d'Europe de l'Ouest. Certains correspondent à des villes (Paris, Hambourg, Madrid) et d'autres à des départements ou des régions (Lombardie, Brabant-du-Nord). Les sites ont été choisis pour être représentatifs des différents niveaux de pollution rencontrés en Europe. Les chercheurs ont retenu le seuil de 20 µg de particules PM_{2,5} par mètre cube d'air pour distinguer haut et bas niveau de pollution. Outre les relevés des stations de mesure des organismes de surveillance de la qualité de l'air, tel Airparif, l'étude s'appuie sur le réseau Pollu-track. Déployé à Paris, Madrid ou dans le Brabant-du-Sud, Pollu-track s'appuie sur des capteurs déployés à bord de voitures électriques. Les données de mortalité liées au Covid-19 proviennent quant à elles des agences nationales de santé et d'organisations indépendantes comme l'université John-Hopkins.

Des mesures dans 32 sites européens

L'étude publiée dans *Science of the Total Environment* se fonde sur l'analyse des données de pollution et de mortalité liées au Covid-19 de 32 sites répartis dans six pays d'Europe de l'Ouest. Certains correspondent à des villes (Paris, Hambourg, Madrid) et d'autres à des départements ou des régions (Lombardie, Brabant-du-Nord). Les sites ont été choisis pour être représentatifs des différents niveaux de pollution rencontrés en Europe. Les chercheurs ont retenu le seuil de 20 µg de particules PM_{2,5} par mètre cube d'air pour distinguer haut et bas niveau de pollution. Outre les relevés des stations de mesure des organismes de surveillance de la qualité de l'air, tel Airparif, l'étude s'appuie sur le réseau Pollu-track. Déployé à Paris, Madrid ou dans le Brabant-du-Sud, Pollu-track s'appuie sur des capteurs déployés à bord de voitures électriques. Les données de mortalité liées au Covid-19 proviennent quant à elles des agences nationales de santé et d'organisations indépendantes comme l'université John-Hopkins.

... ET POUR CONCLURE : ANIMATION PARIS

https://dashboard.pollutrack.com/video/Paris_2020-2023.mp4