

# PROJET ÉVALUATION DES RUES AUX ÉCOLES

## Rapport scientifique

Jean-Baptiste Renard

Conseil Scientifique de Respire

08 décembre 2023



# SOMMAIRE

|  |    |
|--|----|
| 1. PROPOS LIMINAIRE.....   | 3  |
| 2. OBJET DE L'ÉTUDE.....   | 3  |
| 3. CONDITIONS MÉTÉOROLOGIQUES.....                                     | 3  |
| 4. CONDITIONS DE MESURE.....   | 3  |
| 4.1. Mesure du dioxyde d'azote (NO <sub>2</sub> ).....                 | 3  |
| 4.2. Mesure des PM <sub>2,5</sub> .....                                | 4  |
| 4.3. Implantation des capteurs.....                                    | 5  |
| 4.4. État des rues.....  | 5  |
| 5. RÉSULTATS PAR ÉTABLISSEMENT.....                                    | 7  |
| 5.1. Rues non piétonnisées.....  | 7  |
| 5.2. Rues déjà piétonnisées.....                                       | 10 |
| 5.3. Rues piétonnisées ou apaisées entre les deux campagnes.....       | 12 |
| 5.4. Rues en cours de piétonnisation pendant la deuxième campagne..... | 14 |
| 6. ANALYSE DU NO <sub>2</sub> .....                                    | 17 |
| 7. ANALYSE DES PM <sub>2,5</sub> .....                                 | 18 |
| 8. CONCLUSIONS.....  | 20 |

## 1. PROPOS LIMINAIRE

Ce rapport se base sur les mesures effectuées par les sociétés *Rincent Air* et *Pollutrack*, et reprend certaines figures des rapports *Évaluation de l'impact du dispositif sur la qualité de l'air* rédigé par Valentin Legouge (*Rincent Air*), et *Évaluation de l'impact des rues aux écoles sur la qualité de l'air et de son acceptabilité par la population* rédigé par Jérémy Surcin (*Pollutrack*).

## 2. OBJET DE L'ÉTUDE

Cette étude appelée *Évaluation des rues aux écoles* consiste à évaluer les effets de la piétonnisation des rues devant des établissements scolaires, avec l'objectif d'améliorer la qualité de l'air.

Deux campagnes de mesures sur les concentrations en  $\text{NO}_2$  et en  $\text{PM}_{2.5}$  ont été menées pour 10 établissements scolaires, afin de mettre en évidence une possible diminution de ces deux polluants une fois les rues piétonnisées. Les deux campagnes de  $\text{NO}_2$  ont eu lieu du 14 au 28 juin 2023 et du 21 septembre au 6 octobre 2023. La campagne de  $\text{PM}_{2.5}$  a eu lieu en continu du 14 juin 2023 au 30 avril 2024.

## 3. CONDITIONS MÉTÉOROLOGIQUES

Les niveaux de pollution au  $\text{NO}_2$  et aux  $\text{PM}_{2.5}$  peuvent être liés aux conditions météorologiques. Une situation anticyclonique stationnaire favorise une augmentation des niveaux de pollution, tandis que des conditions venteuses entraînent une dispersion rapide des polluants et donc une diminution de leurs niveaux.

Les conditions météorologiques vont changer durant et entre les deux campagnes, ce qui impliquera un processus de normalisation des mesures afin de pouvoir effectuer des comparaisons entre les différentes périodes. Un résumé de ces conditions est donc nécessaire.

Le mois de juin a débuté avec des conditions anticycloniques sèches et un faible vent. Une période d'instabilité a eu lieu du 17 au 22 juin, caractérisée par une activité orageuse marquée et donc une baisse de la concentration en particules fines. Du 23 juin au 21 juillet, la période est

restée majoritairement sèche, à l'exception de quelques jours orageux. De petits pics de pollution aux particules fines ont été détectés entre fin juin et début juillet 2023 de manière sporadique en fonction de la position des écoles, provenant des échauffourées qui se sont déroulées à Paris durant cette période.

Une nouvelle phase instable est survenue entre le 22 juillet et le 5 août avec des orages fréquents, entraînant de faibles valeurs de pollution. Ces valeurs ont légèrement augmenté entre le 6 et le 10 août lors de conditions plus sèches et moins venteuses. Les orages sont revenus du 11 au 14 août. Puis, du 15 août au 2 septembre, un temps sec accompagné d'un vent modéré a à nouveau limité les niveaux de pollution. Après le 2 septembre et jusqu'au 15 septembre, des conditions anticycloniques sèches et stationnaires ont entraîné une nouvelle période de pollution modérée, avec quelques pics au cours de cette période, ainsi qu'un épisode de sable saharien.

Une nette baisse de la pollution a été enregistrée du 17 au 25 septembre, avec un flux océanique venteux et pluvieux. Enfin, des conditions plus sèches ont prédominé du 26 septembre au 13 octobre, entraînant une augmentation progressive de la pollution de l'air.

## 4. CONDITIONS DE MESURE

### 4.1. Mesure du dioxyde d'azote ( $\text{NO}_2$ )

Les mesures du dioxyde d'azote sont réalisées par des capteurs (tubes) à diffusion passive (**figure 1**), conformément à la norme NF EN 16339. Le principe du prélèvement est celui de la diffusion naturelle de l'air à travers une cartouche contenant un adsorbant spécifique au  $\text{NO}_2$  (triéthanolamine). Le débit de diffusion étant connu, la masse de polluant détectée sur le capteur à l'issue de la période d'exposition permet de calculer sa concentration dans l'air ambiant. Les capteurs sont placés à l'intérieur de boîtes afin de les protéger de la pluie et du vent. Les boîtes sont ensuite fixées en hauteur sur les supports verticaux disponibles sur le domaine public (poteaux, candélabres...). Après une période d'exposition de 2 semaines, les capteurs sont récupérés et envoyés en laboratoire pour extraire la masse piégée et doser le  $\text{NO}_2$  par spectrométrie UV.

Les analyses sont réalisées par le laboratoire suisse

Passam Ag accrédité ISO 17025 (STS149). Cette méthode de prélèvement et d'analyse permet de mesurer une gamme de concentrations en  $\text{NO}_2$  de 1 à  $200 \mu\text{g}/\text{m}^3$  avec une limite de quantification de  $0,6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ .



figure 1.1 : échantillonneur de  $\text{NO}_2$ .



figure 1.2 : boîte de protection installée à l'école Championnet.

## 4.2. Mesure des $\text{PM}_{2,5}$

Les mesures de particules fines ( $\text{PM}_{2,5}$ ) sont réalisées à l'aide d'un capteur développé par l'entreprise Pollutrack basé sur le principe du comptage optique. Le capteur contient trois têtes de comptage en autocontrôle (triple redondance) permettant de vérifier en permanence la fiabilité de la mesure. Le capteur est relié par GSM multi-opérateurs à l'architecture de données Pollutrack permettant la remontée, le traitement et la visualisation des données

en temps réel avec une mesure toutes les 30 secondes.

Les instruments fournissent les concentrations pour 5 gammes de tailles entre  $0,3$  et  $10 \mu\text{m}$ , qui servent au calcul des concentrations massiques ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ). La présence de l'humidité est prise en compte dans la conversion comptage-masse.

L'instrument peut être installé sur un support fixe, mais aussi sur des véhicules des partenaires DPD/Geopost et Enedis (figure 2). Le réseau Pollutrack couvre une trentaine de villes principales en Europe dont Paris. La précision de mesure est de l'ordre de  $1 \mu\text{g}/\text{m}^3$  pour des valeurs supérieures à  $4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ .



figure 2.1 : capteur Pollutrack fixe à l'école Championnet.



figure 2.2 : capteur Pollutrack sur le toit d'un véhicule.

### 4.3. Implantation des capteurs

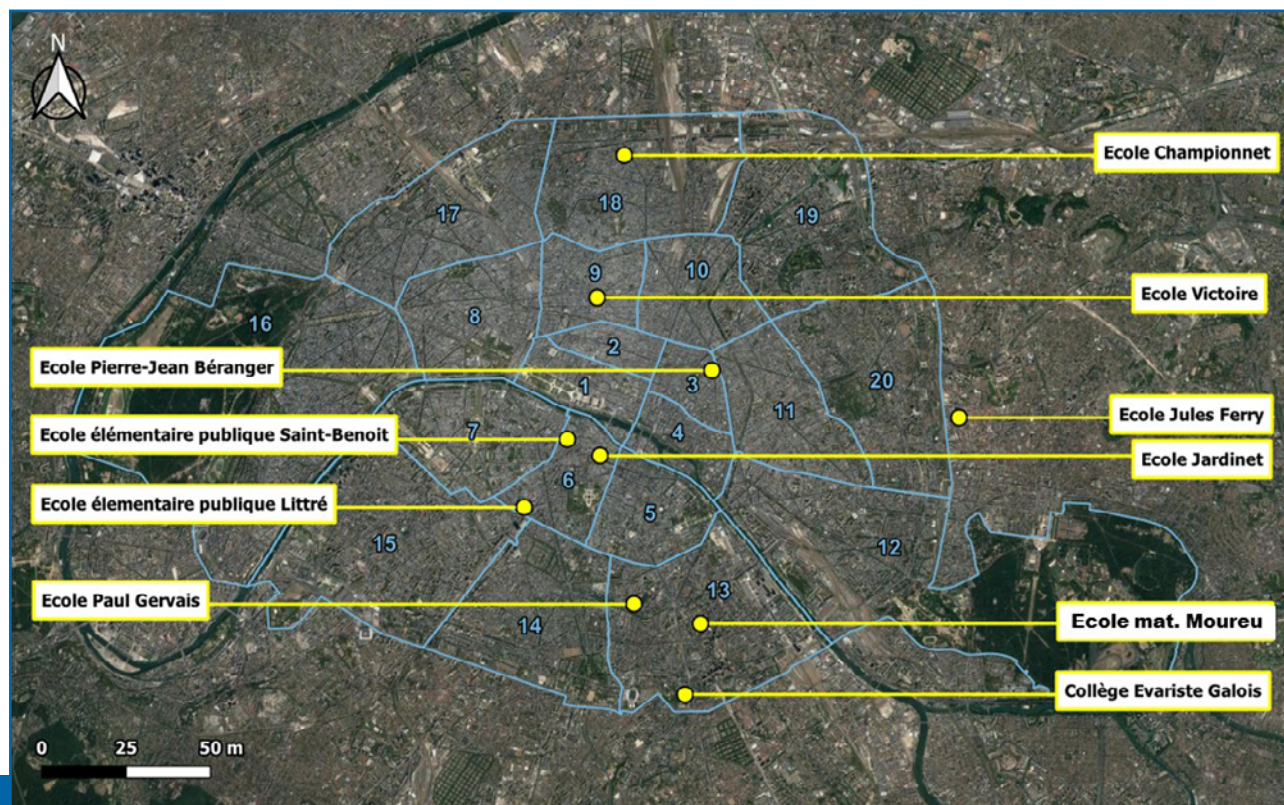
Cinq capteurs de NO<sub>2</sub> sont installés par école : un dans la cour, un dans une salle de classe, un en façade du bâtiment, et deux au niveau des deux premières intersections avec les rues non piétonnisées. Afin d'augmenter la statistique des points de mesures lors de l'analyse, les résultats des capteurs de la cour et de la salle de classe seront regroupés (mesures dites intérieures), de même pour des capteurs en façade et à l'intersection la plus proche de l'école (mesures dites extérieures). Le capteur le plus éloigné, là où le trafic routier est important, servira de mesure de fond (mesures dites de référence). Les données où les capteurs n'ont pas fonctionné (2 cas) ou ont donné une mesure aberrante (1 cas) ont été retirées de l'analyse.

Un capteur *Pollutrack* de PM<sub>2,5</sub> est installé sur la façade de chaque école, à proximité du capteur de NO<sub>2</sub> de façade. Les mesures de fond, c'est à dire hors zone de piétonnisation, sont issus des capteurs mobiles du réseau *Pollutrack* en moyennant toutes les données disponibles dans un carré de 1 km<sup>2</sup> centré sur l'école. La **figure 3** montre la localisation des 10 écoles.

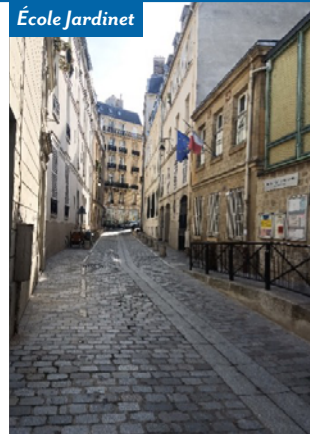
### 4.4. État des rues

Les travaux de piétonnisation des rues n'étant pas conduits par nos équipes, il a fallu s'adapter aux situations rencontrées. Ainsi, l'état des rues est classé en 4 catégories dans lesquelles les différentes écoles seront réparties (la **figure 4** présente les photos de la plupart de ces rues).

- **rues non piétonnisées même après la fin de la deuxième campagne NO<sub>2</sub>** : école Jules Ferry, école Littré, école maternelle Moureu.
- **rues déjà piétonnisées avant la première campagne de mesure NO<sub>2</sub>** : école Jardinnet (impasse piétonne, école témoin), école Victoire (école témoin).
- **rues piétonnisées ou apaisées entre les deux campagnes de mesure NO<sub>2</sub>** : école Saint Benoit, école Paul Gervais.
- **rues en cours de piétonnisation pendant la deuxième campagne de mesure NO<sub>2</sub>** : école Béranger, école Championnet, collège Évariste Galois.



**figure 3** : localisation des 10 écoles étudiées.



*figure 4 : photos des rues.*

## 5. RÉSULTATS PAR ÉTABLISSEMENT

Les **figures 5 à 14** présentent les mesures intégrées par campagne pour le  $\text{NO}_2$  (haut) et l'évolution temporelle des moyennes journalières des  $\text{PM}_{2.5}$  (bas).

La mention *avant expérimentation* correspond à la première campagne de mesure  $\text{NO}_2$  et la mention *après expérimentation* correspond à la deuxième campagne de mesure  $\text{NO}_2$ .

### 5.1. Rues non piétonnisées

L'école Jules Ferry est implantée dans un quartier résidentiel. Le périphérique se situe à proximité à l'ouest ; au sud passe la route nationale N 302.

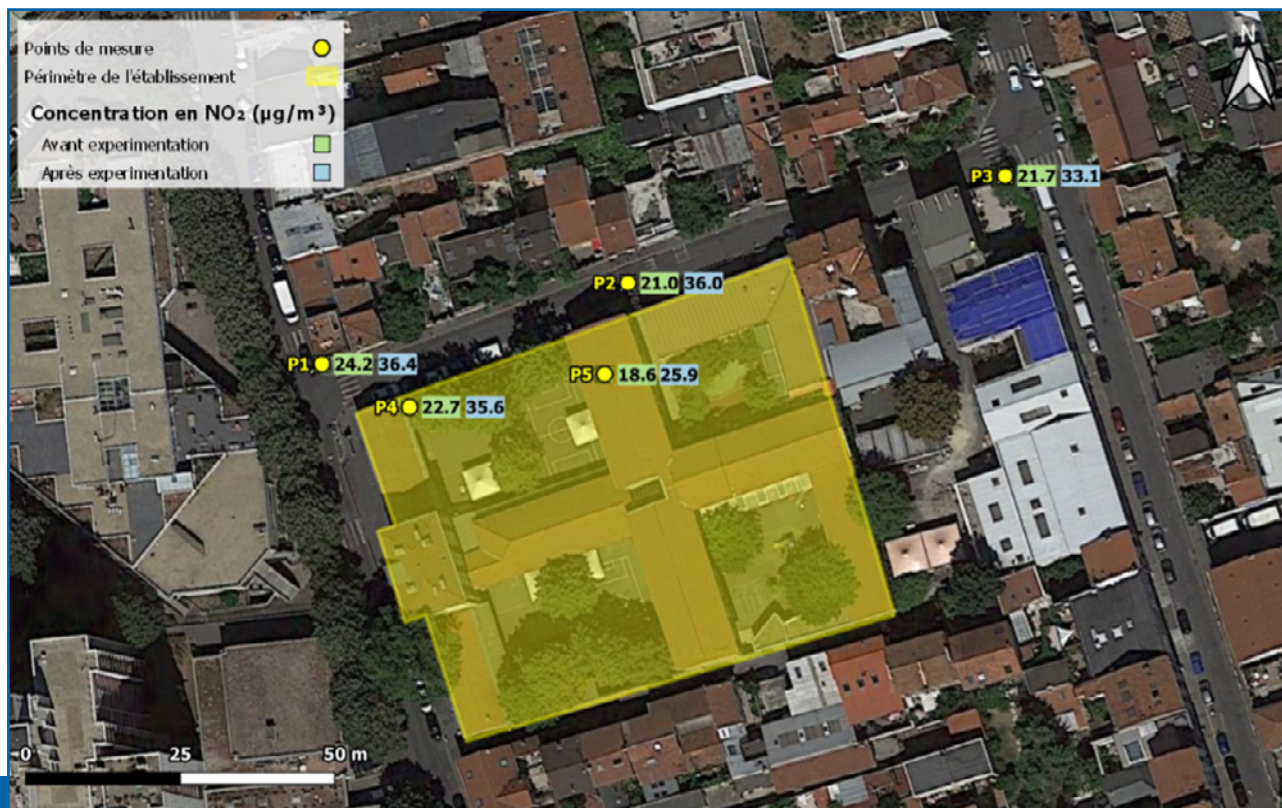


figure 5.1 : école Jules Ferry, vue aérienne.

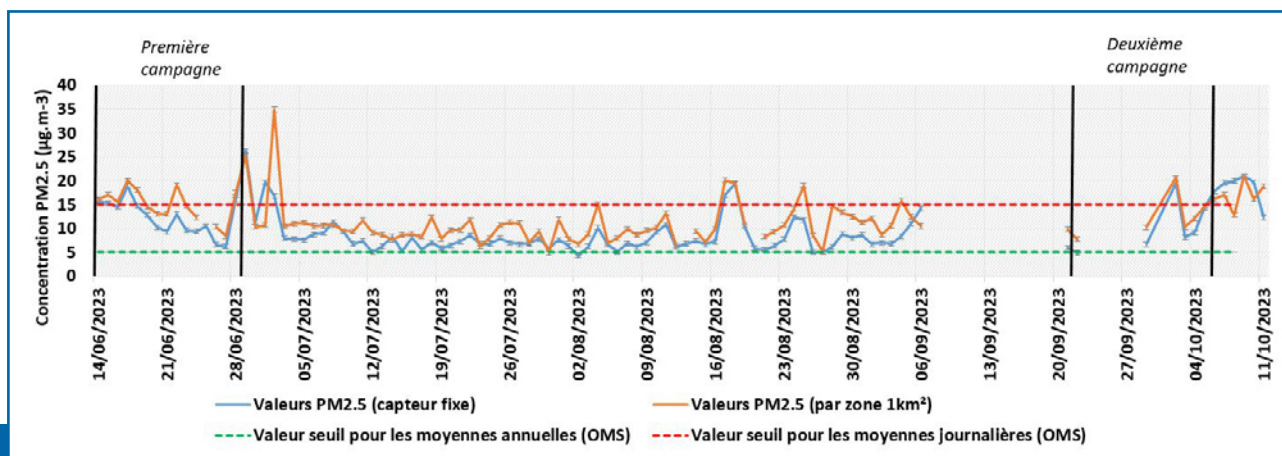


figure 5.2 : école Jules Ferry, résultats.

L'École Littré se situe dans un quartier résidentiel entouré de bâtiments qui restreignent fortement la ventilation naturelle. De grands axes de circulation entourent l'îlot d'immeuble où se situe l'école.

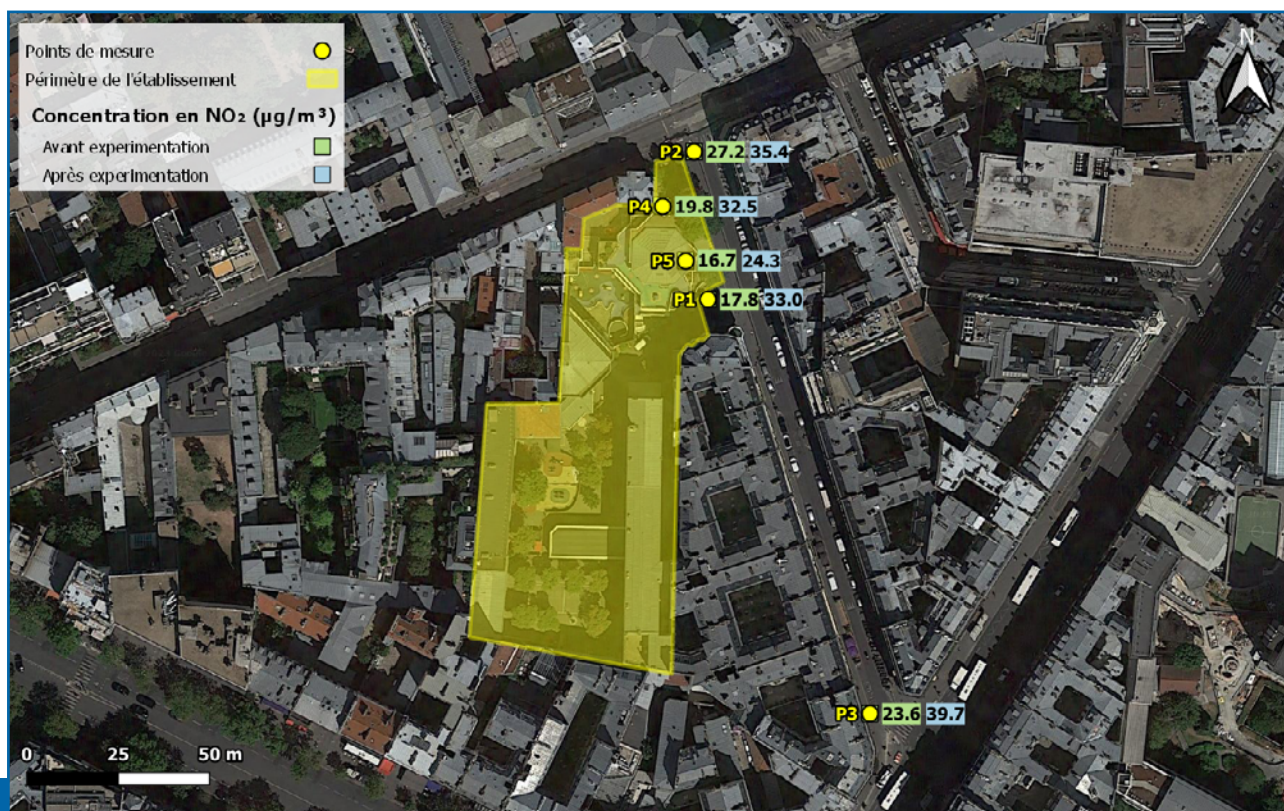


figure 6.1 : école Littré, vue aérienne.

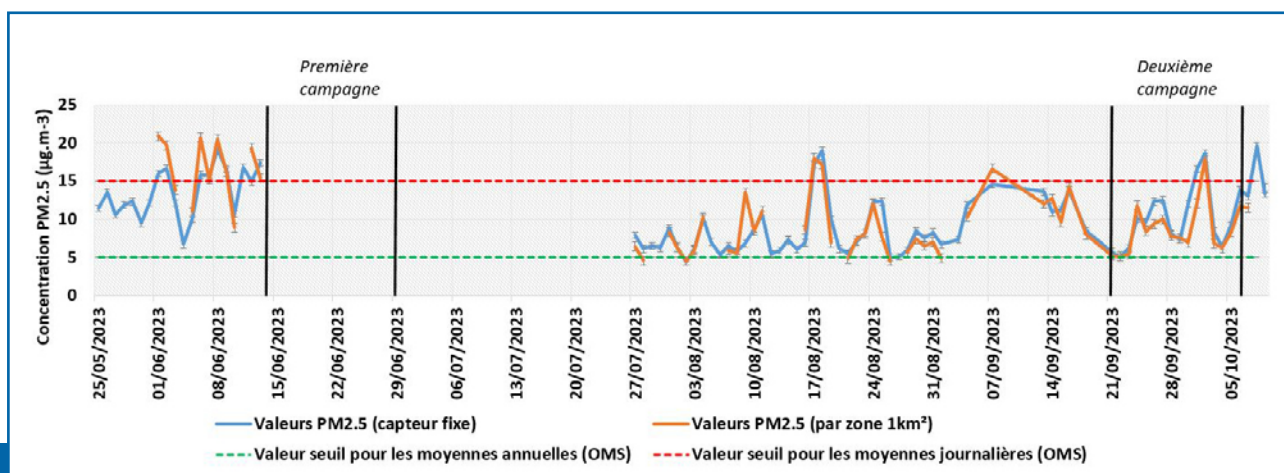


figure 6.2 : école Littré, résultats.

L'École Moureu bénéficie d'un emplacement avantageux. À l'ouest, elle est bordée par un parc dans la direction du vent dominant, garantissant une aération constante tout au long de l'année. Du côté sud, la présence d'une zone sportive ouverte dégage également l'espace, tandis qu'il n'y a pas de grands axes de circulation à proximité.



figure 7.1 : école Moureu, vue aérienne.

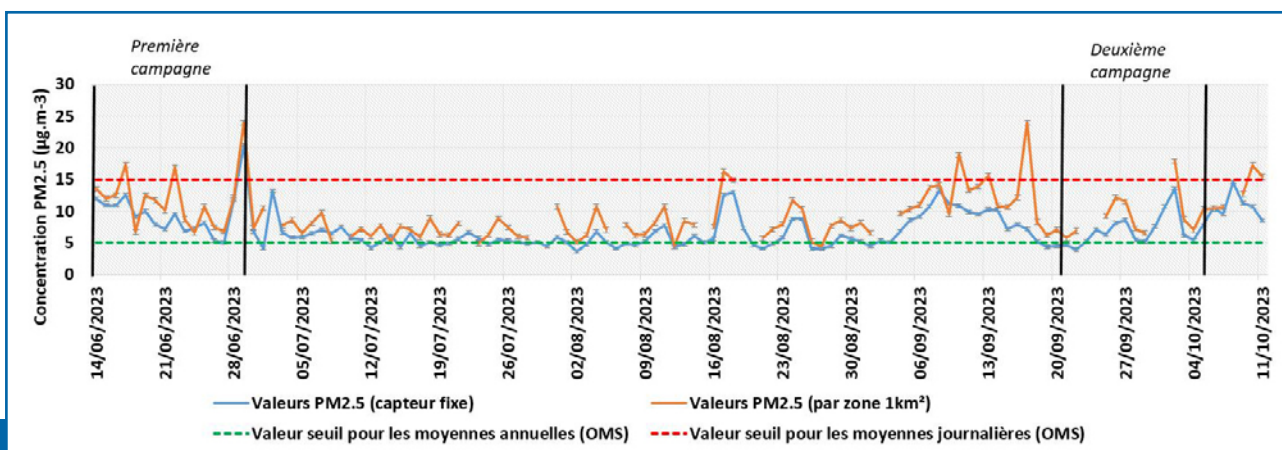


figure 7.2 : école Moureu, résultats.

## 5.2. Rues déjà piétonnisées

L'école élémentaire Jardinet, localisée dans un quartier résidentiel, est un établissement à deux étages entouré de bâtiments plus imposants. C'est un bel exemple de *rue canyon*. Un axe routier important se situe au sud.

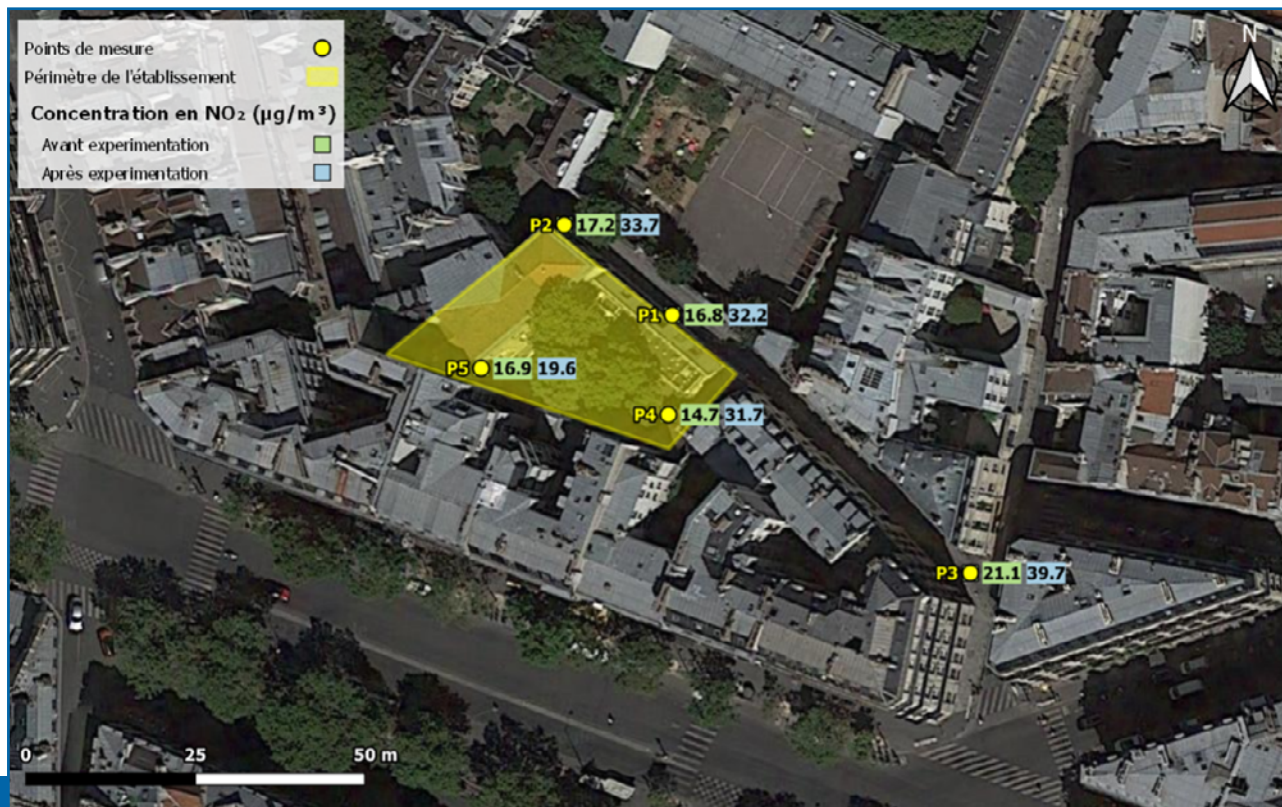


figure 8.1 : école Jardinet, vue aérienne.

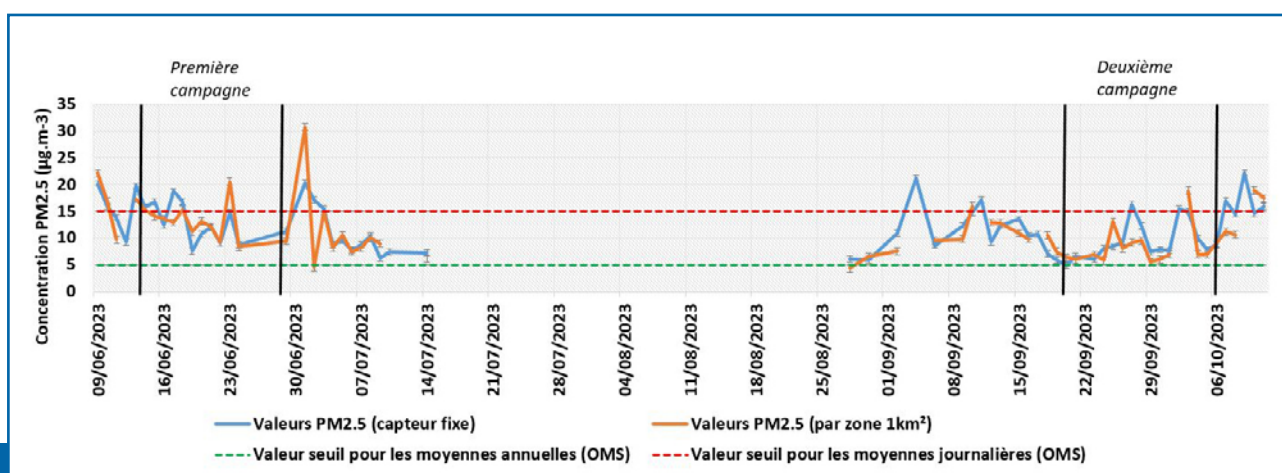


figure 8.2 : école Jardinet, résultats.

L'école Victoire est enclavée dans un quartier résidentiel caractérisé par de nombreux immeubles qui limitent la circulation de l'air, ainsi que des boulevards à proximité. C'est aussi un bel exemple de *rue canyon*.

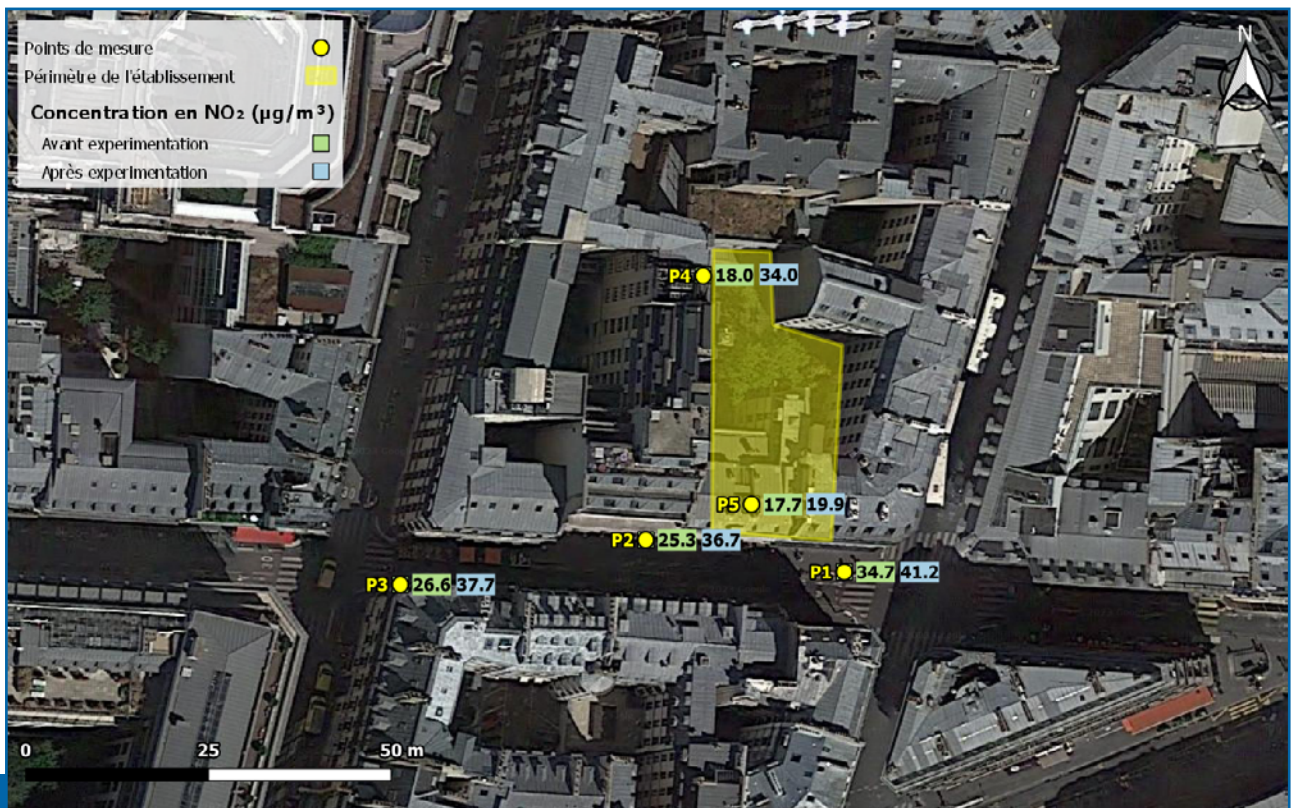


figure 9.1 : école Victoire, vue aérienne.

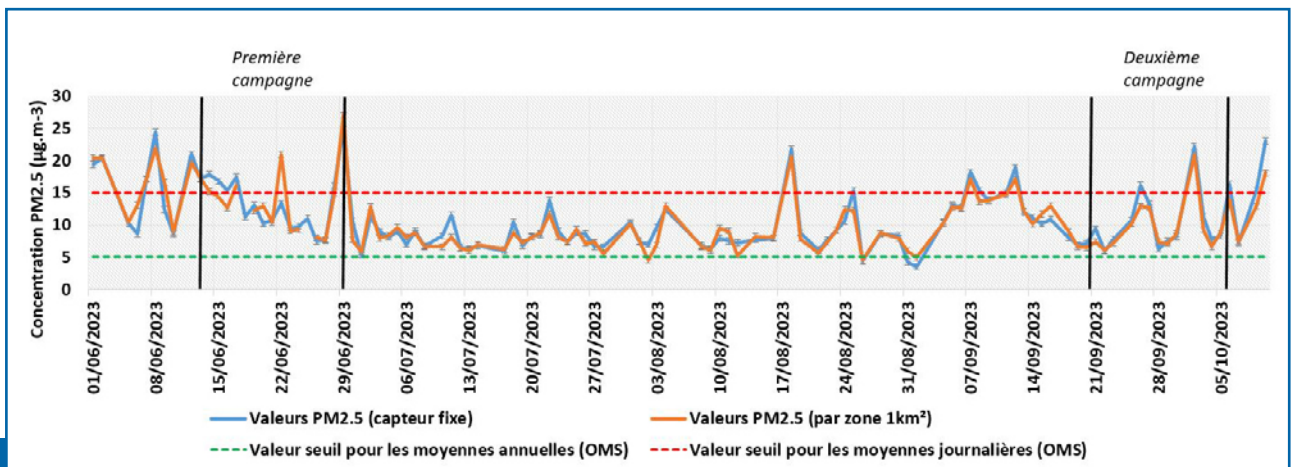


figure 9.2 : école Victoire, résultats.

### 5.3. Rues piétonnisées ou apaisées entre les deux campagnes

L'École Saint Benoît est enclavée dans un quartier résidentiel au milieu d'immeubles restreignant la ventilation de l'air ambiant. Au sud se situe un grand boulevard avec une forte circulation.

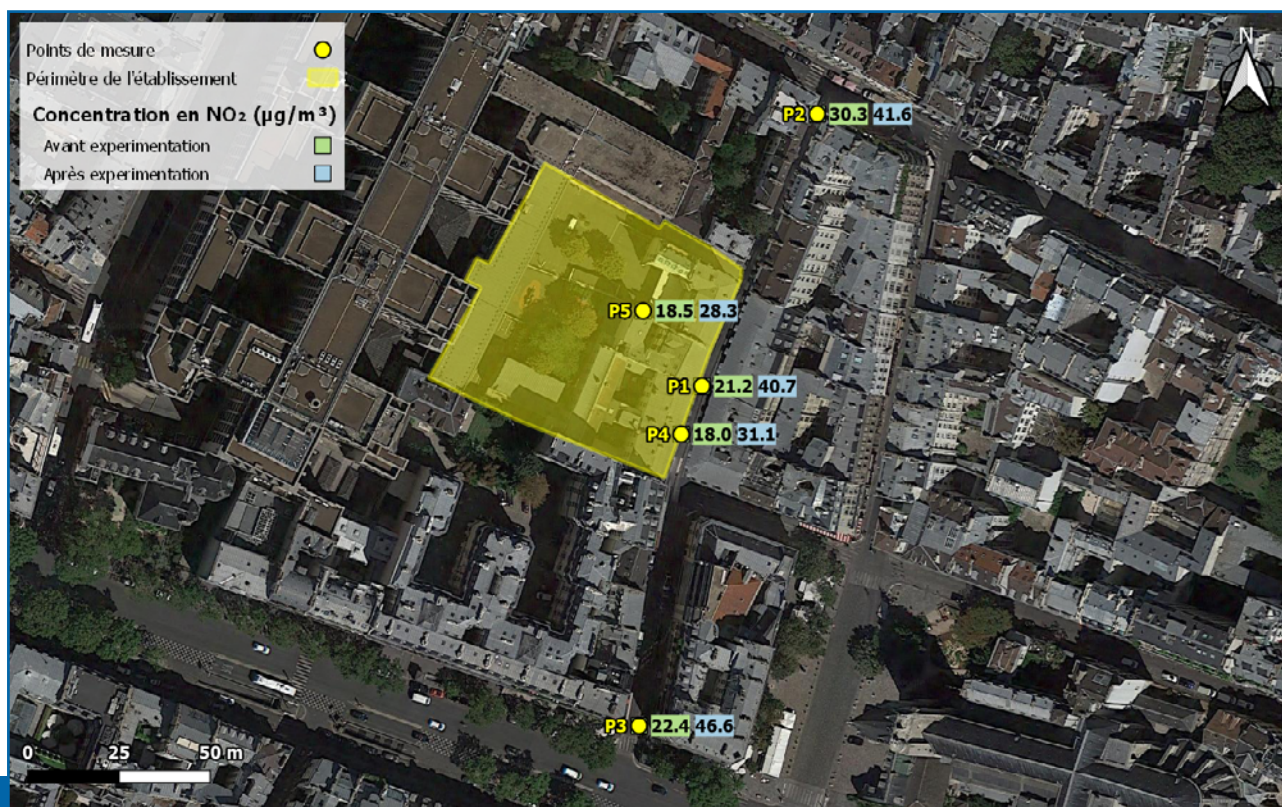


figure 10.1 : école Saint Benoît, vue aérienne.

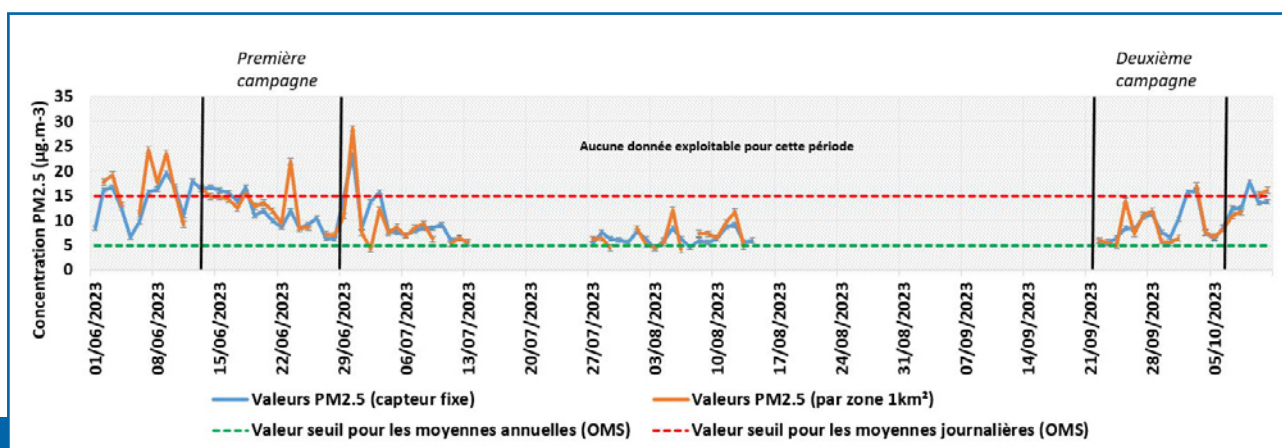


figure 10.2 : école Saint Benoît, résultats.

L'école Paul Gervais est située dans un quartier résidentiel. Elle est bornée à l'est par un parc. Elle est encadrée au sud-ouest par de nombreux bâtiments qui limitent le flux d'ouest et par un grand boulevard au sud.



figure 11.1 : école Paul Gervais, vue aérienne.

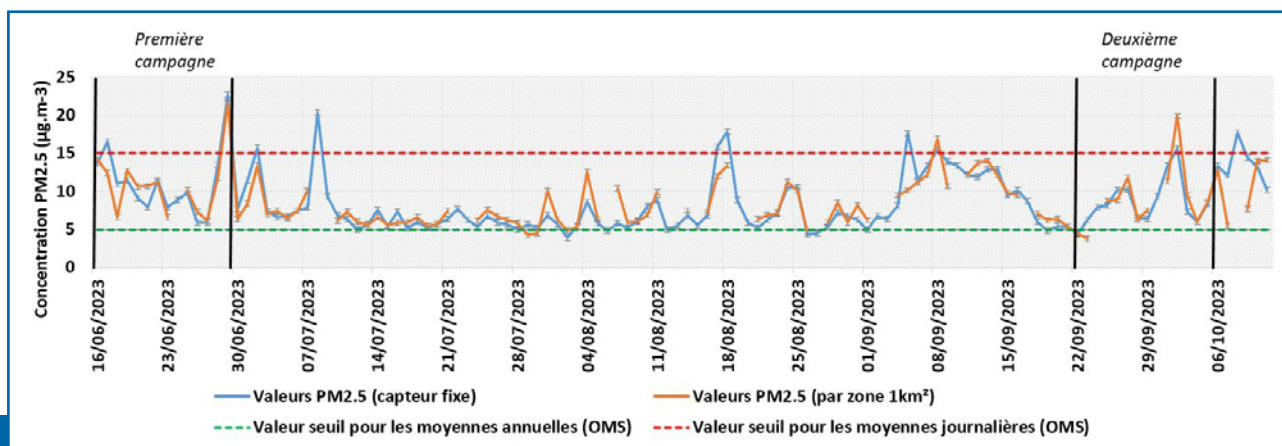


figure 11.2 : école Paul Gervais, résultats.

## 5.4. Rues en cours de piétonnisation pendant la deuxième campagne

L'École Béranger est située au cœur d'un quartier résidentiel. Le bâtiment scolaire s'étend sur deux niveaux, entouré d'immeubles de même hauteur. Un axe de circulation important se situe à l'ouest.



figure 12.1 : école Béranger, vue aérienne.

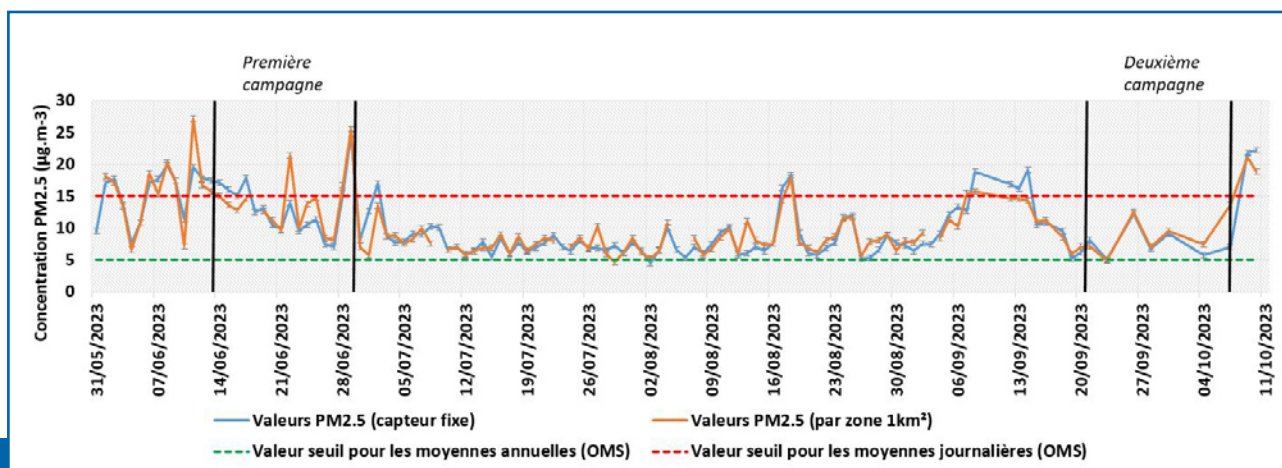


figure 12.2 : école Béranger, résultats.

L'école Championnet est en zone résidentielle, donc entourée de bâtiments. Elle est à proximité d'un axe de circulation majeur de l'est parisien.



figure 13.1 : école Championnet, vue aérienne.

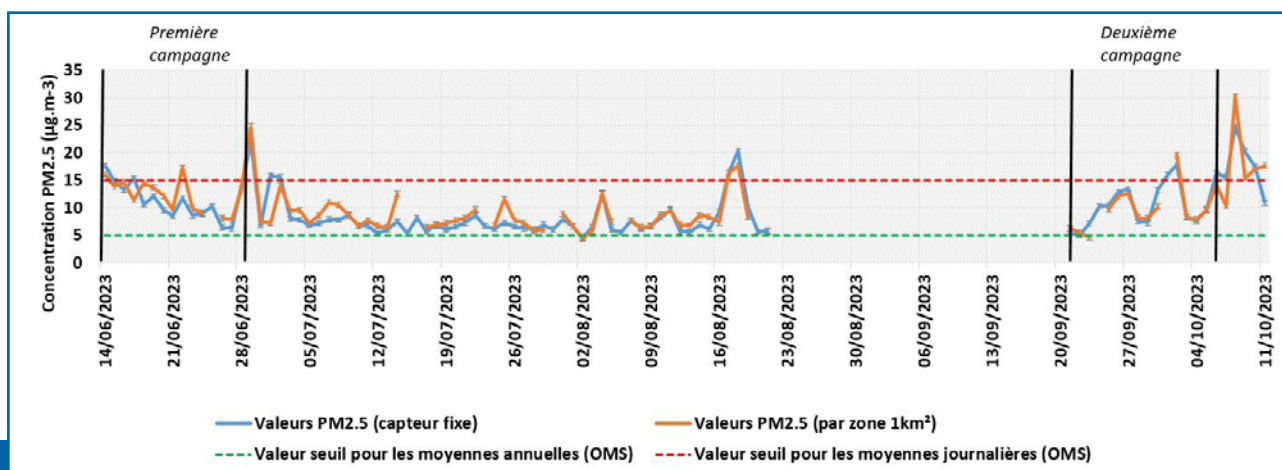


figure 13.2 : école Championnet, résultats.

Le collège Évariste Galois bénéficie d'une bonne aération grâce à des espaces verts à l'ouest et à la présence limitée de bâtiments autour de l'école. Cependant, le collège est proche d'une zone routière très fréquentée avec un grand boulevard au nord et le périphérique au sud.

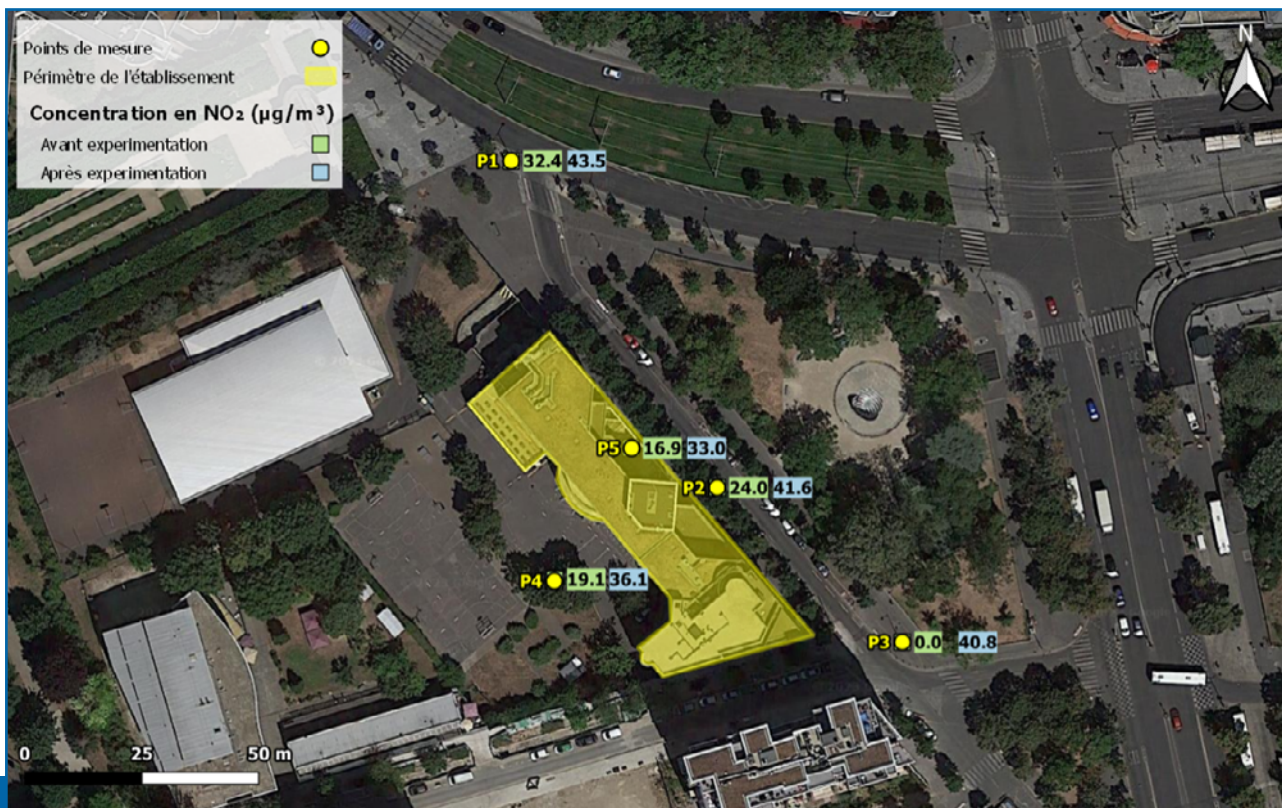


figure 14.1: collège Évariste Galois, vue aérienne.

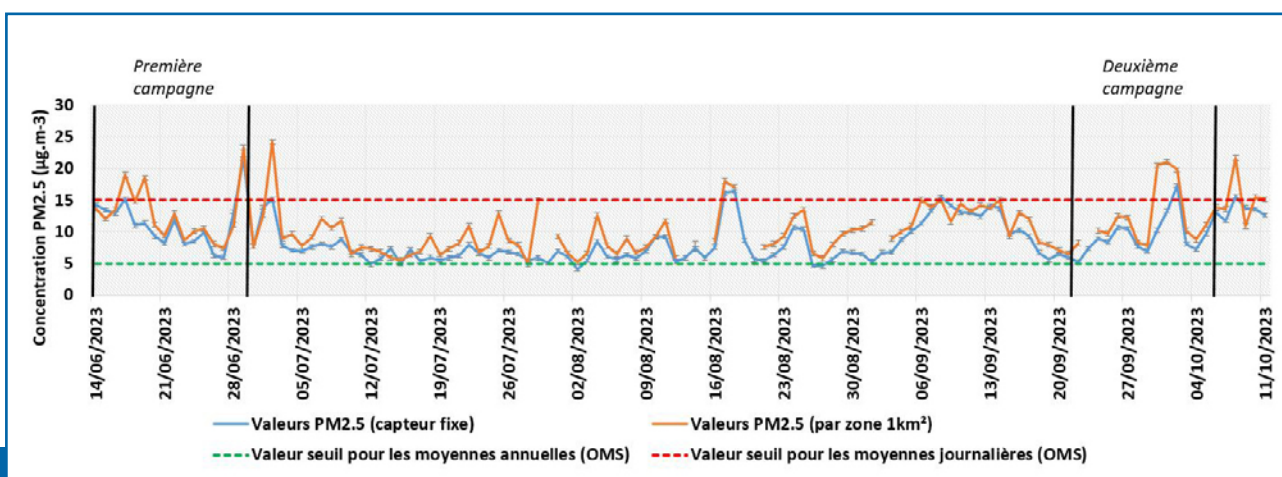
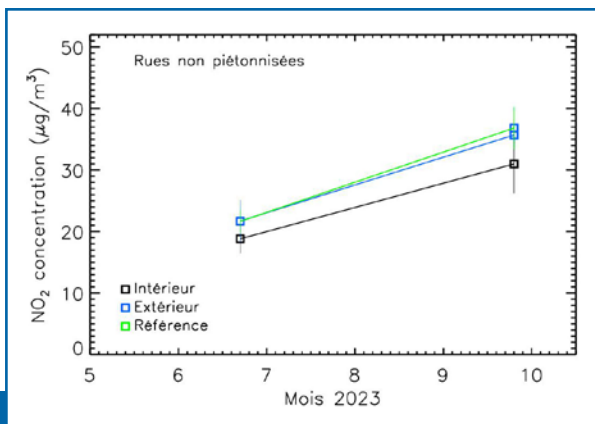


figure 14.2: collège Évariste Galois, résultats.

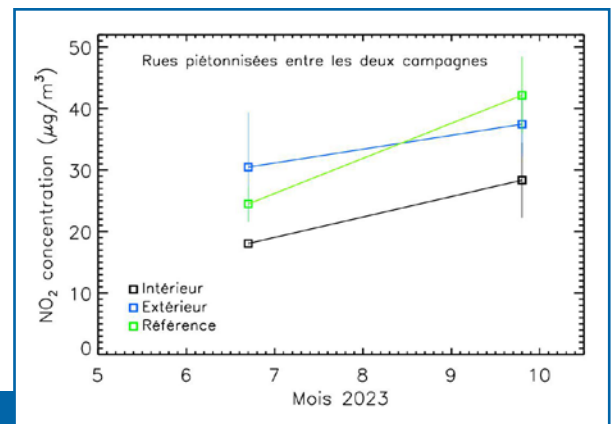
## 6. ANALYSE DU NO<sub>2</sub>

Les concentrations de NO<sub>2</sub> étant différentes entre les deux campagnes de mesures, l'utilisation d'une méthode relative, c'est-à-dire en effectuant une comparaison avec une mesure de référence, s'avère nécessaire.

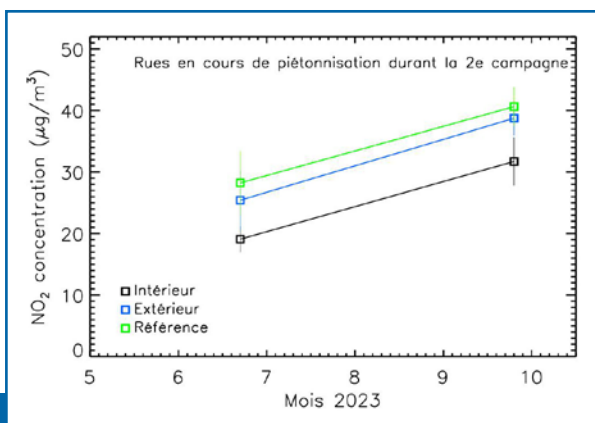
La **figure 15** présente les moyennes des mesures pour les rues non piétonnisées lors des deux campagnes. Les mesures de la référence et en air extérieur sont quasiment identiques, ce qui confirme bien qu'il n'y a eu aucune modification des sources de pollution entre les deux campagnes de mesures. À noter que les valeurs à l'intérieur de l'école sont un peu plus faibles que celles à l'extérieur, comme attendu. Le rapport entre les mesures de la deuxième campagne et celle de la première campagne sont identiques à  $\pm 4\%$  près pour les 3 lieux de mesure. Un résultat similaire est obtenu pour les rues en cours de piétonnisation durant la deuxième campagne, avec des rapports identiques à  $\pm 7\%$  près (**figure 16**).



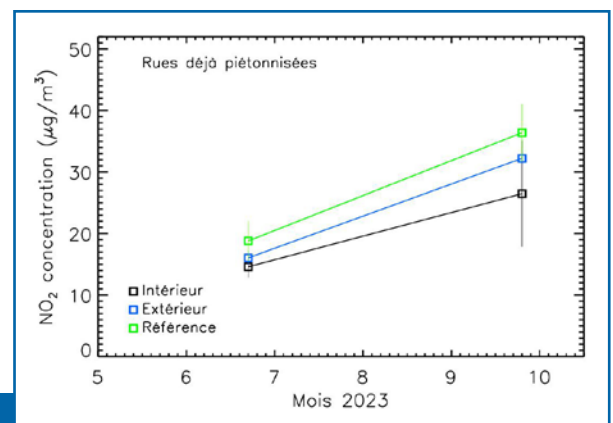
**figure 15 :** évolution temporelle du contenu en NO<sub>2</sub> pour les rues non piétonnisées (les points sont placés au milieu de la période de la campagne).



**figure 17 :** évolution temporelle du contenu en NO<sub>2</sub> pour les rues avant et après la piétonnisation.



**figure 16 :** évolution temporelle du contenu en NO<sub>2</sub> pour les rues en cours de piétonnisation.

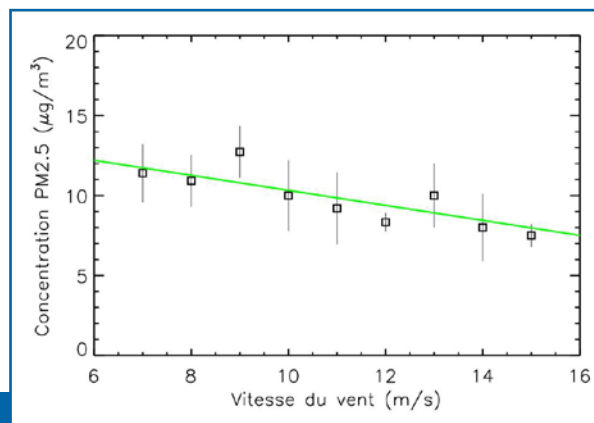


**figure 18 :** évolution temporelle du contenu en NO<sub>2</sub> pour les rues déjà piétonnisées.

## 7. ANALYSE DES PM<sub>2.5</sub>

Les mesures des capteurs de *Pollutrack* sur la façade des écoles sont comparées à celles de référence provenant du réseau mobile de *Pollutrack*. Les données sont moyennées sur 3 périodes : les deux campagnes de mesures du NO<sub>2</sub> et la période entre ces deux campagnes.

En combinant toutes les données de vitesse de vent pour les lieux de mesures et en les regroupant par pas de 1 m/s, il est possible d'établir l'évolution de la concentration moyenne journalière en PM<sub>2.5</sub> avec la vitesse du vent. La tendance canonique de la diminution de la pollution aux PM<sub>2.5</sub> en fonction de l'augmentation de la vitesse du vent est aisément mise en évidence (**figure 19**), ce qui confirme la fiabilité des mesures.



**figure 19 :** évolution de la concentration en PM<sub>2.5</sub> en fonction de la vitesse du vent (le trait vert représente un ajustement linéaire).

|  | école Jardinnet | école Béranger | école Littré    | école Saint Benoît | école Championnet |
|--|-----------------|----------------|-----------------|--------------------|-------------------|
| nombre d'heures                                      | 237             | 2386           | 1603            | 2827               | 1925              |
| nombre d'heures < 5 µg/m <sup>3</sup>                | 11              | 258            | 250             | 408                | 266               |
| nombre d'heures entre 5 et 15 µg/m <sup>3</sup>      | 161             | 1764           | 1079            | 1986               | 1402              |
| nombre d'heures > 15 µg/m <sup>3</sup>               | 65              | 364            | 274             | 433                | 257               |
| valeur maximale (µg/m <sup>3</sup> )                 | 29,2            | 42,2           | 32,4            | 39,8               | 38,7              |
| valeur médiane (µg/m <sup>3</sup> )                  | 10,9            | 8,1            | 8,9             | 8,5                | 7,6               |
| nombre de jours de mesure                            | 66              | 118            | 85              | 121                | 90                |
| nombre de jours dépassement 15 µg/m <sup>3</sup>     | 17              | 23             | 13              | 21                 | 14                |
| nombre de jours dépassement 15 µg/m <sup>3</sup> (%) | 26 %            | 19 %           | 15 %            | 17 %               | 16 %              |
|  | école Victoire  | école Moureu   | collège Gallois | école Jules Ferry  | école Gervais     |
| nombre d'heures                                      | 642             | 2787           | 2856            | 2227               | 2783              |
| nombre d'heures < 5 µg/m <sup>3</sup>                | 27              | 1162           | 523             | 341                | 712               |
| nombre d'heures entre 5 et 15 µg/m <sup>3</sup>      | 453             | 1527           | 2083            | 1579               | 1810              |
| nombre d'heures > 15 µg/m <sup>3</sup>               | 162             | 98             | 250             | 307                | 261               |
| valeur maximale (µg/m <sup>3</sup> )                 | 48,6            | 35,2           | 38,6            | 49,3               | 54,8              |
| valeur médiane (µg/m <sup>3</sup> )                  | 10,6            | 5,9            | 7,4             | 7,6                | 6,9               |
| nombre de jours de mesure                            | 108             | 120            | 120             | 98                 | 118               |
| nombre de jours dépassement 15 µg/m <sup>3</sup>     | 23              | 1              | 8               | 15                 | 10                |
| nombre de jours dépassement 15 µg/m <sup>3</sup> (%) | 21 %            | 1 %            | 7 %             | 15 %               | 8 %               |

**table 1 :** statistique des mesures des PM<sub>2.5</sub> pour les 10 écoles de juin à octobre 2023.

Cette figure montre aussi qu'en cette période estivale où les mesures ont été effectuées, les niveaux de pollution aux  $PM_{2.5}$  sont entre faibles et modérés. Ces niveaux sont très inférieurs à ceux qui peuvent être détectés en automne et en hiver.

Les concentrations sont variables d'une école à l'autre, en fonction du transport des particules mais aussi de la topographie locale. La [table 1](#) présente les statistiques des résultats des mesures école par école. Le tableau indique que les écoles sont exposées à des concentrations de particules supérieures à  $15 \mu g/m^3$  entre 1 et 26 % du temps durant la période d'étude, montrant donc l'hétérogénéité de la pollution.

La [figure 20](#) présente l'évolution temporelle des mesures au niveau des écoles et celles de référence. Bien que des différences en valeurs absolues soient présentes, le rapport normalisé entre les courbes demeure constant, avec une valeur moyenne de 1.0 et une incertitude de 7%, quelles que soient les conditions de piétonnisation. Ceci provient du fait que les valeurs de pollution aux  $PM_{2.5}$  sont globalement assez faibles, rendant difficile la mise en évidence d'une tendance. **L'effet de la piétonnisation sur les émissions des sources locales de  $PM_{2.5}$  (trafic routier dans les rues concernées) est donc difficilement détectable.**

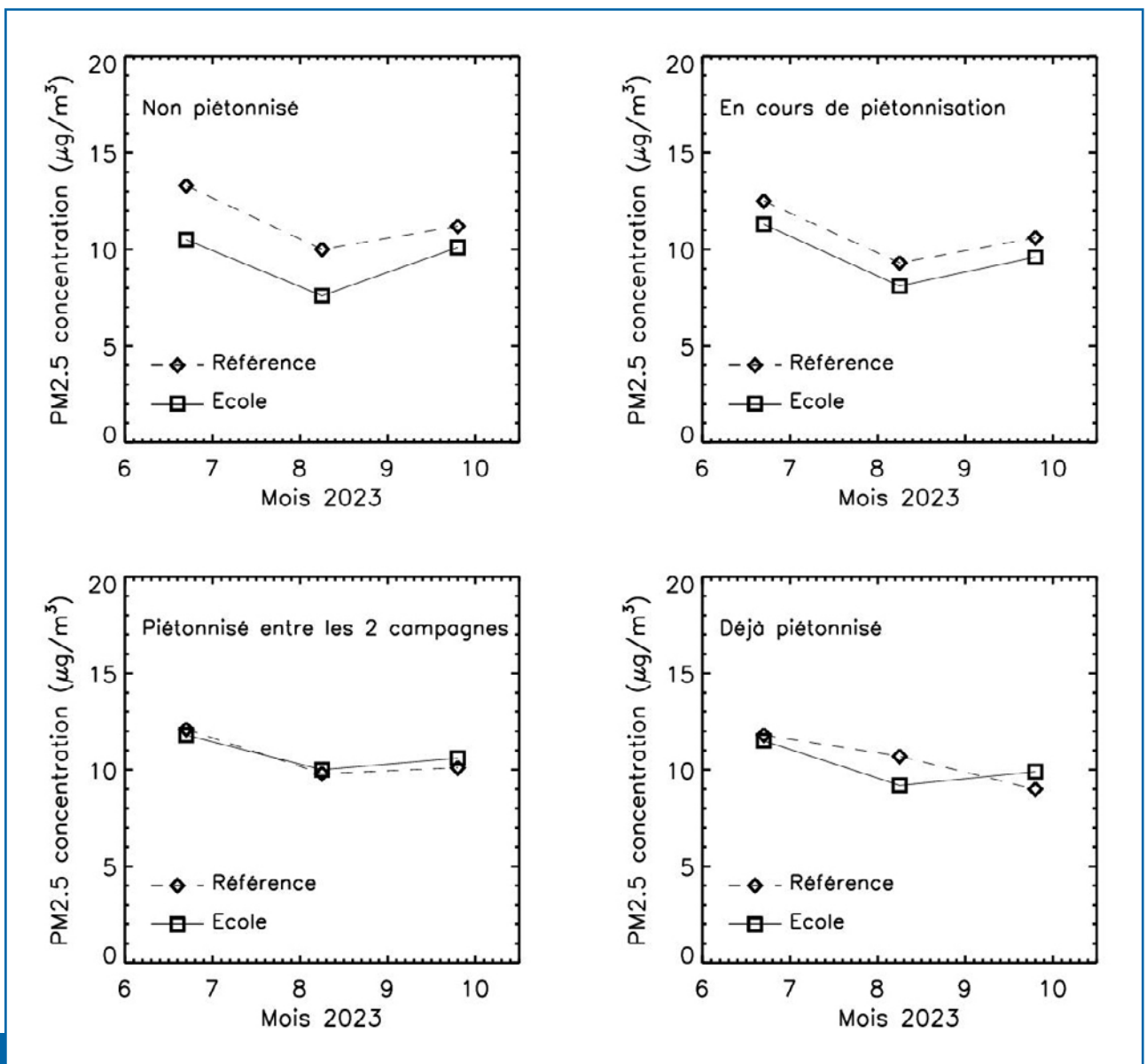


figure 20: évolution temporelle de la concentration en  $PM_{2.5}$  pour les différentes configurations (les points sont placés au milieu de la période de mesure).

## 8. CONCLUSIONS

Ainsi, même si la statistique du nombre de mesures est un peu faible pour tirer des conclusions précises, **l'étude montre sans ambiguïté une baisse de NO<sub>2</sub> dans le cas des rues devenues piétonnisées, qui peut aller jusqu'à 30 %.**

Par contre, **les mesures de PM<sub>2,5</sub> ne montrent aucun effet détectable à cause des conditions météorologiques défavorables** rendant difficile la détection de variations lors de niveaux assez bas en PM<sub>2,5</sub>.

Une telle étude pourrait être conduite en hiver, là où les niveaux de polluants sont plus élevés lors de conditions anticycloniques. Il serait utile de suivre les évolutions temporelles de NO<sub>2</sub> tout au long des campagnes de mesures, afin de corrélérer les variations de concentrations aux conditions météorologiques.

Une telle approche va être menée pour les PM<sub>2,5</sub>, les capteurs ayant été laissés en place à titre gracieux par *Pollutrack*, afin d'étudier la *haute saison* de la pollution aux particules fines.

De plus, les travaux pour les rues en cours de piétonnisation devraient être terminés cet hiver, ce qui permettra d'augmenter la statistique de mesure et donc la précision des résultats.



**Respire**

Maison de la vie associative et citoyenne du 9<sup>e</sup>

54 rue Jean-Baptiste Pigalle 75009 Paris

[contact@respire-asso.org](mailto:contact@respire-asso.org)

[www.respire-asso.org](http://www.respire-asso.org)

 [@association\\_respire](https://www.instagram.com/association_respire)

 [@respireasso](https://twitter.com/respireasso)

 [@AssociationRespire](https://www.facebook.com/AssociationRespire)