

# L'impact des infrastructures de mobilité douce sur la qualité de l'air dans les villes suisses

Liam Trillo, Nina Rindisbacher, Alessandra Failla, Natalia Wyszatycki,  
David Galeano, Hary Andrianjafy<sup>1</sup>

HEC Lausanne, Université de Lausanne

Juin 2025

---

## Résumé

Ce rapport évalue l'impact des infrastructures de mobilité douce sur la qualité de l'air dans les villes suisses. En mobilisant un panel de données couvrant huit grandes villes entre 2010 et 2023, l'étude combine des indicateurs géospatiaux extraits d'OpenStreetMap, des données environnementales de l'OFEV, et des variables socio-démographiques de l'OFS. Trois polluants sont analysés : le dioxyde d'azote ( $\text{NO}_2$ ), les particules fines ( $\text{PM}_{10}$ ) et l'ozone ( $\text{O}_3$ ), en lien avec quatre types d'aménagements : pistes cyclables, zones piétonnes, espaces verts et arrêts de transports publics. L'analyse économétrique s'appuie sur un modèle à effets fixes, complété par des spécifications en différences premières, à effets différés et GMM dynamique. Les résultats suggèrent que certaines infrastructures, en particulier les espaces verts et les réseaux de transports publics, sont associées à une amélioration significative de la qualité de l'air, notamment en matière de  $\text{NO}_2$  et de  $\text{PM}_{10}$ . L'étude met en lumière l'importance de la dynamique temporelle des effets et plaide pour une approche empirique rigoureuse dans l'évaluation des politiques urbaines. Elle souligne enfin le potentiel des politiques de mobilité douce comme levier de durabilité environnementale dans les villes suisses.

---

---

1. [liam.trillo@unil.ch](mailto:liam.trillo@unil.ch), [nina.rindisbacher@unil.ch](mailto:nina.rindisbacher@unil.ch), [alessandra.failla@unil.ch](mailto:alessandra.failla@unil.ch),  
[natalia.wyszatycki@unil.ch](mailto:natalia.wyszatycki@unil.ch), [david.galeano@unil.ch](mailto:david.galeano@unil.ch), [hary.andrianjafy@unil.ch](mailto:hary.andrianjafy@unil.ch)

# 1 Introduction

Face aux défis croissants liés au changement climatique, à la pollution atmosphérique et à la qualité de vie urbaine, les villes européennes cherchent à repenser leur modèle de mobilité. En Suisse, cette transition se traduit par une montée en puissance des mobilités dites "douces" : marche, vélo, transports publics. Ces modes de déplacement, encouragés à la fois pour leurs bénéfices environnementaux et sanitaires redéfinissent progressivement la structure des centres urbains.

Cette transformation intervient dans un contexte marqué par des augmentations persistantes de la motorisation individuelle. En 2023, elle a atteint plus de 535 véhicules pour 1000 habitants selon l'OFS [16]. Cette saturation de l'espace urbain génère non seulement de la congestion, mais également un environnement sonore nocif. Des recherches récentes suisses montrent que l'exposition chronique au bruit routier est associée à des troubles du sommeil, du stress et une altération du bien-être général [2].

De plus, la congestion routière accroît les conflits d'usage sur la voirie, augmentant les risques d'accidents pour les cyclistes et les piétons, ce qui peut freiner certains à favoriser les mobilités douces [10].

En parallèle, les enjeux sanitaires liés à la pollution atmosphérique demeurent importants. Une étude du Swiss Tropical and Public Health Institute datant de 2023 démontre que la pollution de l'air en Suisse provoque 2'300 décès prématurés par an malgré des progrès au cours des dernières décennies [18].

Dans ce cadre, le développement d'infrastructures favorisant des alternatives aux transports individuels constitue une réponse stratégique de plus en plus mobilisée. L'objectif est d'intégrer durablement ces modes dans l'aménagement urbain et les politiques environnementales.

Bien que la mobilité douce soit également associée à d'autres dimensions telles que la santé, la sécurité ou le bien-être subjectif, notre étude se concentre exclusivement sur l'impact de ces infrastructures sur la pollution atmosphérique. Ce choix permet d'aborder de manière ciblée l'un des enjeux les plus quantifiables de la transition urbaine.

## 1.1 Contexte et motivation

Depuis plusieurs années, de nombreuses villes suisses s'engagent dans des stratégies de transition urbaine orientées vers la durabilité, en misant sur le développement des mobilités douces. Certaines villes comme Berne [7], Lausanne [5], Bâle [6] ou Zurich [28] ont adopté des plans de mobilité durable visant à favoriser les déplacements actifs et collectifs, réduire la dépendance automobile et améliorer la qualité de l'environnement urbain. Ces politiques s'appuient sur des investissements croissants dans les infrastructures dédiées : allongement du réseau cyclable, extension des zones piétonnes, revalorisation des espaces publics et création d'espaces verts urbains accessibles [21].

Ces évolutions s'inscrivent dans une double logique : écologique et sanitaire [26]. La pollution atmosphérique reste une préoccupation majeure en Suisse, en particulier dans les centres urbains densément peuplés. Selon l'Office fédéral de l'environnement [17], les concentrations de dioxyde d'azote ( $\text{NO}_2$ ) dépassent encore les recommandations de l'OMS dans plusieurs villes [4]. Les particules fines ( $\text{PM}_{10}$ ), bien que globalement en baisse, donnent encore lieu à

des épisodes de dépassements des seuils, notamment lors de conditions météorologiques défavorables à la dispersion des polluants [20]. Ces phénomènes ont des effets documentés sur la santé publique, notamment sur les maladies cardiovasculaires et respiratoires [4]. De manière plus générale, les bénéfices sanitaires associés aux politiques de mobilité active sont confirmés par la littérature scientifique. Une revue systématique de Mueller et al. (2015) montre que l’augmentation de la part modale de la marche et du vélo peut générer des gains substantiels en espérance de vie et en réduction de la morbidité liée à la pollution et à l’inactivité physique [14].

Dans ce contexte, les infrastructures de mobilité douce sont de plus en plus perçues comme des leviers stratégiques pour améliorer la qualité de l’air et la santé, notamment en contribuant à réduire les émissions de polluants atmosphériques. Pourtant, en Suisse comme ailleurs, l’évaluation empirique de leur impact effectif reste partielle, fragmentée ou concentrée sur des études de cas.

La question centrale à laquelle ce rapport vise à répondre est donc la suivante :

**Quel est l’impact des infrastructures de mobilité douce sur la qualité de l’air dans les villes suisses ?**

## 1.2 Littérature

Plusieurs études internationales ont documenté les bénéfices environnementaux et sanitaires des politiques de mobilité douce. Pucher et Buehler (2010) [24] montrent que la marche et le vélo contribuent significativement à réduire la pollution de l’air et les risques sanitaires, tout en favorisant des villes plus humaines et accessibles. Rojas-Rueda et al. (2016) [25] quantifient les effets positifs du report modal sur la santé publique, en estimant que les infrastructures cyclables peuvent prévenir des centaines de décès par an dans les grandes métropoles européennes. Dans une autre perspective, Mouratidis (2021) [13] examine les interactions entre environnement bâti, pollution et bien-être subjectif, soulignant le rôle central de la planification urbaine dans la promotion d’une qualité de vie durable.

Au niveau européen, plusieurs travaux empiriques mettent en évidence un lien direct entre l’amélioration des infrastructures de mobilité douce et la baisse de la pollution de l’air. Notamment, une étude multi-sites dirigée par l’European Cyclists’ Federation [8], menée dans les villes de Londres, Nantes et Séville, révèle que l’augmentation de la part modale du vélo, soutenue par des aménagements dédiés, est associée à une diminution mesurable des concentrations de  $\text{NO}_2$  et de  $\text{PM}_{10}$ .

En Suisse, les recherches sont encore peu nombreuses mais certaines études proposent des contributions marquantes. Lavadinho et Pini (2005) [11] mettent en lumière l’importance de la qualité de l’environnement construit pour encourager la marche, en développant le concept d’échelle de marchabilité adaptée au contexte suisse. Leur approche, fondée sur des critères tels que la sécurité, l’accessibilité et l’esthétique, met en avant l’importance des infrastructures douces dans l’organisation urbaine. Sur un plan plus technique, le rapport INFRAS (2005) [9], mandaté par l’OFROU, estime le potentiel de réduction de  $\text{CO}_2$  grâce à une substitution des trajets motorisés courts par des déplacements à pied ou à vélo. Il montre que ce potentiel est particulièrement élevé dans les agglomérations suisses, où la densité et les distances permettent un fort taux de report modal.

Malgré ces apports, peu d’études suisses croisent de manière systématique les données

d’infrastructure, de pollution et de temporalité sur un échantillon étendu de villes. Cette étude entend combler cette lacune en mobilisant un panel de huit villes suisses sur treize ans, avec des données géospatiales, des indicateurs environnementaux et une méthode économétrique rigoureuse permettant d’évaluer l’impact des aménagements de mobilité douce sur la qualité de l’air.

## 2 Données

Notre étude repose sur un panel original couvrant huit grandes villes suisses : Bâle, Berne, Genève, Lausanne, Lucerne, Winterthour, Bienne et Zurich, observées annuellement sur la période 2010-2023. En raison de données manquantes pour certaines années, le panel compte 101 observations sur un total théorique de 104. L’unité d’observation est la ville-année, ce qui permet d’exploiter la variation temporelle et spatiale des variables d’intérêt.

Les données sont issues de trois sources principales. Les infrastructures de mobilité douce sont extraites à partir d’OpenStreetMap [22] via l’API *ohsome*. Nous en retenons quatre indicateurs : la longueur totale du réseau cyclable (km), la surface des zones piétonnes (km<sup>2</sup>), la surface des espaces verts accessibles (km<sup>2</sup>) ainsi que la densité d’arrêts de transports publics (nombre/km<sup>2</sup>), qui reflètent la couverture et l’accessibilité du réseau. Ensemble, ces variables mesurent l’ampleur des aménagements urbains favorisant des alternatives durables aux transports motorisés individuels.

La qualité de l’air est mesurée à l’aide de données fournies par l’Office fédéral de l’environnement (OFEV) [17]. Nous utilisons trois indicateurs annuels : la concentration moyenne en dioxyde d’azote (NO<sub>2</sub>, en µg/m<sup>3</sup>), le nombre de jours par an où les particules fines (PM<sub>10</sub>) dépassent 50 µg/m<sup>3</sup>, et le nombre de jours où la concentration ozone (O<sub>3</sub>) excède 120 µg/m<sup>3</sup>. Ces seuils sont définis sur la base des lignes directrices de l’Organisation mondiale de la santé [23].

Ces trois indicateurs reflètent des dimensions complémentaires de la pollution atmosphérique urbaine, toutes pertinentes dans le cadre de notre problématique. Le dioxyde d’azote (NO<sub>2</sub>) est un polluant principalement émis par le trafic motorisé [19]. Il constitue ainsi un marqueur direct de la pollution routière, que les politiques de mobilité douce visent justement à réduire. Les particules fines (PM<sub>10</sub>) sont également liées aux émissions de trafic, mais traduisent davantage les épisodes de forte concentration dans l’air ambiant, notamment en cas de conditions météorologiques défavorables. Une réduction du trafic urbain peut contribuer à limiter la fréquence de ces pics. L’ozone (O<sub>3</sub>) est un polluant secondaire formé à partir de précurseurs émis en grande partie par les transports [26]. Bien qu’il dépende aussi de facteurs régionaux et climatiques, il peut être indirectement influencé par des changements dans la structure des mobilités urbaines.

Le choix de ces indicateurs permet ainsi de capturer à la fois la pollution chronique (NO<sub>2</sub>), les épisodes aigus (PM<sub>10</sub>) et les effets différés ou indirects (O<sub>3</sub>), offrant une mesure multidimensionnelle de la qualité de l’air dans les villes suisses. Enfin, des variables de contrôle structurelles sont obtenues auprès de l’Office fédéral de la statistique (OFS) [15]. Notamment la densité de population (hab./km<sup>2</sup>), le taux de motorisation et la surface des zones industrielles qui permettent d’ajuster les estimations aux différences de structure urbaine entre les villes.

Des incertitudes subsistent néanmoins sur la qualité des données. D’une part, OpenStreet-Map étant une base de données collaborative, la complétude et la qualité des informations peuvent varier selon les villes et les années. Certaines infrastructures peuvent apparaître tardivement dans la base malgré une existence antérieure réelle. D’autre part, les données environnementales étant agrégées à l’échelle communale, il n’est pas possible d’identifier des effets localisés des aménagements. Malgré ces limites, l’assemblage de sources ouvertes distinctes (géospatiales, environnementales et socio-démographiques) permet de constituer un jeu de données multi-sources cohérent pour étudier l’évolution conjointe des infrastructures de mobilité douce et de la pollution atmosphérique dans les villes suisses sur plus d’une décennie.

### 3 Statistiques descriptives

Les statistiques descriptives offrent un premier aperçu des écarts entre les villes suisses en matière d’infrastructures de mobilité douce et de qualité de l’air. Le tableau 1 présente les moyennes par ville de quatre indicateurs clés : la longueur des pistes cyclables, la surface des zones piétonnes, la surface des espaces verts et la densité d’arrêts de transports publics. Le tableau 2, quant à lui, montre les niveaux moyens de pollution de l’air, à travers trois indicateurs : la concentration annuelle de ( $\text{NO}_2$ ), ainsi que le nombre de jours de dépassement des seuils pour les particules fines ( $\text{PM}_{10}$ ) et l’ozone ( $\text{O}_3$ ).

La comparaison des deux tableaux met en lumière des situations contrastées entre les villes suisses. Zurich, par exemple, dispose d’un réseau cyclable particulièrement étendu, mais affiche aussi les niveaux moyens de  $\text{NO}_2$  les plus élevés de l’échantillon. À l’inverse, des villes comme Winterthour, bien équipées en espaces verts et infrastructures douces, présentent des niveaux de pollution plus modérés. Ces constats montrent que la présence d’aménagements favorables à la mobilité douce ne suffit pas à elle seule à expliquer la qualité de l’air. D’autres éléments jouent un rôle déterminant, comme la densité de population, la taille de la ville, ou encore le volume du trafic motorisé.

Il convient d’insister sur le fait que ce sont précisément les villes les plus denses, les plus peuplées ou les plus exposées à la pollution qui ont souvent le plus recours à ces infrastructures de mobilité douce, dans une logique de réponse politique et urbanistique. Cela signifie que les niveaux élevés de pollution ne sont pas forcément le signe d’un manque d’aménagements, mais peuvent au contraire coexister avec des efforts importants en matière de mobilité durable.

Ces décalages soulignent que la relation entre infrastructures douces et qualité de l’air n’est ni immédiate, ni homogène, et qu’elle dépend fortement du contexte urbain local. C’est pourquoi une analyse plus approfondie est nécessaire, afin d’identifier dans quelle mesure ces infrastructures contribuent réellement à améliorer la situation environnementale, une fois les différences structurelles entre les villes prises en compte.

TABLE 1 – Niveaux moyens d’infrastructures de mobilité douce par ville

	Piste Cyclable	Surface piétonne/km <sub>2</sub>	Surface verte/km <sub>2</sub>	Nbr. arrêts TC/km <sub>2</sub>
Basel	75.66	0.04	0.78	7.11
Bern	58.36	0.08	1.85	3.66
Biel/Bienne	13.93	0.01	0.20	6.11
Geneva	54.57	0.17	4.08	9.58
Lausanne	25.37	0.12	1.35	4.76
Lucerne	31.55	0.05	0.31	4.66
Winterthur	61.15	0.04	4.97	2.20
Zurich	148.18	0.26	1.47	5.19

TABLE 2 – Niveaux moyens de pollution de l’air par ville

	NO <sub>2</sub> µg/m <sup>3</sup>	Jours PM <sub>10</sub>	Jours O <sub>3</sub>
Basel	21.00	4.21	27.00
Bern	19.23	3.23	24.85
Biel/Bienne	19.14	-	25.57
Geneva	18.21	6.93	29.21
Lausanne	19.46	0.67	39.00
Lucerne	19.43	4.71	28.93
Winterthur	18.00	3.54	32.23
Zurich	24.93	4.50	31.71

Le tableau 3 présente les moyennes, écarts-types, minimums et maximums des principales variables analysées dans l’étude. On constate une forte variabilité, que ce soit pour les niveaux de pollution (NO<sub>2</sub>, PM<sub>10</sub>, O<sub>3</sub>) ou pour les caractéristiques d’aménagement urbain comme la longueur des pistes cyclables ou la surface des zones piétonnes. Par exemple, la concentration de NO<sub>2</sub> varie de 11 à 30 µg/m<sup>3</sup>, et la longueur des pistes cyclables s’étend de 6 à plus de 180 km selon les observations. On constate donc une décroissance continue de la pollution du NO<sub>2</sub> au fil du temps, accompagnée d’une augmentation des infrastructures cyclables dans toutes les villes, même si, ceci à des rythmes différents. Cette corrélation suggère une relation potentielle entre ces investissements et la qualité de l’air (Voir Annexe B). De tels écarts entre les villes suggèrent des différences importantes dans les contextes urbains étudiés, en termes de taille, de densité ou de politiques locales.

Cette dispersion statistique indique que les villes suisses suivent des trajectoires d’aménagement et de gestion environnementale très hétérogènes. Elle met également en évidence que les effets des infrastructures de mobilité douce sur la qualité de l’air ne peuvent pas être considérés comme uniformes. Les moyennes seules ne suffisent donc pas à tirer des conclusions généralisables. D’où l’intérêt de compléter cette analyse descriptive par une approche économétrique qui contrôle pour ces différences structurelles. Cela permettra d’estimer plus précisément l’effet propre des aménagements sur les niveaux de pollution, indépendamment des caractéristiques locales.

TABLE 3 – Statistiques descriptives agrégées par ville

	Mean	SD	Min	Max
NO <sub>2</sub>	19.97	4.22	11.00	30.00
PM <sub>10</sub>	4.28	4.95	0.00	26.00
O <sub>3</sub>	29.75	12.99	7.00	88.00
Piste cyclables	55.01	41.38	6.37	186.11
Surface piéton	0.08	0.08	0.00	0.31
Surface verte	1.72	1.76	0.03	6.01
Nbr. Arrêt TC/km <sub>2</sub>	5.30	2.01	2.20	10.00

## 4 Approche empirique

Cette section présente la stratégie économétrique adoptée pour estimer l’effet des infrastructures de mobilité douce sur la qualité de l’air dans les villes suisses. L’objectif est de mesurer l’impact d’une variation des aménagements urbains (pistes cyclables, zones piétonnes, espaces verts, arrêts de TC) sur les concentrations de polluants atmosphériques, tout en contrôlant pour les caractéristiques structurelles propres à chaque ville et pour les chocs communs à l’ensemble de l’échantillon. Compte tenu de la structure longitudinale des données, nous recourons à une approche en panel avec effets fixes, détaillée ci-dessous.

### 4.1 Modèle économétrique

Le modèle de base estimé est un modèle à effets fixes ville et année, de la forme suivante :

$$Y_{it} = \beta_1 \text{Cyclable}_{it} + \beta_2 \text{Piéton}_{it} + \beta_3 \text{Verts}_{it} + \beta_4 \text{TC}_{it} + \phi' \mathbf{X}_{it} + \mu_i + \lambda_t + \epsilon_{it} \quad (1)$$

où :

- $\mathbf{Y}_{it}$  est un indicateur de pollution atmosphérique dans la ville  $i$  à l’année  $t$  (NO<sub>2</sub>, PM<sub>10</sub> ou O<sub>3</sub>),
- **Cyclable<sub>it</sub>**, **Piéton<sub>it</sub>**, **Verts<sub>it</sub>** et **TC<sub>it</sub>** représentent respectivement la longueur des pistes cyclables, la surface des zones piétonnes, la surface des espaces verts et la densité d’arrêts de transports publics,
- $\beta_1$  à  $\beta_4$  sont les coefficients d’intérêt, qui captent les effets marginaux de chaque type d’infrastructure sur la pollution, c’est-à-dire l’impact moyen d’une variation unitaire de ces variables,
- $\mathbf{X}_{it}$  est un vecteur de variables de contrôle incluant notamment le taux de motorisation et la surface des zones industrielles,
- $\phi'$  est un vecteur des coefficients associés à chaque variable de contrôle dans  $\mathbf{X}_{it}$
- $\mu_i$  désigne les effets fixes spécifiques à chaque ville,
- $\lambda_t$  représente les effets fixes d’année,
- $\epsilon_{it}$  est le terme d’erreur.

Afin de valider le choix de cette spécification, nous avons réalisé un test de Hausman, qui a confirmé la préférence pour le modèle à effets fixes par rapport à une estimation à effets aléatoires.

## 4.2 Hypothèses et méthode d’identification

L’interprétation causale des coefficients du modèle à effets fixes repose sur trois hypothèses principales :

### **Exogénéité conditionnelle**

Le modèle suppose que, conditionnellement aux effets fixes et aux variables de contrôle, les infrastructures de mobilité douce sont exogènes par rapport au terme d’erreur. Autrement dit, cette hypothèse exclut en particulier que les politiques d’aménagement réagissent de manière simultanée à des chocs non observés affectant la pollution.

### **Variation intra-ville suffisante**

L’identification s’appuie sur une variation temporelle suffisante des variables explicatives à l’intérieur des villes. Cette condition est indispensable pour exploiter la dynamique propre à chaque ville, indépendamment de ses caractéristiques structurelles. Empiriquement, les données disponibles montrent des évolutions différenciées dans les infrastructures entre 2010 et 2023, ce qui soutient la validité de cette stratégie.

### **Structure des erreurs**

Les erreurs standards sont clusterisées par ville afin de corriger la dépendance temporelle potentielle des résidus au sein d’une même unité. Cette méthode, largement utilisée dans les modèles de panel avec un nombre restreint de groupes, permet de sécuriser l’inférence statistique face à d’éventuelles corrélations intra-ville.

## 5 Résultats

Cette section présente les résultats empiriques de l’analyse. Nous commençons par commenter les estimations issues du modèle à effets fixes ville et année, qui constitue notre spécification principale. Nous explorons ensuite des modèles alternatifs visant à tester la robustesse des résultats : un modèle en différences premières, un modèle à effets différés et une estimation en GMM pour panels dynamiques.

### 5.1 Modèle à effets fixes

Le tableau 4 présente les résultats du modèle à effets fixes ville et année. Cette spécification permet de contrôler pour l’hétérogénéité inobservable constante dans le temps au sein des villes (topographie, organisation urbaine) ainsi que pour les chocs communs à toutes les villes.



TABLE 4 – Modèle FE

	NO2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Jours PM <sub>10</sub>	Jours O <sub>3</sub>
Cyclable	0.23 (0.36)	-2.34** (0.77)	1.14 (3.46)
Zone piétonne	12.89* (3.39)	-38.20** (14.44)	-41.37 (58.00)
Zone verte	-0.42** (0.15)	0.45 (0.40)	1.33 (0.81)
Zone industrielle	0.11 (0.37)	1.16 (2.15)	-1.46 (2.35)
Arrêts transports	-2.61** (1.05)	4.24 (2.89)	6.12 (9.28)
Taux de motorisation	-0.00 (0.02)	0.03 (0.03)	0.01 (0.11)
Constant	37.88** (12.81)	-18.35 (13.97)	-7.76 (82.71)
Observations	101	82	101
R <sup>2</sup> w.adj.	0.95	0.90	0.68

Standard errors in parentheses

 $p < 0.10$ , \*  $p < 0.05$ , \*\*  $p < 0.01$ , \*\*\*

Ces résultats mettent en évidence des effets différenciés selon le type d'infrastructure et le polluant considéré.

Pour le NO<sub>2</sub>, deux coefficients ressortent significativement ( $p < 0.05$ ) : la surface des zones vertes et la densité des arrêts de transports publics sont toutes deux associées à une réduction des concentrations. Ces résultats suggèrent que des aménagements favorisant l'accessibilité et la végétalisation peuvent contribuer à limiter la pollution liée au trafic motorisé [12]. En revanche, la longueur des pistes cyclables et les zones piétonnes ne présentent pas d'effet significatif sur cet indicateur.

Les effets sont plus marqués pour les PM<sub>10</sub> : l'extension des zones piétonnes et des pistes cyclables sont associées à une baisse significative ( $p < 0.05$ ) du nombre de jours de dépassement du seuil journalier. Ce résultat confirme l'impact potentiel de la restriction du trafic dans les centres sur la pollution particulaire. Aucune des variables n'est en revanche significative pour l'ozone, ce qui est cohérent avec la nature régionale et photochimique de ce polluant.

Ces résultats confirment l'intérêt d'une partie des politiques de mobilité douce pour améliorer la qualité de l'air [3], tout en soulignant la complexité des mécanismes en jeu et la nécessité d'analyses complémentaires.

## 5.2 Spécifications alternatives

Nous explorons trois spécifications complémentaires afin de tester la robustesse des résultats : un modèle en différences premières, un modèle à effets différés, et un modèle dynamique estimé par GMM. Les résultats détaillés sont reportés en annexe (Voir Annexes C à E).

### 5.2.1 Modèle en différences premières

Les résultats issus du modèle en différences premières apportent un éclairage contrasté par rapport à ceux obtenus avec les effets fixes. En isolant uniquement les variations annuelles intra-ville, cette méthode met en évidence un effet significatif des zones piétonnes sur la réduction du  $\text{NO}_2$  ( $p < 0.05$ ), absent dans la spécification principale. Cette divergence suggère que l'effet de ces aménagements pourrait être masqué dans les effets fixes par des dynamiques de fond ou des niveaux structurels. Elle pourrait également indiquer une plus grande réactivité de la pollution à des interventions ponctuelles, perceptibles uniquement dans les ruptures annuelles.

Cependant, la faiblesse statistique de plusieurs coefficients et l'instabilité des signes rappellent que les différences premières réduisent la variance exploitable, ce qui rend difficile l'identification de tendances faibles ou progressives. La perte d'information liée à cette transformation limite la capacité à capter les effets diffus ou structurels, en particulier pour des variables évoluant lentement comme les infrastructures cyclables.

Dans l'ensemble, ces résultats ne remettent pas en cause les conclusions du modèle principal, mais montrent que certains effets pourraient être sensibles à la temporalité de l'ajustement urbain [27]. Le recours aux différences premières confirme ainsi l'intérêt d'une approche multi-modèle pour saisir la diversité des mécanismes en jeu.

### 5.2.2 Modèle à effets différés

Le modèle à effets différés introduit les variables d'infrastructure avec un décalage temporel de deux ans, afin de tester l'hypothèse selon laquelle les impacts des aménagements urbains sur la qualité de l'air ne sont pas immédiats, mais s'inscrivent dans le temps [27]. Cette approche est particulièrement justifiée dans le contexte de la mobilité douce, où les changements d'usage (adoption du vélo, désengorgement automobile, adaptation des comportements) peuvent prendre plusieurs années.

Les résultats révèlent un effet différé significatif des pistes cyclables sur les  $\text{PM}_{10}$ , absent dans les spécifications contemporaines. Ce résultat suggère qu'une amélioration progressive de la qualité de l'air peut émerger après un temps d'adaptation ou de montée en charge des infrastructures. À l'inverse, l'effet différé des zones piétonnes sur le  $\text{NO}_2$ , positif et significatif, peut indiquer une redistribution du trafic motorisé vers d'autres axes, générant une pollution accrue à proximité ou en périphérie [1].

La structure différée enrichit ainsi la compréhension des mécanismes à l'œuvre, en soulignant la temporalité hétérogène des effets selon le type d'aménagement. Toutefois, cette approche augmente le nombre de paramètres estimés dans un panel déjà restreint, ce qui accroît l'incertitude des coefficients et rend leur interprétation plus sensible.

En complément du modèle principal, les effets différés confirment que les politiques de mobilité douce ne produisent pas nécessairement des effets instantanés, et qu'il est essentiel

de considérer la dynamique des usages pour en évaluer les retombées environnementales.

### 5.2.3 GMM

Le modèle GMM (Generalized Method of Moments) permet d'introduire explicitement une dynamique dans la pollution de l'air en incluant sa valeur retardée parmi les régresseurs. Cette approche est particulièrement adaptée à des variables comme le  $\text{NO}_2$  et les  $\text{PM}_{10}$ , connues pour leur inertie, et offre l'avantage de corriger un biais potentiel d'endogénéité en instrumentant les variables explicatives par leurs valeurs passées.

Les résultats confirment cette dynamique : les coefficients autorégressifs des  $\text{PM}_{10}$  et du  $\text{NO}_2$  sont significatifs ( $p < 0.05$  et  $p < 0.10$  respectivement), indiquant une forte persistance dans le temps. En revanche, l'effet estimé des infrastructures, notamment celui des zones piétonnes, est plus faible que dans le modèle à effets fixes, voire non significatif. Ce contraste suggère que l'impact positif initial observé sur le  $\text{NO}_2$  pourrait en partie refléter un biais d'endogénéité, c'est-à-dire une réaction des politiques urbaines à des niveaux de pollution élevés plutôt qu'un effet causal direct.

Ce modèle renforce donc la prudence dans l'interprétation des résultats du modèle principal, en rappelant que l'endogénéité est une menace empirique sérieuse dans les contextes urbains où les politiques environnementales sont souvent réactives. Cela étant dit, la performance du GMM dans notre cas reste limitée par la taille restreinte de l'échantillon : le nombre d'unités (villes) est faible, ce qui affecte la puissance des tests d'instruments et peut générer de l'instabilité dans les coefficients.

## 6 Conclusion

Cette étude a évalué l'impact des infrastructures de mobilité douce sur la pollution atmosphérique dans huit grandes villes suisses entre 2010 et 2023. En mobilisant des données géospatiales issues d'OpenStreetMap, des indicateurs environnementaux de l'OFEV et des données socio-démographiques de l'OFS, nous avons construit un panel original analysé au moyen de modèles économétriques à effets fixes, complétés par des spécifications alternatives (différences premières, effets différés, GMM). Quatre types d'aménagements urbains ont été considérés : les pistes cyclables, les zones piétonnes, les espaces verts et la densité d'arrêts de transports publics, en lien avec trois indicateurs de pollution :  $\text{NO}_2$ ,  $\text{PM}_{10}$  et  $\text{O}_3$ .

Les résultats montrent des effets différenciés selon les types d'infrastructures et de polluants. Les espaces verts et les arrêts de transports publics sont associés à une baisse significative des niveaux de  $\text{NO}_2$ , tandis que les zones piétonnes semblent réduire les pics de  $\text{PM}_{10}$ . Aucun effet robuste n'est identifié pour l'ozone. Ces résultats mettent en évidence que certaines formes de mobilité douce peuvent contribuer à une amélioration de la qualité de l'air, en particulier lorsqu'elles sont intégrées dans une politique urbaine cohérente.

Les modèles alternatifs soulignent l'importance de considérer la dynamique temporelle des effets et les risques d'endogénéité dans les politiques d'aménagement. Ils montrent que les bénéfices environnementaux ne sont pas toujours immédiats et peuvent dépendre de la maturité des infrastructures ou des changements comportementaux progressifs.

## 6.1 Implications

Sur le plan empirique, nos résultats confirment que la promotion de la mobilité douce peut être un levier crédible de lutte contre la pollution urbaine. Cette dynamique s’inscrit pleinement dans les objectifs de durabilité poursuivis par de nombreuses villes suisses, en lien avec les engagements climatiques nationaux. Les infrastructures piétonnes, vertes ou de transports collectifs apparaissent comme les plus efficaces à court terme pour améliorer la qualité de l’air. Ces améliorations environnementales sont également susceptibles d’être associées à des bénéfices documentés pour le bien-être subjectif, notamment grâce à une potentielle réduction des nuisances sonores, de la congestion routière et de la pollution atmosphérique. Ces éléments peuvent guider les collectivités dans l’allocation de leurs investissements, en privilégiant les aménagements ayant le meilleur potentiel environnemental et sanitaire.

D’un point de vue méthodologique, notre approche souligne l’intérêt d’une lecture multi-modèle et l’importance d’un cadre empirique rigoureux dans l’évaluation des politiques publiques. Ce type d’analyse contribue à objectiver les choix d’aménagement et à concevoir des politiques plus ciblées et efficaces, fondées sur des données fiables et des méthodes reproductibles. En éclairant les liens entre urbanisme, mobilité et environnement, ces travaux participent à la construction de villes plus résilientes et soutenables.

## 6.2 Perspectives de recherche

Plusieurs prolongements peuvent être envisagés. L’analyse pourrait être affinée en mobilisant des données plus désagrégées, à l’échelle des quartiers ou des axes routiers, afin de mieux identifier les effets de proximité. L’intégration de données météorologiques ou de flux de mobilité (GPS, capteurs, transports publics) permettrait également de mieux caractériser les mécanismes causaux à l’œuvre. Enfin, l’élargissement à d’autres dimensions de la durabilité urbaine, telles que la santé publique, le bruit, l’accessibilité ou l’équité environnementale, ouvrirait la voie à des approches plus intégrées, essentielles pour guider les transitions écologiques locales.

# Références

1. Airparif. Évaluation de l'impact de la piétonnisation de la voie sur berge rive droite à paris — rapport final. Technical report, Airparif, Paris, France, 2017. Consulté en juin 2025.
2. Mathias Basner, Charlotte Clark, Anna Hansell, James I. Hileman, Sabine A. Janssen, Kevin Shepherd, and Mark Brink. Noise impacts on health in the context of air pollution exposure. *Environmental Research*, 214(3) :113754, 2022.
3. Cerema. Qualité de l'air et mobilité : Les essentiels. <https://publications.cerema.fr/webdc/dc/les-essentiels/qualite-air/>, 2025. Consulté en juin 2025.
4. Comission fédérale de l'hygiène de l'air CFHA. les nouvelles lignes directrices oms relatives à la qualité de l'air 2021 et leur importance pour l'ordonnance fédérale sur la protection de l'air. Technical report, Comission fédérale de l'hygiène de l'air CFHA, 2023. Consulté en mai 2025.
5. Ville de Lausanne. Plan de mobilité de l'administration lausannoise. <https://www.lausanne.ch>, 2024. Version du 1er mars 2024, consulté en avril 2025.
6. Regierungsrat des Kantons Basel-Stadt. Basel unterwegs – klimafreundlich ans ziel. mobilitätsstrategie. Technical report, Kanton Basel-Stadt, Basel, Suisse, 2023.
7. Regierungsrat des Kantons Bern. Gesamtmobilitätsstrategie des kantons bern 2022. Technical report, Amt für öffentlichen Verkehr und Verkehrskoordination, Kanton Bern, Bern, Suisse, 2022.
8. European Cyclists' Federation. Cycling and urban air quality : A study of european experiences. Technical report, European Cyclists' Federation, Brussels, Belgium, 2015. Accessed May 2025.
9. Roman Frick, Philipp Wüthrich, and Mario Keller. Co-potenzial des langsamverkehrs : Verlagerung von kurzen miv-fahrten. Technical report, INFRAS, Bern, Suisse, 2005. Rapport final commandé par l'OFROU (ASTRA).
10. Eva Heinen, Bert van Wee, and Kees Maat. Commuting by bicycle : An overview of the literature. *Transport Reviews*, 30(1) :59–96, 2010.
11. Sonia Lavadinho and Giuseppe Pini. Développement durable, mobilité douce et santé en milieu urbain. Technical report, Observatoire Universitaire de la Mobilité, Genève, Suisse, 2005.
12. Yao Li, Jie Zhang, Jing Wang, Qiang Yang, Panpan Zhao, Fanhui Zhang, Zhaowei Yu, and Qi Huang. Impacts of low-emission zones on air quality : Evidence from a quasi-experimental design in beijing. *Transport Policy*, 142 :128–138, 2024. Consulté en juin 2025.
13. Kostas Mouratidis. Urban planning and quality of life : A review of pathways linking the built environment to subjective well-being. *Cities*, 115 :103229, 2021.
14. Natalie Mueller, David Rojas-Rueda, Tom Cole-Hunter, Audrey de Nazelle, Evi Dons, Regine Gerike, Thomas Götschi, Luc Int Panis, Sonja Kahlmeier, and Mark J. Nieuwenhuijsen. Health impact assessment of active transportation : A systematic review. *Preventive Medicine*, 76 :103–114, 2015.

15. Office fédéral de la statistique (OFS). Portail de données statistiques de la suisse. <https://www.bfs.admin.ch>, 2025. Consulté en mai 2025.
16. Office fédéral de la statistique (OFS). Véhicules routiers, parc et taux de motorisation. <https://www.bfs.admin.ch/bfs/fr/home/statistiques/mobilite-transport/infrastructures-transport-vehicules/vehicules/vehicules-routiers-parc-taux-motorisation.html>, 2025. Consulté en juin 2025.
17. Office fédéral de l'environnement (BAFU). Site officiel de l'office fédéral de l'environnement (bafu). <https://www.bafu.admin.ch/bafu/fr/home.html>, 2025. Consulté en mai 2025.
18. Office fédéral de l'environnement (OFEV). Effets de la pollution atmosphérique sur la santé. <https://www.bafu.admin.ch/bafu/fr/home/themes/air/effets-de-la-pollution-atmospherique/effets-de-la-pollution-atmospherique-sur-la-sante.html>, 2025. Consulté en juin 2025.
19. Office fédéral de l'environnement (OFEV). Qualité de l'air – indicateurs de la pollution atmosphérique en suisse, 2025. Consulté sur le site de l'OFEV.
20. Office fédéral de l'environnement (OFEV) and Laboratoire fédéral d'essai des matériaux et de recherche (Empa). La qualité de l'air en 2023 : Résultats du réseau national d'observation des polluants atmosphériques (nabel). Technical report, Office fédéral de l'environnement (OFEV), Berne, Suisse, 2024. Consulté en mai 2025.
21. Office fédéral des routes (OFROU). Mobilité douce – office fédéral des routes (astra). <https://www.astra.admin.ch/astra/fr/home/themes/mobilite-douce.html>, 2025. Consulté en mai 2025.
22. OpenStreetMap contributors. Openstreetmap : The free wiki world map. <https://www.openstreetmap.org>, 2025. Consulté en mai 2025.
23. Organisation mondiale de la Santé (OMS). *Lignes directrices mondiales sur la qualité de l'air : mise à jour mondiale 2021 : particules (PM<sub>10</sub> et PM<sub>2.5</sub>), ozone, dioxyde d'azote, dioxyde de soufre et monoxyde de carbone*. Organisation mondiale de la Santé, Genève, Suisse, 2021. Consulté en mai 2025.
24. John Pucher and Ralph Buehler. Walking and cycling for healthy cities. *Built Environment*, 36(4) :391–414, 2010.
25. David Rojas-Rueda, Mark Nieuwenhuijsen, Haneen Khreis, and Natalie Mueller. Health impacts of active transportation in europe. *PLOS ONE*, 11(3), 2016.
26. World Health Organization (WHO). Air pollution and health – exposure to air pollution. <https://www.who.int/teams/environment-climate-change-and-health/air-quality-energy-and-health/health-impacts/exposure-air-pollution>, 2025. Consulté en mai 2025.
27. Yifan Zhang, Jing Wu, Zhichao Feng, Bo Zhang, Tao Liu, Yuming Chen, Yu Wang, Lei Xu, Yong Lu, Wei Wei, et al. Spatial-temporal analysis of urban air pollution related exposure and health impacts : Driving human-centered regulation and control. *The Innovation*, 5(3) :100550, 2024. Consulté en juin 2025.

28. Stadt Zürich. Stadtraum und mobilität 2040 – lebenswert bleiben. klimaneutral werden. Technical report, Kanton Zurich, Zürich, Suisse, 2023.

# Annexes

## A Zones d'extraction des géodonnées par ville

Les cartes ci-dessous ont été codées en exploitant des données extraites d'OpenStreetMap. La présence de certaines incertitudes n'est pas exclue. Par exemple, la carte de Lausanne présente des erreurs évidentes (zone du lac) que nous avons corrigées dans nos données quantitatives en conséquence. Nous avons procédé de la même manière pour les autres erreurs visibles.

### A.1 Bâle

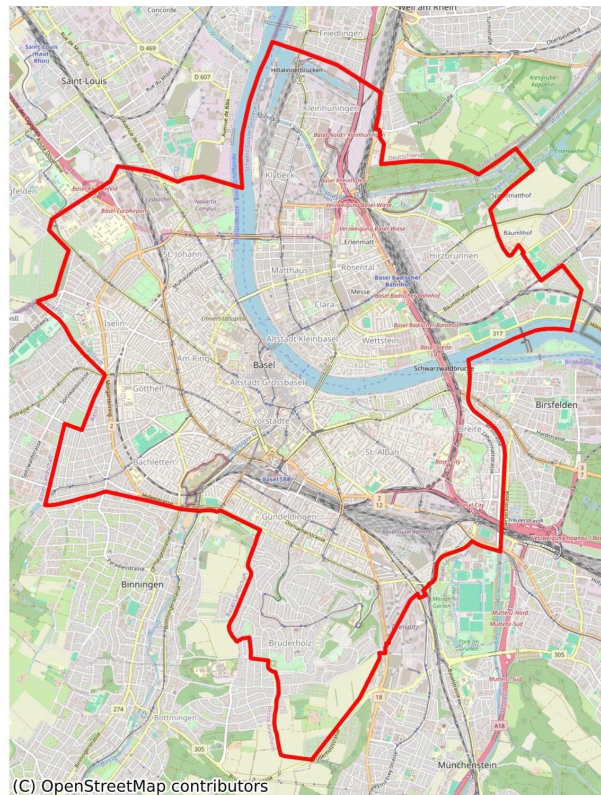


FIGURE 1 – Carte de Bâle



## A.2 Berne



FIGURE 2 – Carte de Berne

### A.3 Genève



FIGURE 3 – Carte de Genève

## A.4 Lausanne

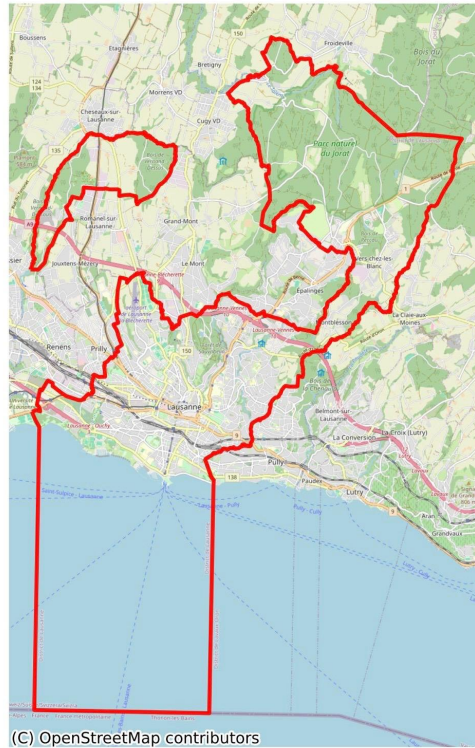


FIGURE 4 – Carte de Lausanne

## A.5 Lucerne

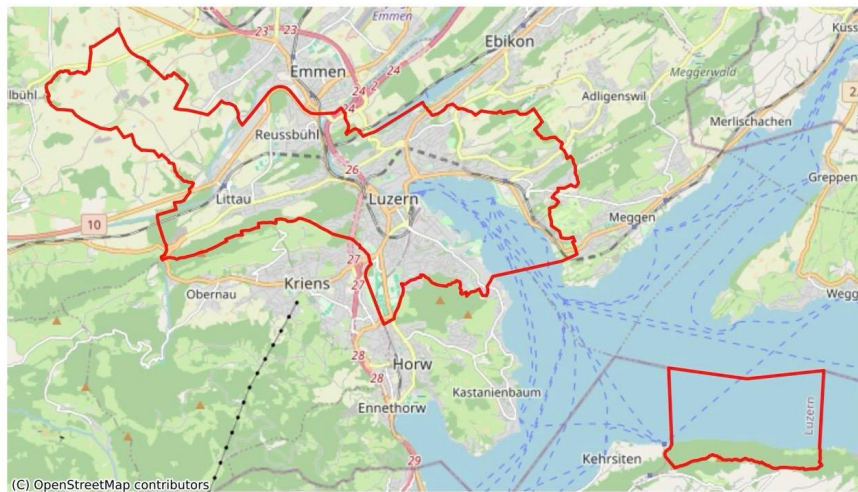


FIGURE 5 – Carte de Lucerne



## A.6 Winterthour

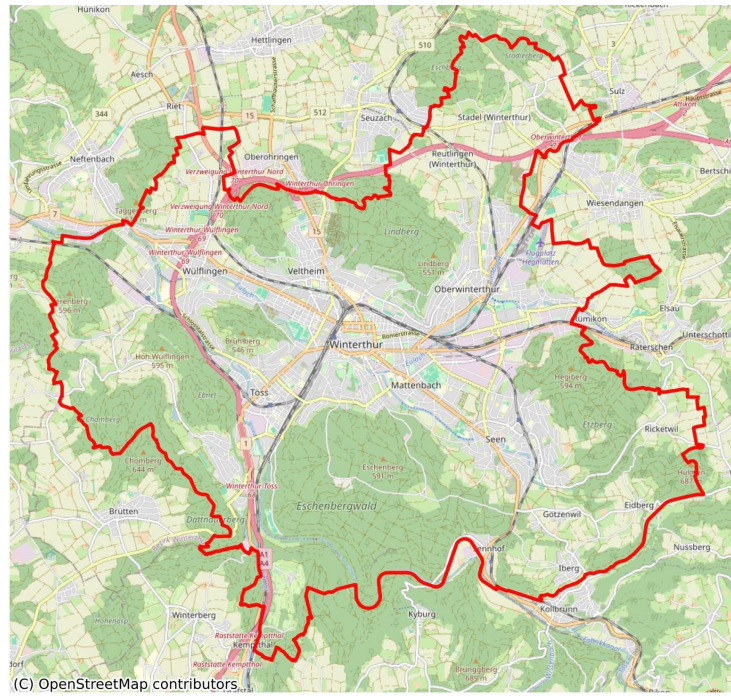


FIGURE 6 – Carte de Winterthour

## A.7 Bienne

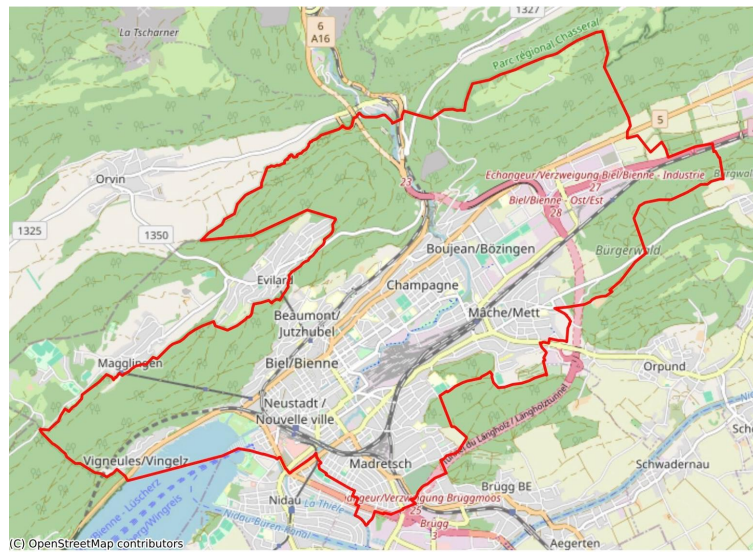


FIGURE 7 – Carte de Bienne

## A.8 Zurich



FIGURE 8 – Carte de Zurich

## B Corrélation entre $\text{NO}_2$ et pistes cyclables

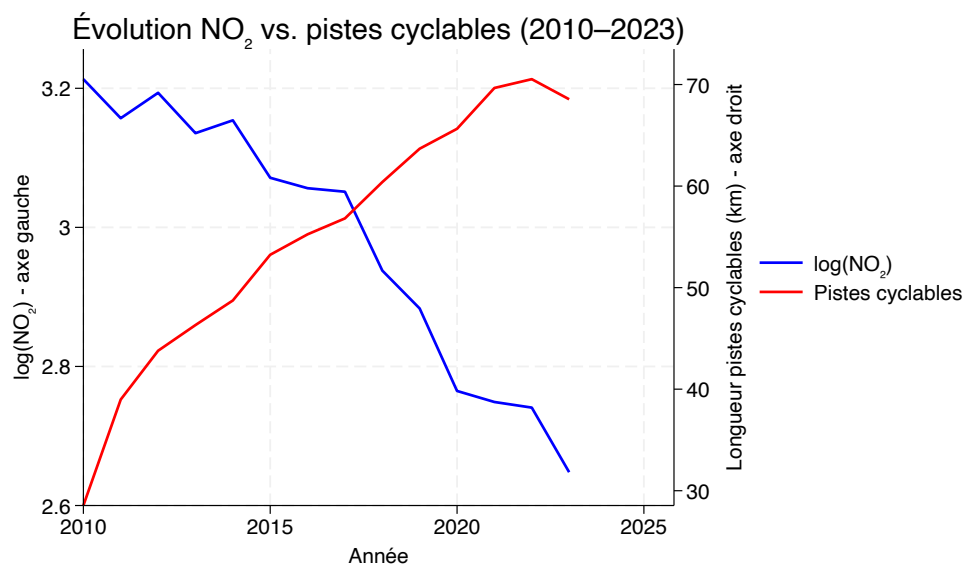


FIGURE 9 – Évolution  $\text{NO}_2$  et pistes cyclables

## C Modèle Différences premières

### C.1 Modèle empirique

Le modèle en différences premières estime l'effet des variations annuelles des infrastructures de mobilité douce sur la pollution atmosphérique, en neutralisant les caractéristiques propres à chaque ville. Il permet de tester si une modification ponctuelle, telle que l'extension d'une piste cyclable, entraîne une évolution immédiate des niveaux de pollution. Cette spécification est utilisée ici comme test de robustesse et elle est de la forme suivante :

$$\Delta \text{NO2}_{it} = \beta_1 \Delta \text{Cyclable}_{it} + \beta_2 \Delta \text{Piéton}_{it} + \beta_3 \Delta \text{Vert}_{it} + \beta_4 \Delta \text{TC}_{it} + \phi' \Delta \mathbf{X}_{it} + \sum_t \gamma_t \Delta D_t + \Delta \varepsilon_{it} \quad (2)$$

### C.2 Résultats

TABLE 5 – Résultats Différences premières

	NO2 µg/m <sup>3</sup>	Jours PM10	Jours O <sub>3</sub>
Cyclable	-0.13 (0.46)	0.06 (1.43)	7.75 (5.06)
Zone piétonne	-25.99** (7.57)	28.95 (21.38)	149.52 (94.40)
Zone verte	0.72* (0.12)	-0.43 (0.26)	-4.99* (1.20)
Zone industrielle	-0.48 (0.70)	2.45 (1.97)	4.20 (4.42)
Arrêts transports	0.43 (0.75)	2.77** (0.99)	5.71 (11.00)
Taux de motorisation	0.01 (0.01)	0.04 (0.02)	-0.14 (0.13)
Constant	24.18* (0.36)	7.58* (0.44)	25.03* (2.61)
Observations	93	77	94
R <sup>2</sup> w.adj.	0.96	0.87	0.73

Standard errors in parentheses

$p < 0.10$ , \*  $p < 0.05$ , \*\*  $p < 0.01$ , \*\*\*

## D Modèle Effets Différés

### D.1 Modèle empirique

Le modèle à effets différés introduit les variables d'infrastructure avec un ou plusieurs retards, afin d'évaluer si les effets des aménagements urbains sur la qualité de l'air apparaissent avec un certain délai. Elle permet ainsi de mieux capter la temporalité réelle des effets, sans supposer qu'ils sont immédiats. La régression effectuée s'inscrit comme suit :

$$\text{NO2}_{it} = \beta_1 \text{Cyclable}_{i,t-2} + \beta_2 \text{Piéton}_{i,t-2} + \beta_3 \text{Vert}_{i,t-2} + \beta_4 \text{TC}_{i,t-2} + \phi' \mathbf{X}_{it} + \sum_t \gamma_t D_t + \mu_i + \varepsilon_{it} \quad (3)$$

### D.2 Résultats

TABLE 6 – Résultats Effets Différés

	NO2 µg/m <sup>3</sup>	Jours PM10	Jours O <sub>3</sub>
Lag.Cyclable	0.09 (0.37)	-0.49 (0.70)	-3.75 (2.77)
Lag.Zone piétonne2	21.87* (1.95)	-20.10 (15.67)	-94.31 (81.43)
Lag.Zone Verte	-0.83* (0.08)	-0.29 (0.41)	4.91* (1.18)
Lag.Arrêts transports	-0.71 (0.90)	-0.04 (2.12)	0.42 (5.26)
Zone industrielle	0.16 (0.30)	3.30 (2.46)	-0.91 (1.95)
Taux de motorisation	0.01 (0.00)	0.05 (0.02)	-0.07 (0.07)
Constant	22.37** (6.53)	-9.80 (13.10)	62.10 (49.58)
<i>N</i>	85	71	86
R <sup>2</sup> w.adj.	0.97	0.87	0.74

Standard errors in parentheses

$p < 0.10$ , \*  $p < 0.05$ , \*\*  $p < 0.01$ , \*\*\*

## E Modèles Dynamiques

### E.1 Modèle empirique

Dans notre étude, le modèle GMM constitue une vérification complémentaire visant à tester la robustesse des effets estimés, en particulier pour les cas où les politiques d'aménagement pourraient réagir à des niveaux de pollution passés. Il permet d'introduire une dynamique dans les niveaux de pollution en incluant la valeur retardée de la variable dépendante. Voici sa forme :

$$\begin{aligned}\Delta\text{NO2}_{it} = & \delta \Delta\text{NO2}_{i,t-1} + \beta_1\Delta\text{Cyclable}_{it} + \beta_2\Delta\text{Piéton}_{it} + \beta_3\Delta\text{Vert}_{it} \\ & + \beta_4\Delta\text{TC}_{it} + \phi'\Delta\mathbf{X}_{it} \\ & + \sum_t \gamma_t \Delta D_t + \Delta\varepsilon_{it}\end{aligned}\tag{4}$$

### E.2 Résultats

TABLE 7 – Résultats GMM

	NO2 µg/m <sup>3</sup>	Jours PM10	Jours O <sub>3</sub>
Lag.Qualité de l'air	0.62* (0.13)	-0.22** (0.09)	0.15 (0.22)
Cyclable	0.30 (0.19)	-3.69* (0.53)	-0.04 (1.48)
Zone piétonne	7.48* (2.19)	2.33 (6.14)	-8.86 (22.68)
Surface verte	-0.34* (0.19)	0.02 (0.16)	0.24 (0.67)
Zone industrielle	0.32 (0.21)	2.37* (0.70)	-1.68 (1.84)
Arrêts transports	-0.18* (0.09)	2.81** (0.44)	-0.28 (0.76)
Taux de motorisation	-0.00 (0.00)	0.04* (0.01)	-0.04 (0.03)
Constant	6.06* (2.79)	-19.55** (6.80)	26.26 (19.88)
<i>N</i>	98	79	98

Standard errors in parentheses

$p < 0.10$ , \*  $p < 0.05$ , \*\*  $p < 0.01$ , \*\*\*