

LOW EMISSIONS ZONE

Évaluation de la zone à faible émissions parisienne avec le simulateur METROPOLIS2

Lucas Javaudin & André de Palma

THEMA, CY Cergy Paris Université

LVMT – 14 février 2025

LOW EMISSIONS ZONE



LEZ Quality



Twind Wolf her Chiriqueres



AGED CNECLIN



EE1000y



Intertical TUNIS



Even river distore

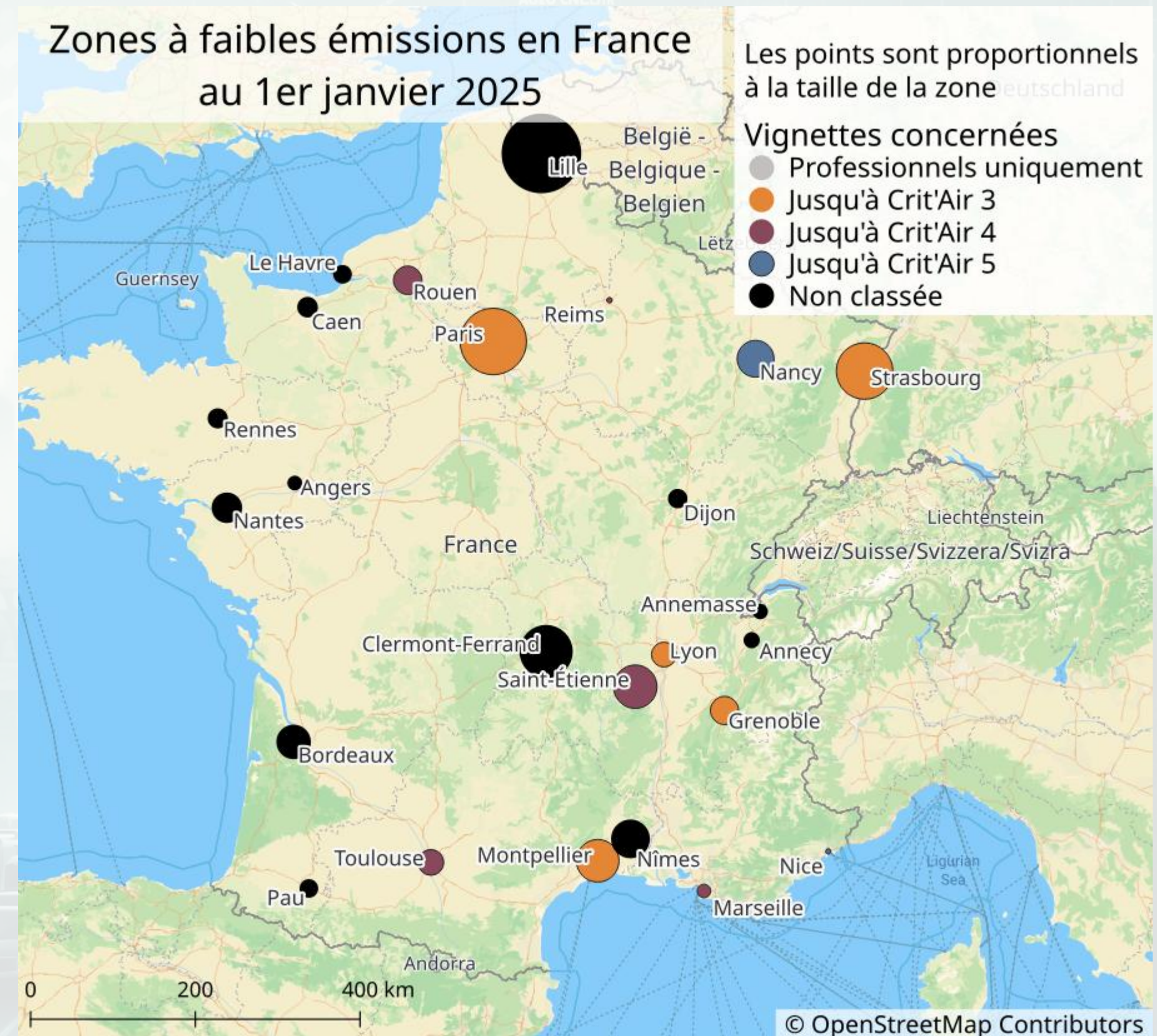
Introduction

Contexte

- Le secteur des transports routiers est responsable de **37 % des émissions d'oxydes d'azote (NO_x)** en Europe (EEA, 2021)
- La pollution aux oxydes d'azote provoque environ **40 000 décès prématurés** par an en Europe (EEA, 2021)
- En Île-de-France, les polluants locaux provoquent **7 920 décès prématurés par an** (AirParif, 2022)
- Instrument pour améliorer la qualité de l'air : les **zones à faibles émissions (ZFE)**

Zone à faibles émissions

- **Zone à faibles émissions (ZFE)** : partie d'une agglomération interdite à la circulation pour les véhicules les plus polluants
- En Europe, des ZFE sont aujourd'hui mises en places dans des **centaines de villes**
- En France, **25 villes** possèdent actuellement une ZFE (obligatoire lorsque la qualité de l'air n'est pas satisfaisante)



Vignettes Crit'Air

- Les restrictions dans les ZFE sont basées sur les **vignettes Crit'Air**
- Chaque véhicule possède une vignette selon sa **motorisation** (diesel, essence, électrique, etc.) et son **ancienneté**



Une politique controversée

Arguments pour

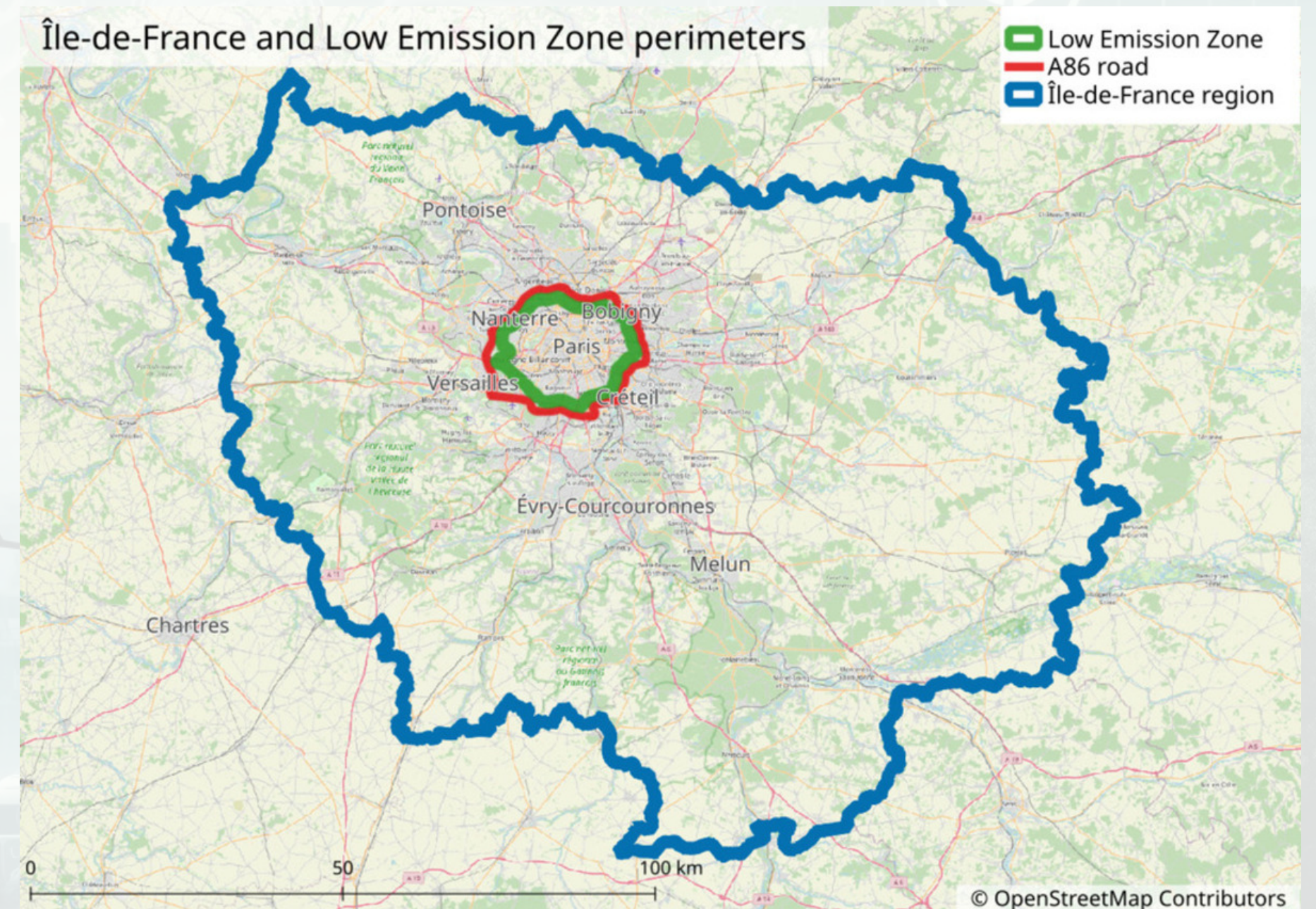
- Meilleure qualité de l'air
- Réduction des émissions de CO₂
- Réduction du bruit
- Réduction de la congestion

Arguments contre

- Restriction de liberté
- Injustice : pénalise plus fortement les personnes pauvres vivant en milieu rural
- Risque de hausse de la pollution s'il y a beaucoup de détour
- Incitation à remplacer les anciens véhicules avant leur fin de vie

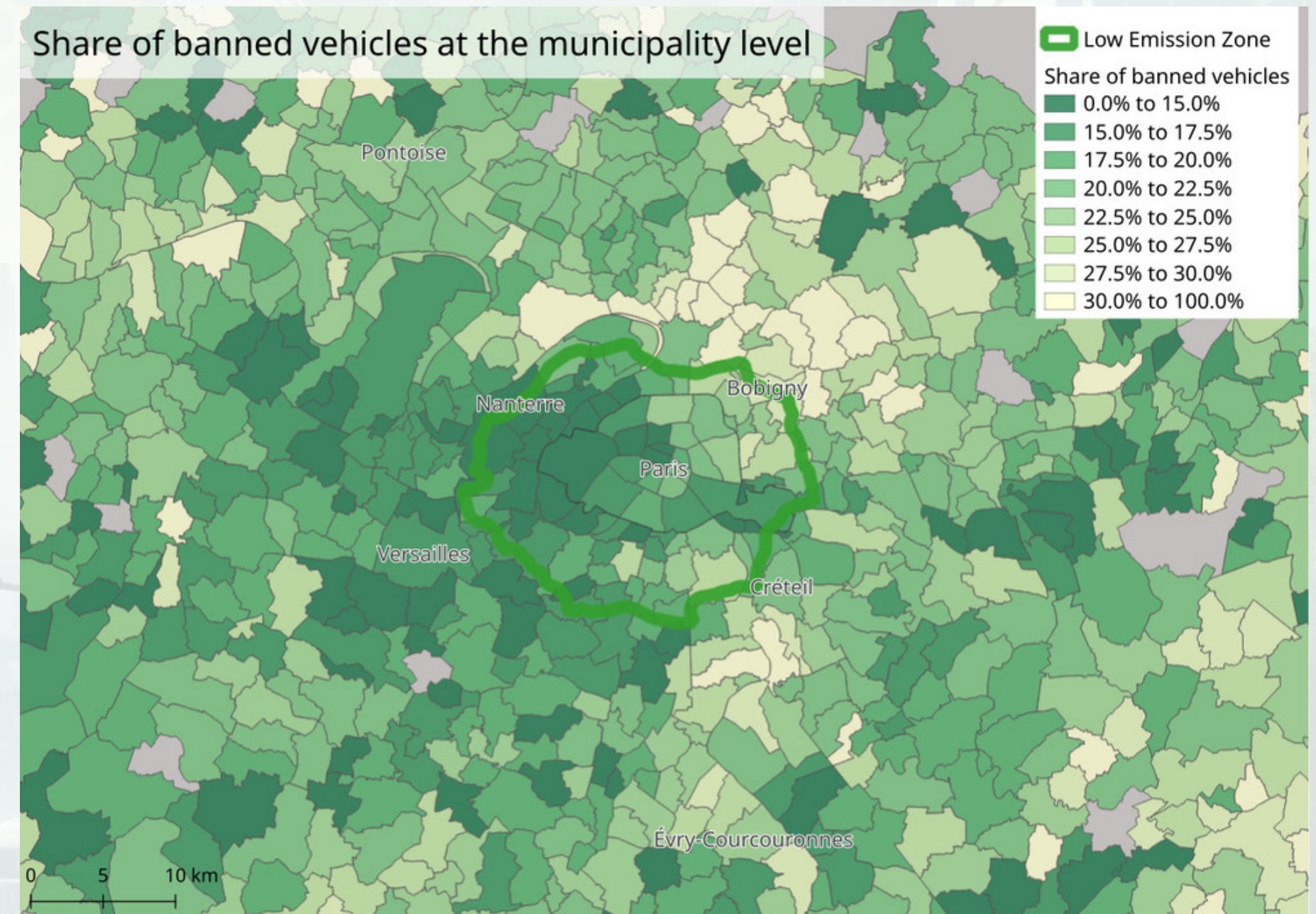
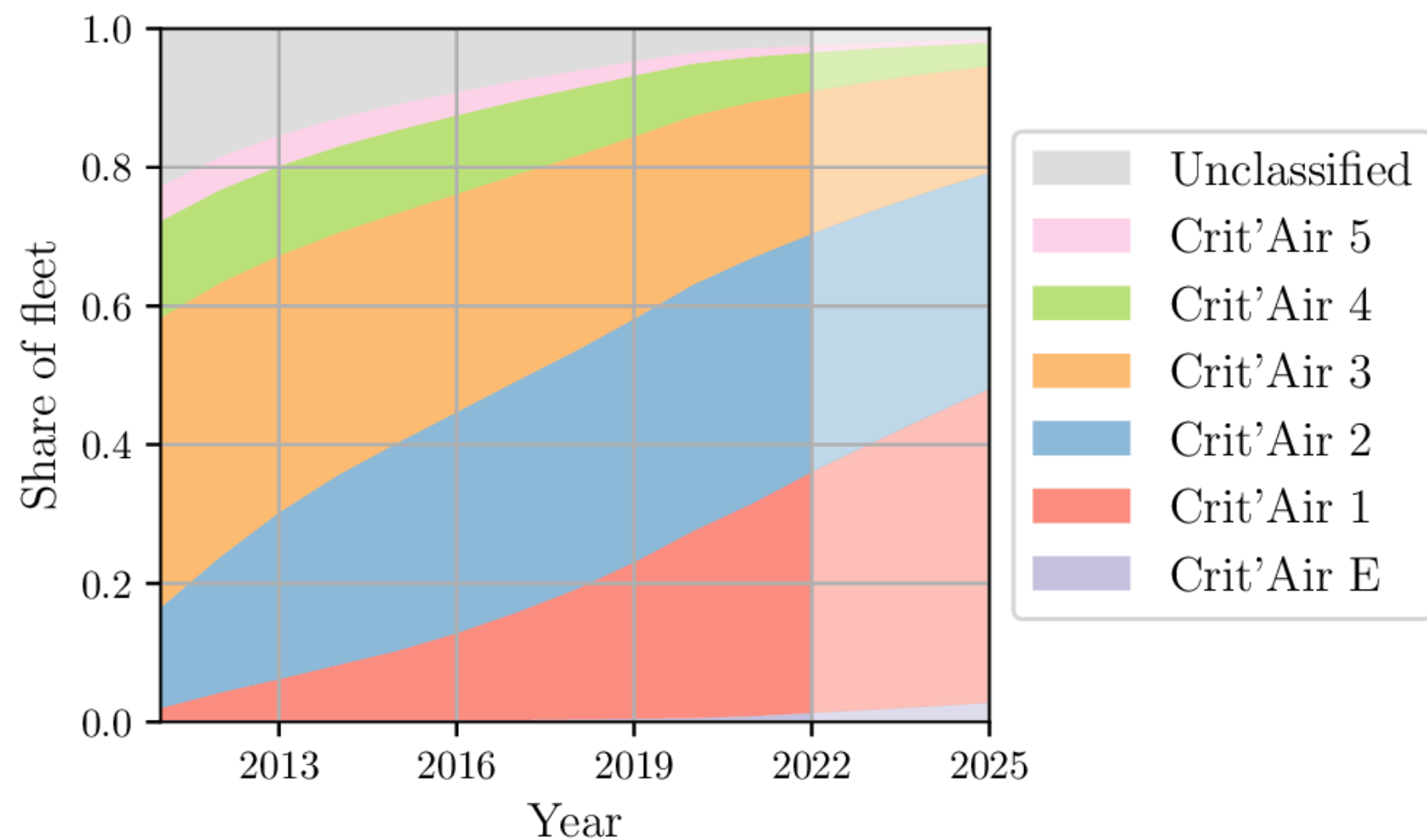
Zone à faibles émissions de la Métropole du Grand Paris

- Paris et 76 communes de petite couronne
- 367 km² (3 % de l'Île-de-France)
- 5 M d'habitants (40 % de l'Île-de-France)
- L'autoroute A86 permet de contourner la zone facilement
- Depuis janvier 2025 : les véhicules Crit'Air 3 ou pire sont interdits
- Amende de 68 € en cas de non respect



Le parc automobile d'Île-de-France

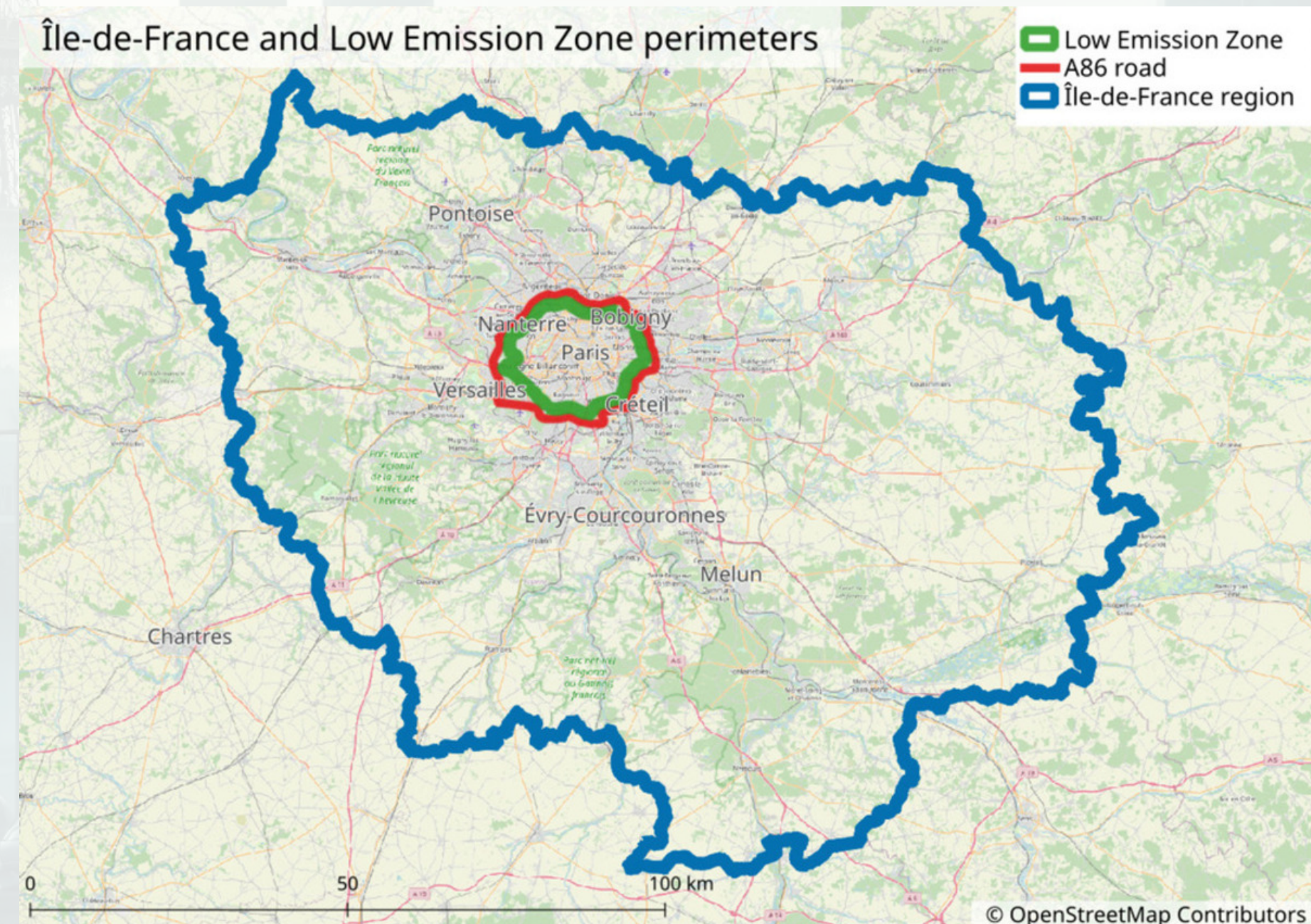
- Données sur le **parc automobile au niveau communal** (incluant les vignettes Crit'Air) fournies par le SDES
- **Extrapolation** des données pour prédire le parc automobile en 2025
- En 2025, environ **21 %** des voitures de la région seraient Crit'Air 3 ou moins bien



Questions de recherche

Analyse de la zone à faibles émissions de la Métropole du Grand Paris à l'aide d'un simulateur de transport (METROPOLIS2)

- Quel est l'**impact global** de la ZFE (sur la qualité de l'air, la congestion, etc.) ?
- Quels sont les **gagnants** et les **perdants** de cette politique ?



LOW EMISSIONS ZONE



LEZ Quality



Tree and Leaf Characteristics



AGED CIRCLE



EE1000



Interdisciplinary Teams

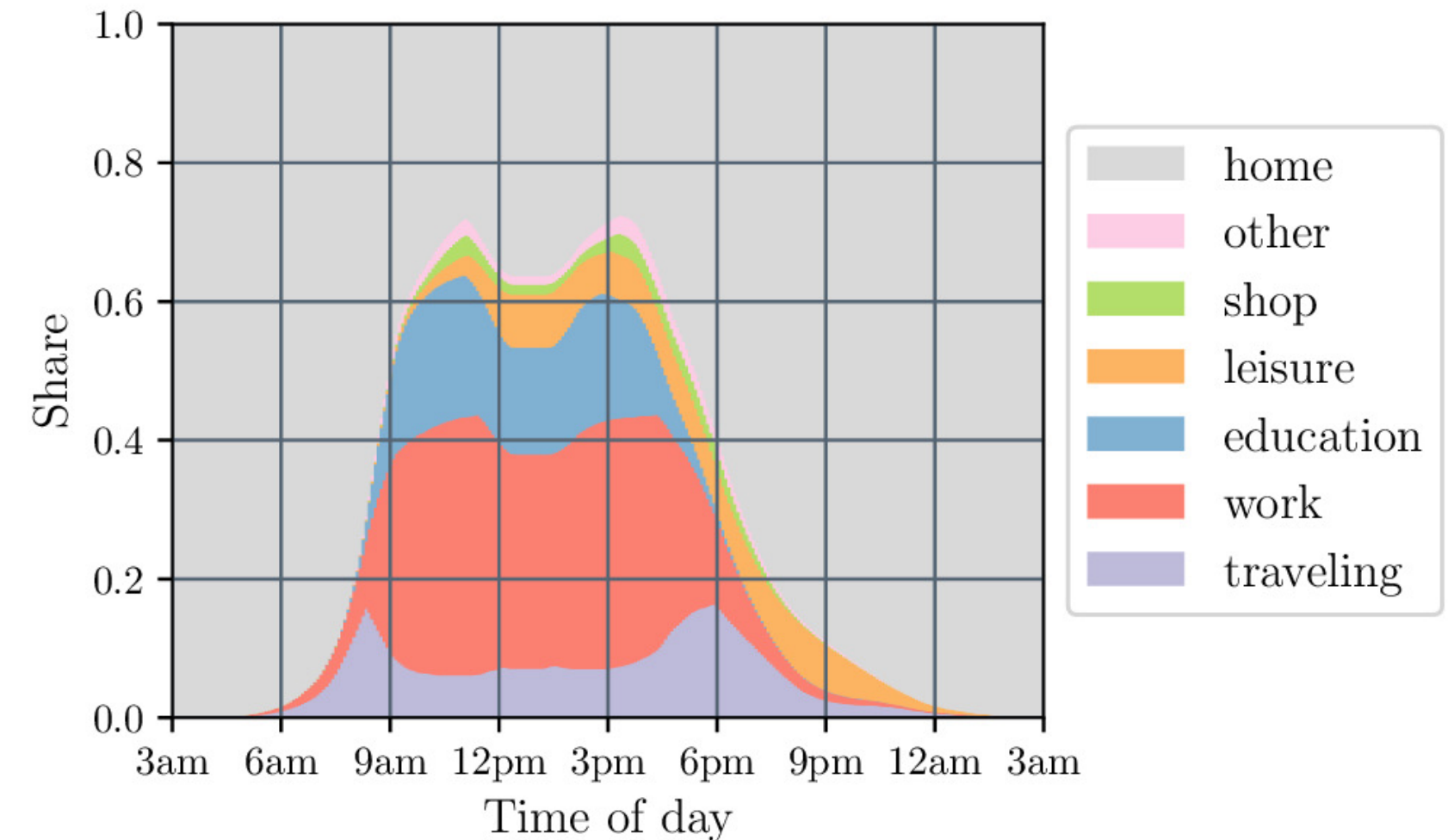
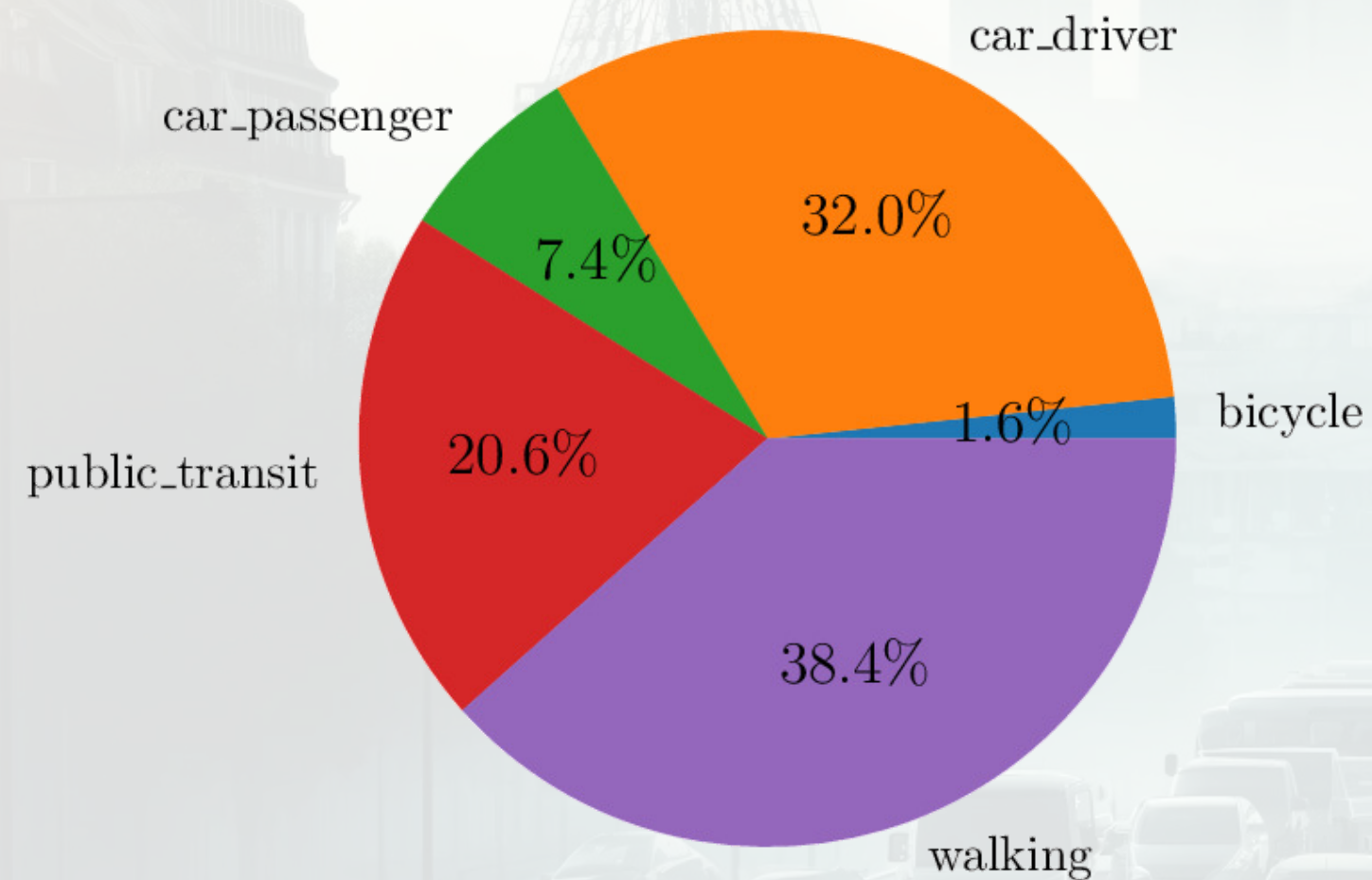


Learn from data

Méthodologie

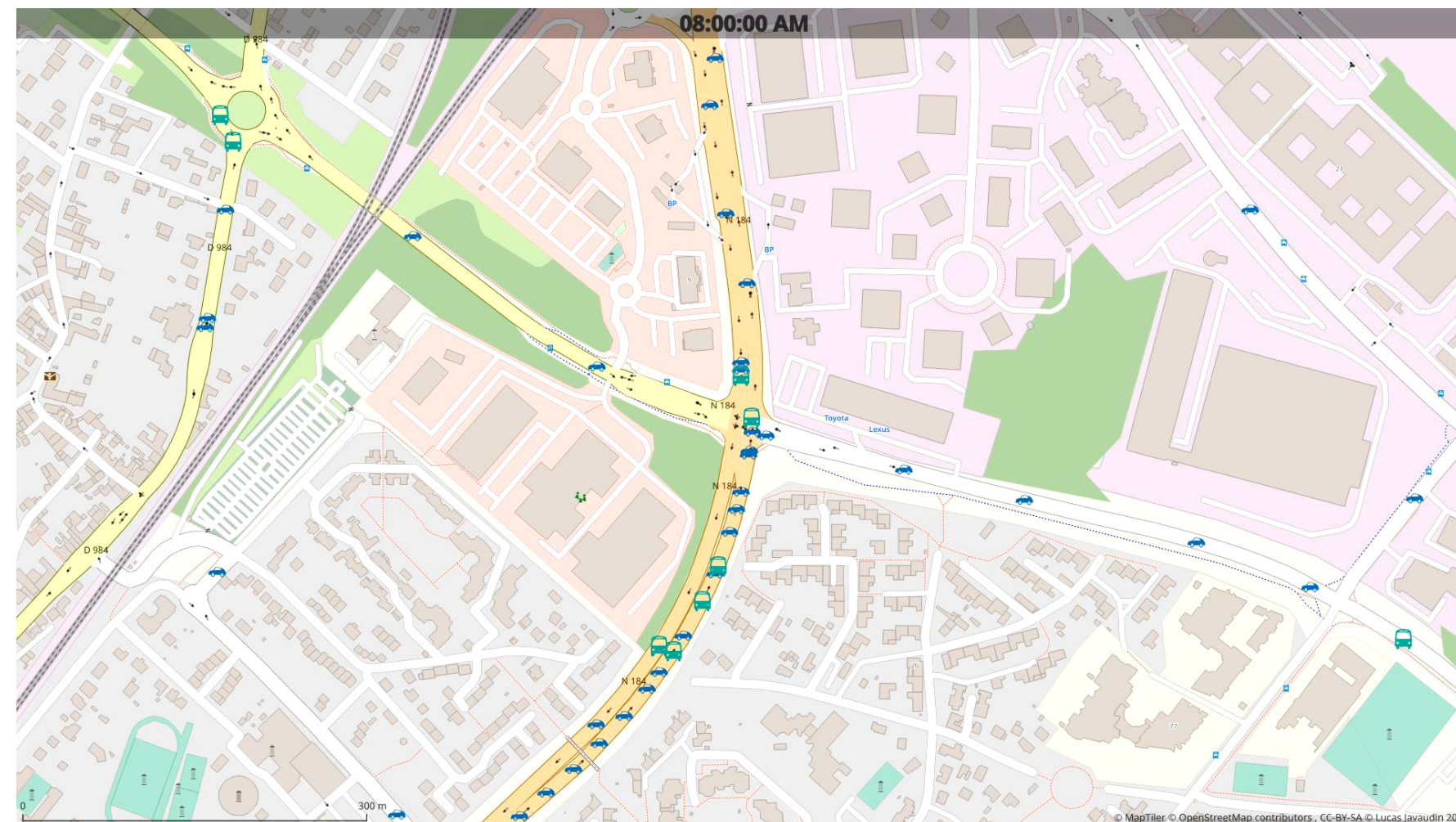
Introduction

- **Champs d'étude :**
 - Île-de-France
 - Déplacements d'une journée en semaine « moyenne »
 - Cinq modes : voiture (conducteur), voiture (passager), transports en commun, vélo et marche à pied
 - Tous motifs de déplacement



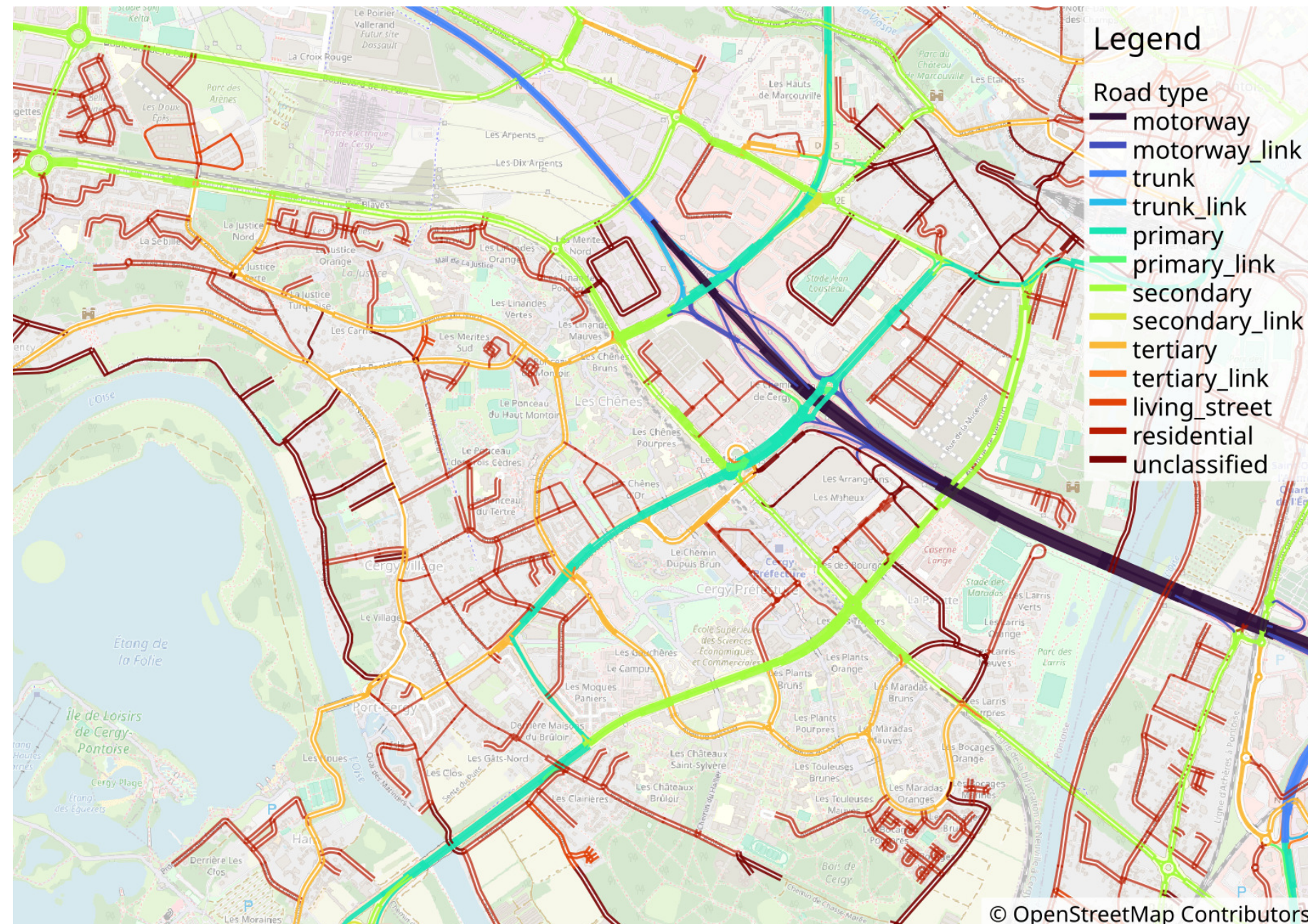
METROPOLIS2

- METROPOLIS2 est un **outil de simulations de transport basé agent, dynamique et mésoscopique**
- Simulation du choix de **mode, heure de départ et route** pour chaque agent
- Congestion simulée à partir de **goulots d'étranglement** avec remontée de queue
- Calcul des **émissions de polluants** et de l'**exposition des populations à la pollution** possible grâce au module METRO-TRACE



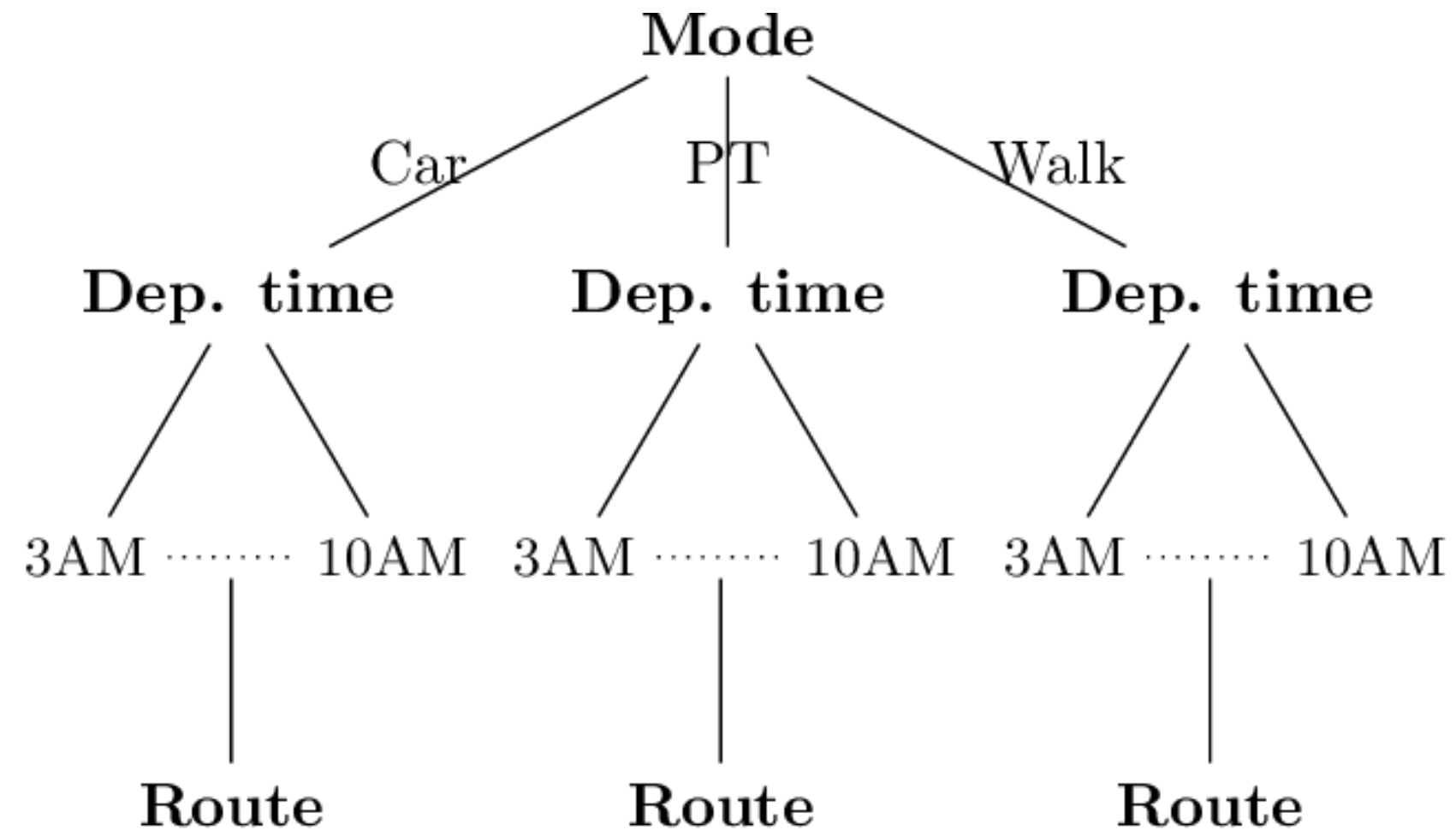
Données entrantes

- **Réseau routier** : OpenStreetMap [72 962 km de routes]
- **Horaires transports en commun** : GTFS [1850 lignes]
- **Déplacements** : population synthétique (Hörl et Balac, 2021) [2 451 841 personnes ; 8 774 929 déplacements]



Modèles de choix

- Choix de **mode** : modèle Logit multinomial
- Choix de l'**heure de départ** : modèle Logit continu
- Choix de **route** : itinéraire le plus rapide
- Calculs de **surplus** à partir de la formule log-somme

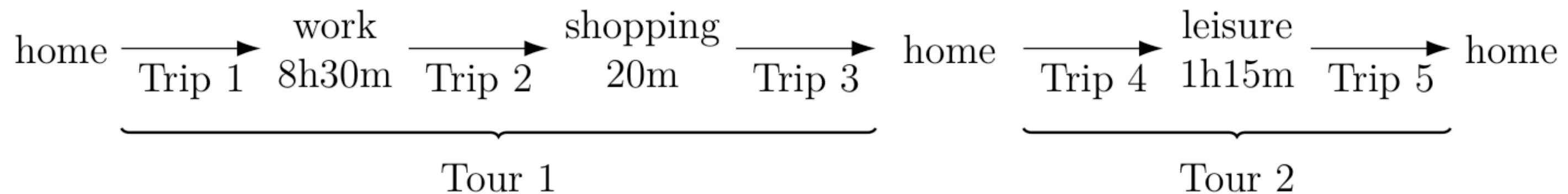


Fonction d'utilité

Utilité du déplacement k avec le mode j :

$$V_{k|j}(t^d, t^a) = c_j - m_{k|j} \underbrace{-\alpha_j \cdot [t^a - t^d]}_{\text{travel utility}} \underbrace{-\beta_k [t_k^* - t^a]_+ - \gamma_k [t^a - t_k^*]_+}_{\text{schedule-delay utility}}$$

- t^d : heure de départ ; t^a : heure d'arrivée
- c_j : constante modale ; $m_{k|j}$: coûts monétaires (essence)
- α_j : valeur du temps
- β_k : pénalité d'arriver en avance ; γ_k : pénalité d'arriver en retard ; t_k^* heure désirée d'arrivée



Hypothèses supplémentaires

- Mode **voiture (conducteur)** accessible aux possesseurs d'une voiture et du permis
- Mode **voiture (passager)** accessible aux possesseurs d'une voiture
- Temps de trajet **transports en commun** calculé avec OpenTripPlanner et les données GTFS
- Vitesse **vélo** : 10 km/h
- Vitesse **marche à pied** : 4 km/h
- 600 k déplacements **camions** sont simulés

Mode	Disponibilité (réf.)	Disponibilité (ZFE)	Contrainte
Voiture (conducteur)	53 %	49 %	Voiture autorisée + permis
Voiture (passager)	74 %	68 %	Voiture autorisée
Transports en commun	54 %	54 %	Itinéraire faisable
Vélo	100 %	100 %	
Marche à pied	100 %	100 %	

Calibration

Étape	Paramètres calibrés	Valeurs cibles	Source	Méthodologie
1	Pénalités et vitesses à vide au niveau arc	Temps de trajet à vide	TomTom API	Régression LASSO
2	Capacités des routes	Temps de trajet avec congestion	TomTom API	Régression OLS
3	Pénalités d'avance / de retard, par motif	Distribution des heures de départ, par cluster	Enquête transport	Optimisation bayésienne avec processus gaussiens
4	Constante et valeur du temps par mode et genre x CSP	Parts modales, par cluster	Enquête transport	Régression <i>Random Forest</i>

Évaluation de la politique

- **Deux simulations METROPOLIS2 :**
 - Simulation de **référence** (calibrée) : pas de ZFE
 - Simulation **ZFE** (contrefactuelle) : version janvier 2025 (jusqu'à Crit'Air 3)
 - La comparaison des deux simulations représente l'impact de la ZFE 2025 par rapport à une situation sans ZFE
- **Limites :**
 - Analyse court terme : pas d'achat de véhicules, pas de relocalisation des activités ou du domicile
 - Restrictions temporelles de la ZFE non prises en compte
 - Exceptions et infractions non prises en compte



Low Carbon



Low Carbon



Low Carbon



Low Carbon



Low Carbon



Low Carbon

Résultats

Résultats agrégés

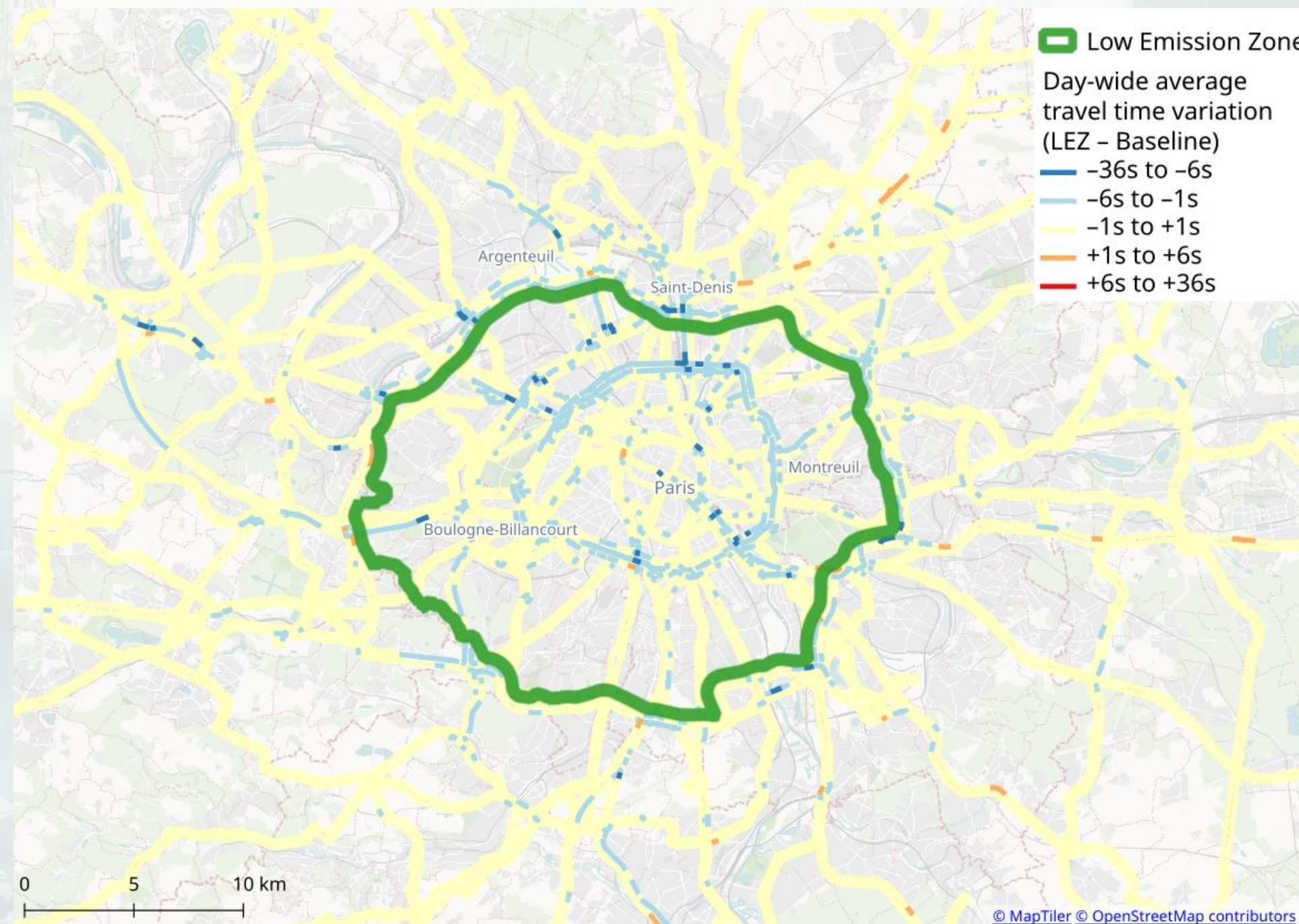
	Référence	ZFE	Variation
Surplus moyen des déplacements	-28.96 €	-29.03 €	-0.07 €
Temps de trajet moyen	01:12:05	01:12:55	+50s
Véhicules-kilomètres	123.30 M km	119.72 M km	-2.9 %

Transferts modaux

Référence / ZFE	Voiture (conducteur)	Voiture (passager)	Transports en commun	Vélo	Marche à pied	Total
Voiture (conducteur)	28.6%	.	1.4%	0.2%	0.3%	30.5%
Voiture (passager)	.	5.3%	0.2%	.	.	5.5%
Transports en commun	0.4%	0.1%	18.4%	.	.	18.9%
Vélo	.	.	.	1.1%	.	1.1%
Marche à pied	.	.	.	.	43.9%	43.9%
Total	29.1%	5.4%	19.9%	1.4%	44.2%	100%

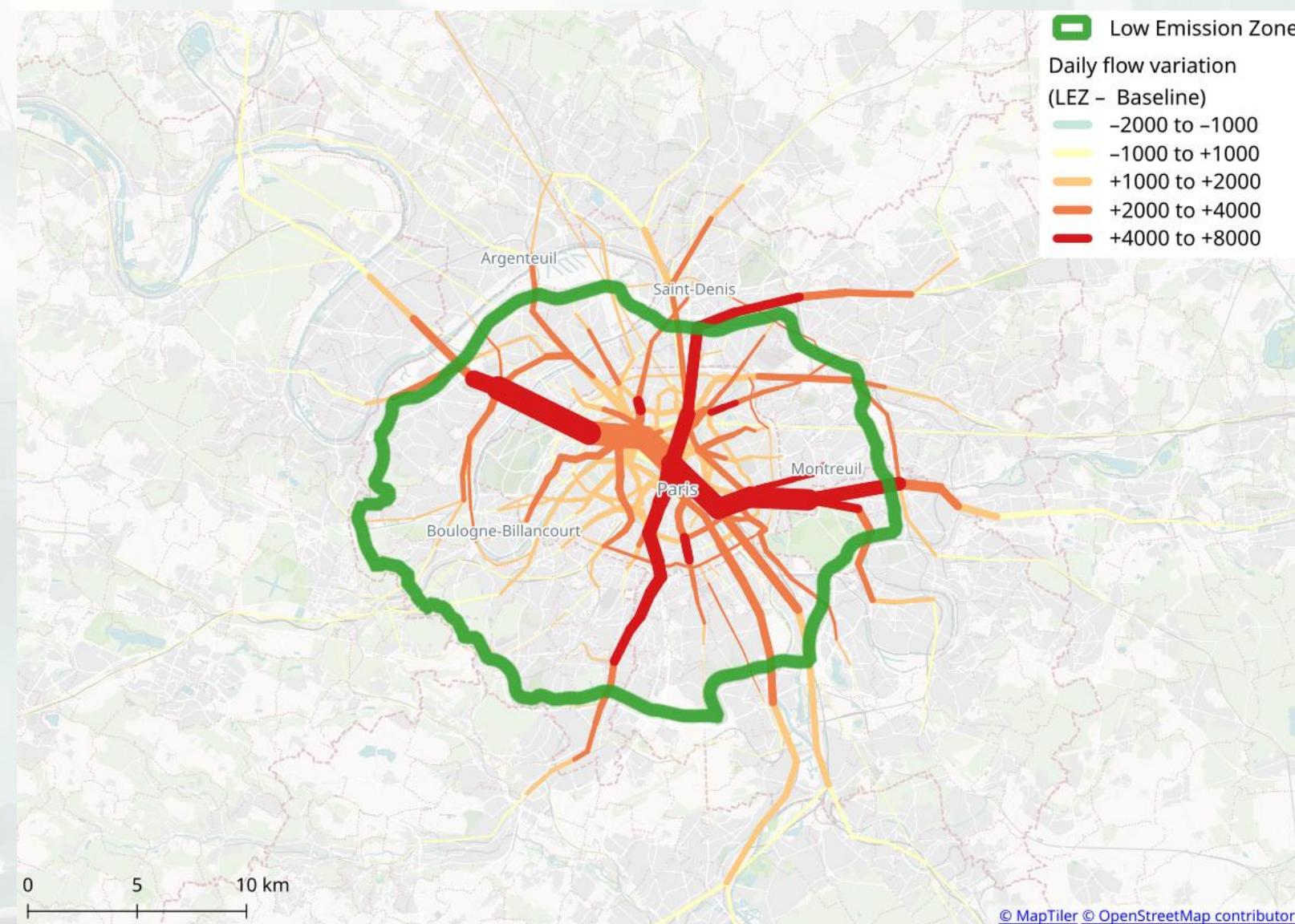
Impact sur la congestion

- Baisse de la congestion dans la zone sur les axes principaux (Boulevard Périphérique et A1 notamment)
- Peu d'effet hors de la zone



Impact sur les flux dans les transports en commun

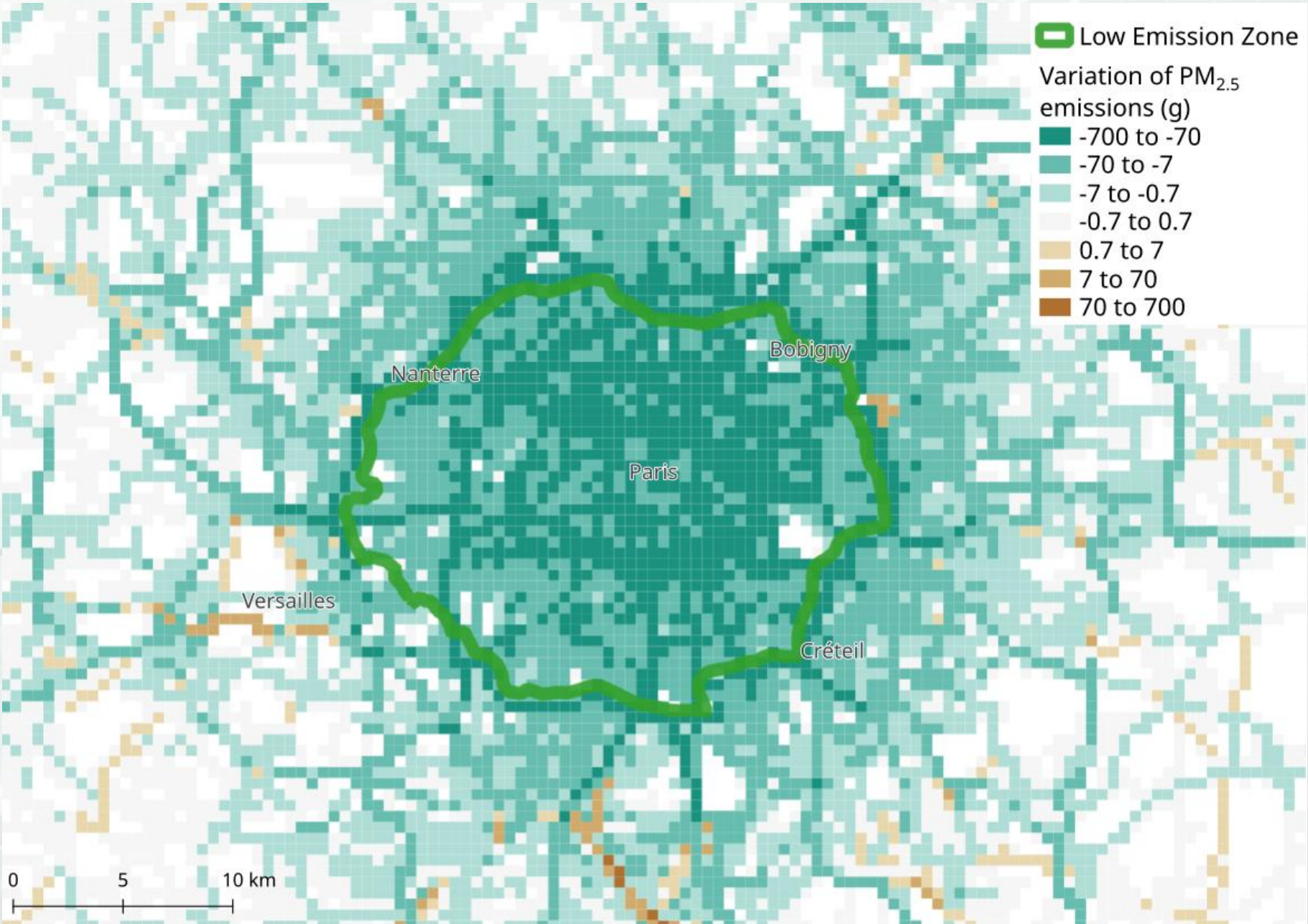
- Hausse des flux sur la plupart des tronçons, principalement en petite couronne (nord, est, sud)
- RER A : +1.2% passagers-kilomètres
- RER B : +2.1% passagers-kilomètres
- Tramway T7 : +24.4% passagers-kilomètres



Émissions de polluants

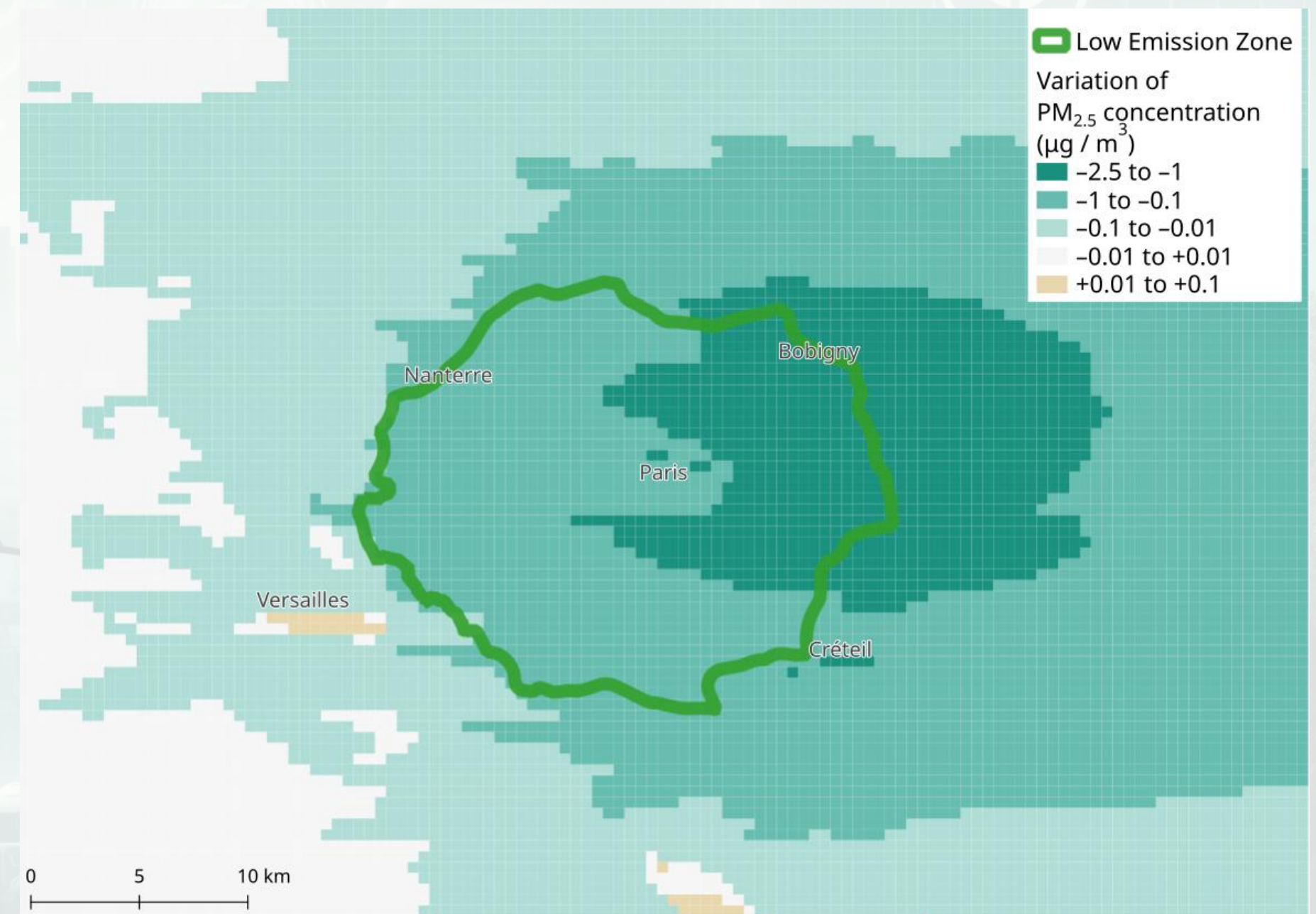
- Les émissions de **PM_{2.5}** et **NO_x** générées par le trafic routier sont calculés à partir du modèle EMISENS
- Les émissions sont une fonction de la **motorisation** et de l'**âge** des véhicules ainsi que de leur **vitesse** (au niveau arc)
- Les émissions diminuent plus fortement au sein de la ZFE

	Référence	ZFE	Variation
Émissions PM _{2.5}	2.83 tons	2.66 tons	-6.0 %
Émissions NO _x	33.32 tons	30.45 tons	-8.6 %
Émissions CO ₂	21 730 tons	20 829 tons	-4.1 %



Diffusion des polluants

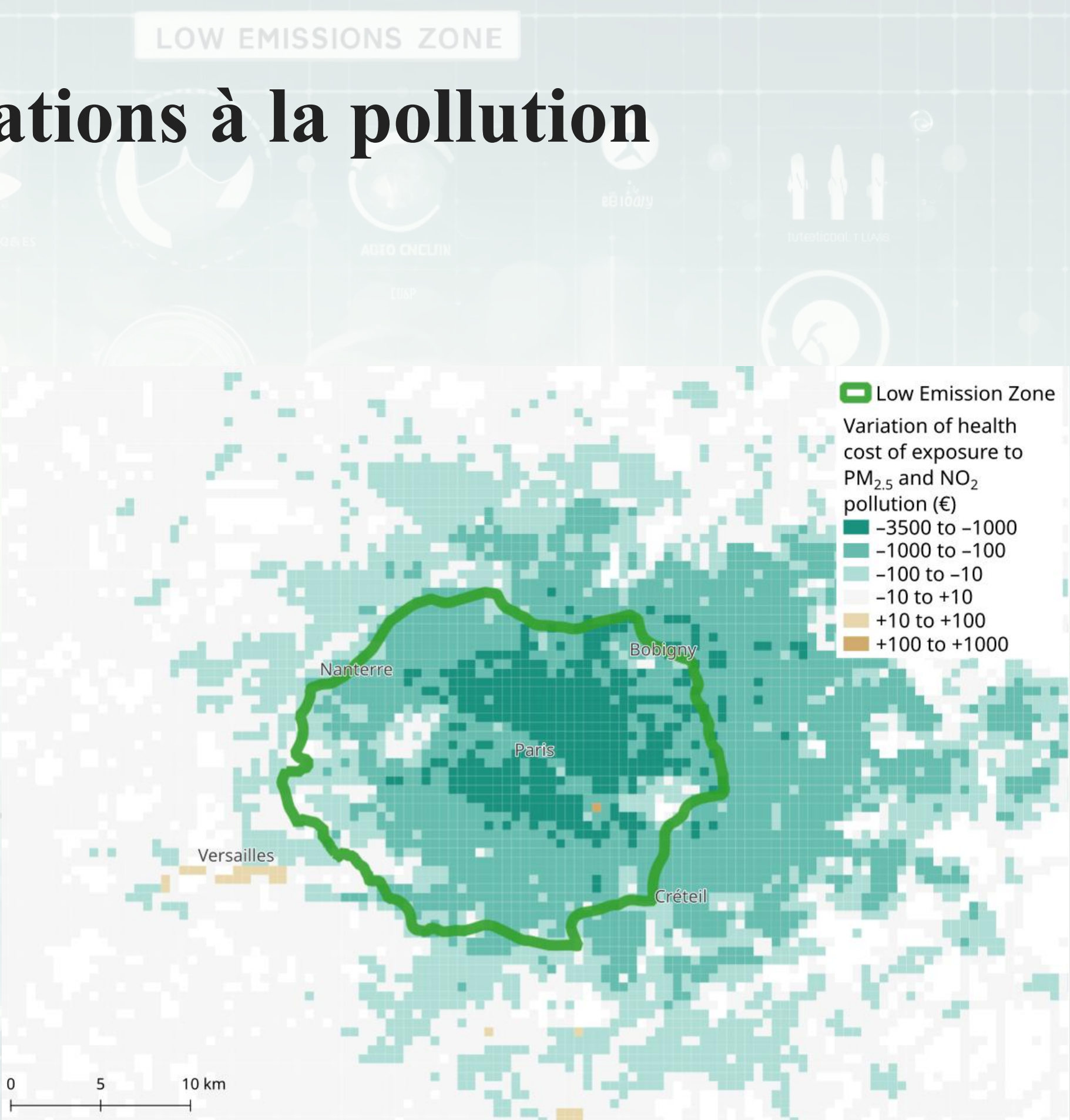
- Les émissions de $\text{PM}_{2.5}$ et NO_x sont **dispersées** dans l'atmosphère par un **modèle gaussien Plume**
- La dispersion dépend d'un **vent** moyen (vers l'est, 10 km/h)
- La concentration en polluants diminue plus fortement dans la ZFE et à l'est



Exposition des populations à la pollution

- L'impact sur la santé est fonction de la **hausse de la mortalité induite par l'exposition aux polluants**, selon le niveau de concentration
- L'exposition est calculé selon la **position des individus dans le temps et dans l'espace**
- L'exposition diminue plus fortement vers Paris (forte concentration et forte densité de population)

	Référence	ZFE	Variation
Décès prématurés PM _{2.5}	5.9	5.3	-9.4 %
Décès prématurés NO _x	5.4	4.9	-10.1 %
Surplus sur la santé	-12.537 M €	-11.312 M €	-9.8 %



Prise en compte de l'impact sur la santé : résumé

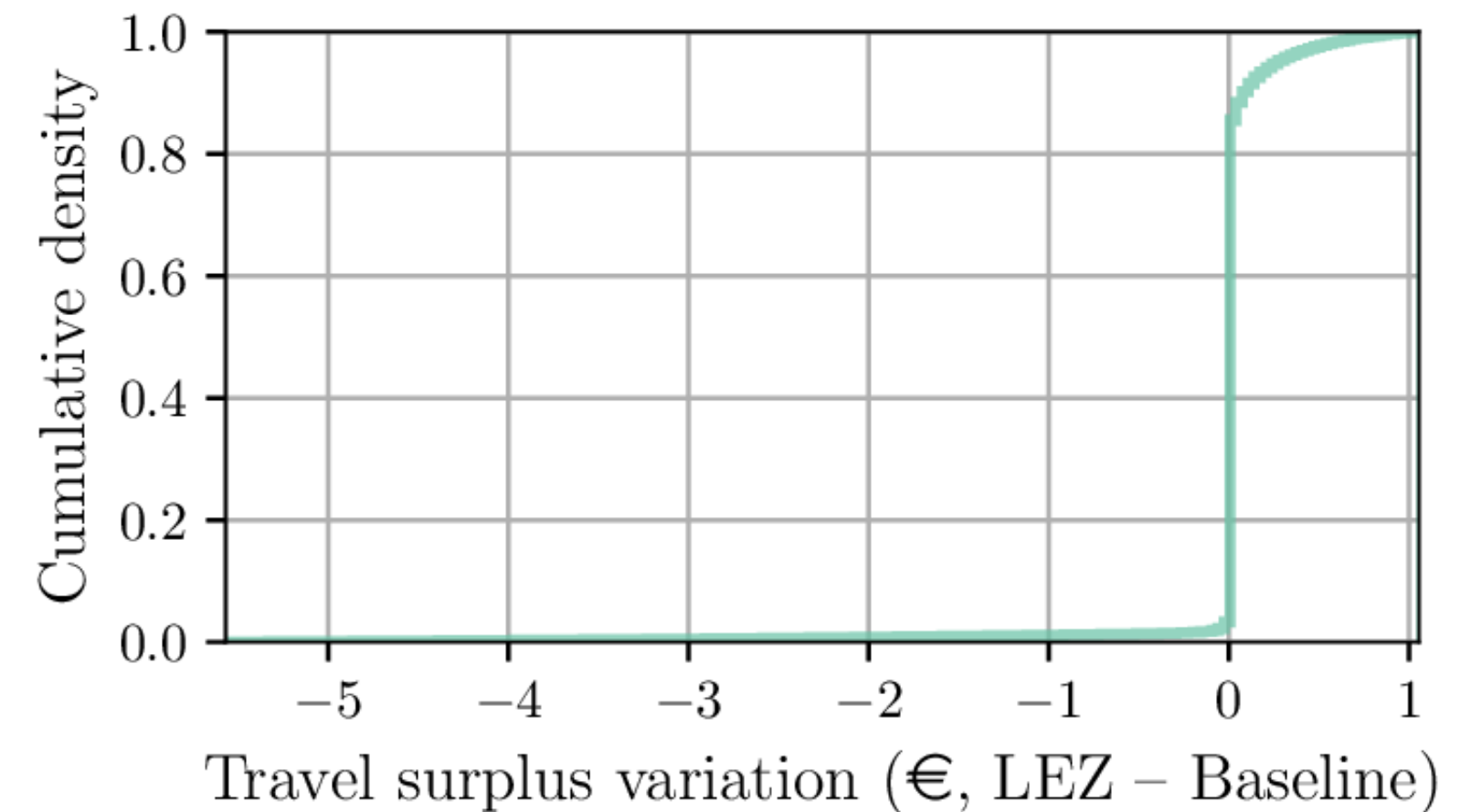
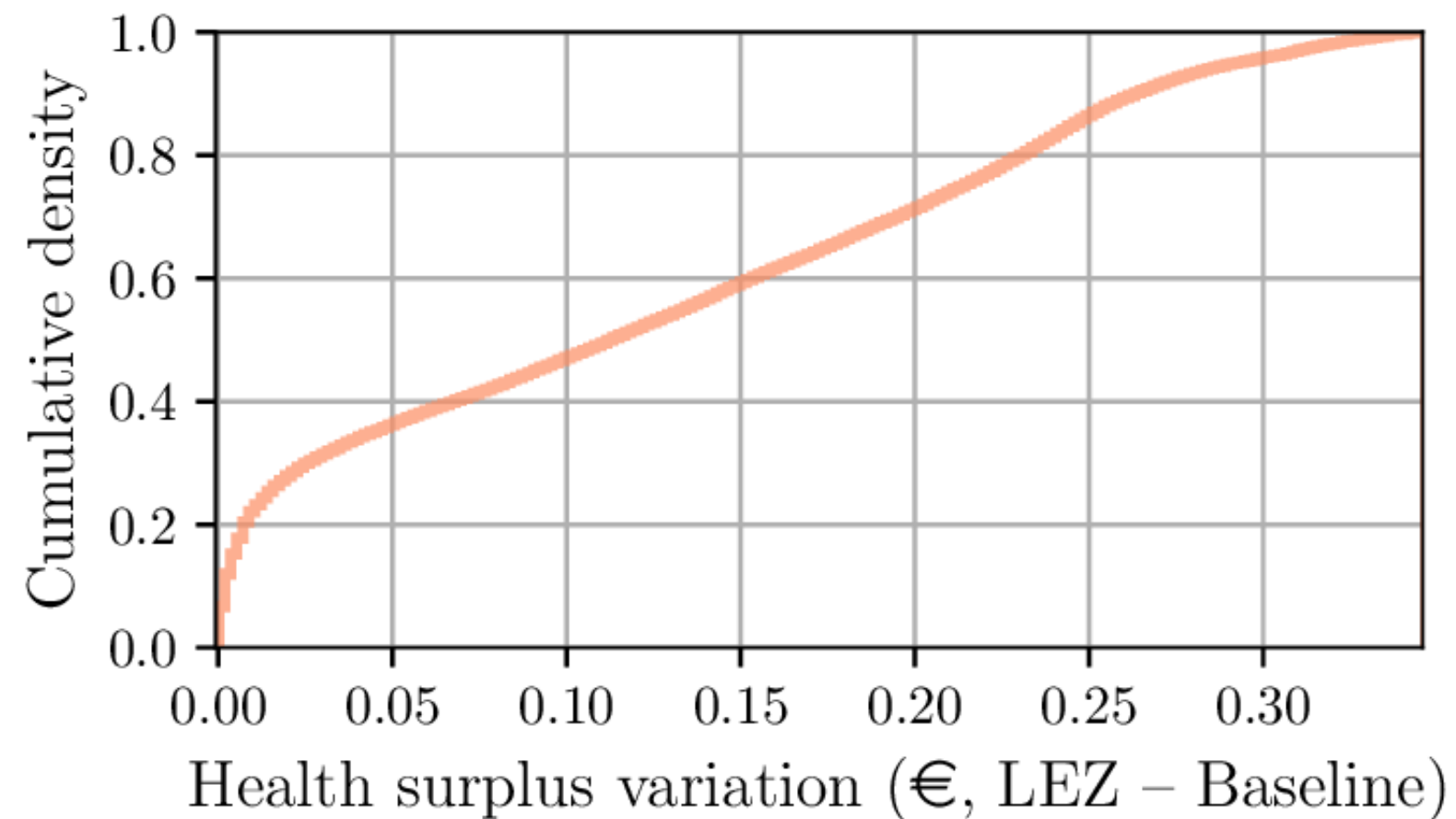
	Variation
Véhicules-kilomètres	-2.9 %
Émissions de PM _{2.5}	-6.0 %
Décès prématurés PM _{2.5}	-9.4 %

L'analyse en véhicules-kilomètres n'est pas suffisante :

- La baisse des véhicules-kilomètres est plus importante pour les véhicules les plus polluants
- La pollution est plus fortement réduite dans la ZFE, où la densité de population est plus forte

Impacts hétérogènes

- **Impact sur la santé** : entre 0 et +30 centimes par jour par personne
- **Impact sur les déplacements** :
 - 72 % de la population n'est pas affectée (moins de 1 centime de variation)
 - 3.5 % de la population « gagne » plus de 1 € par jour
 - 3.3 % de la population « perd » plus de 1 € par jour

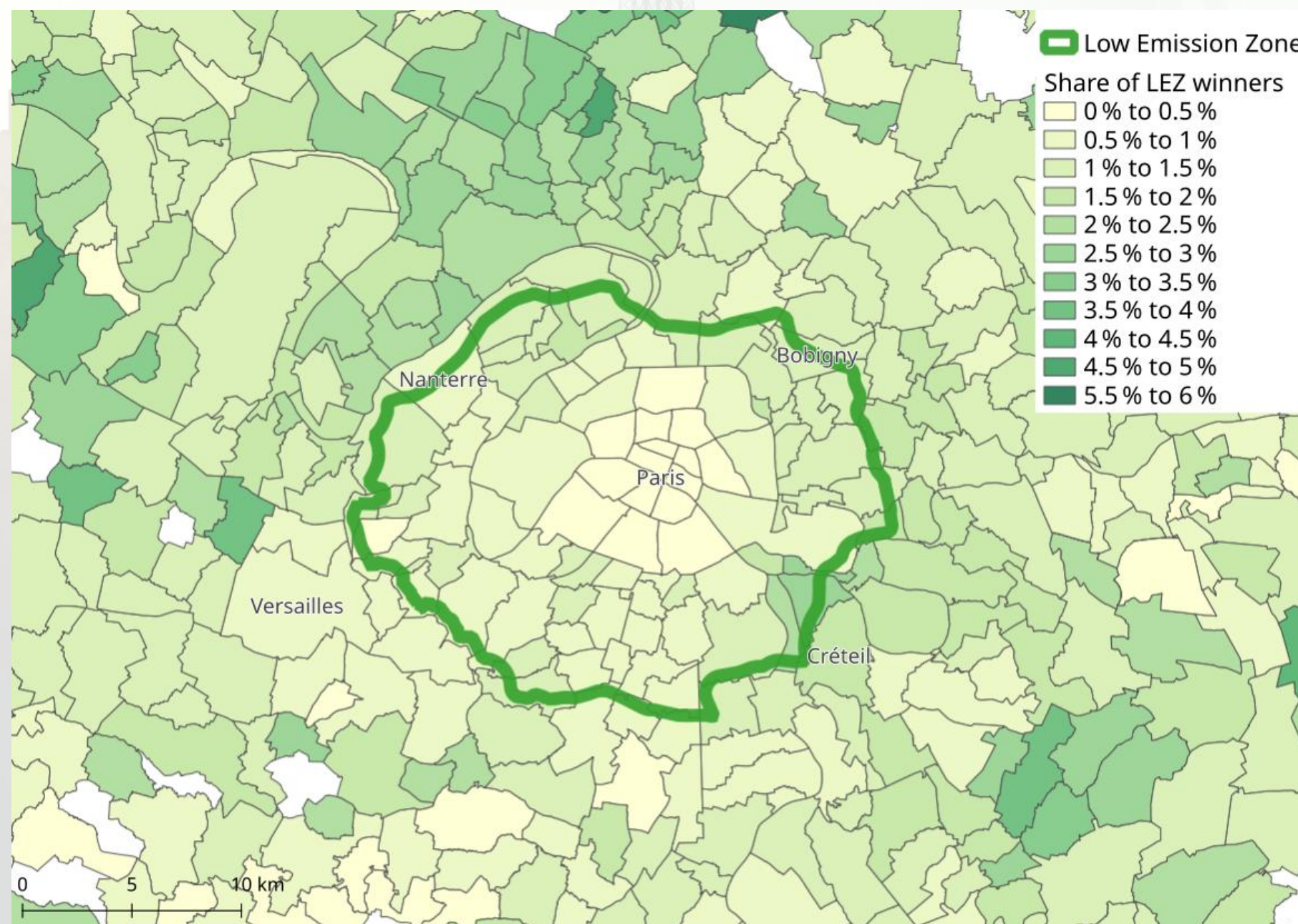


Caractérisation des gagnants et perdants

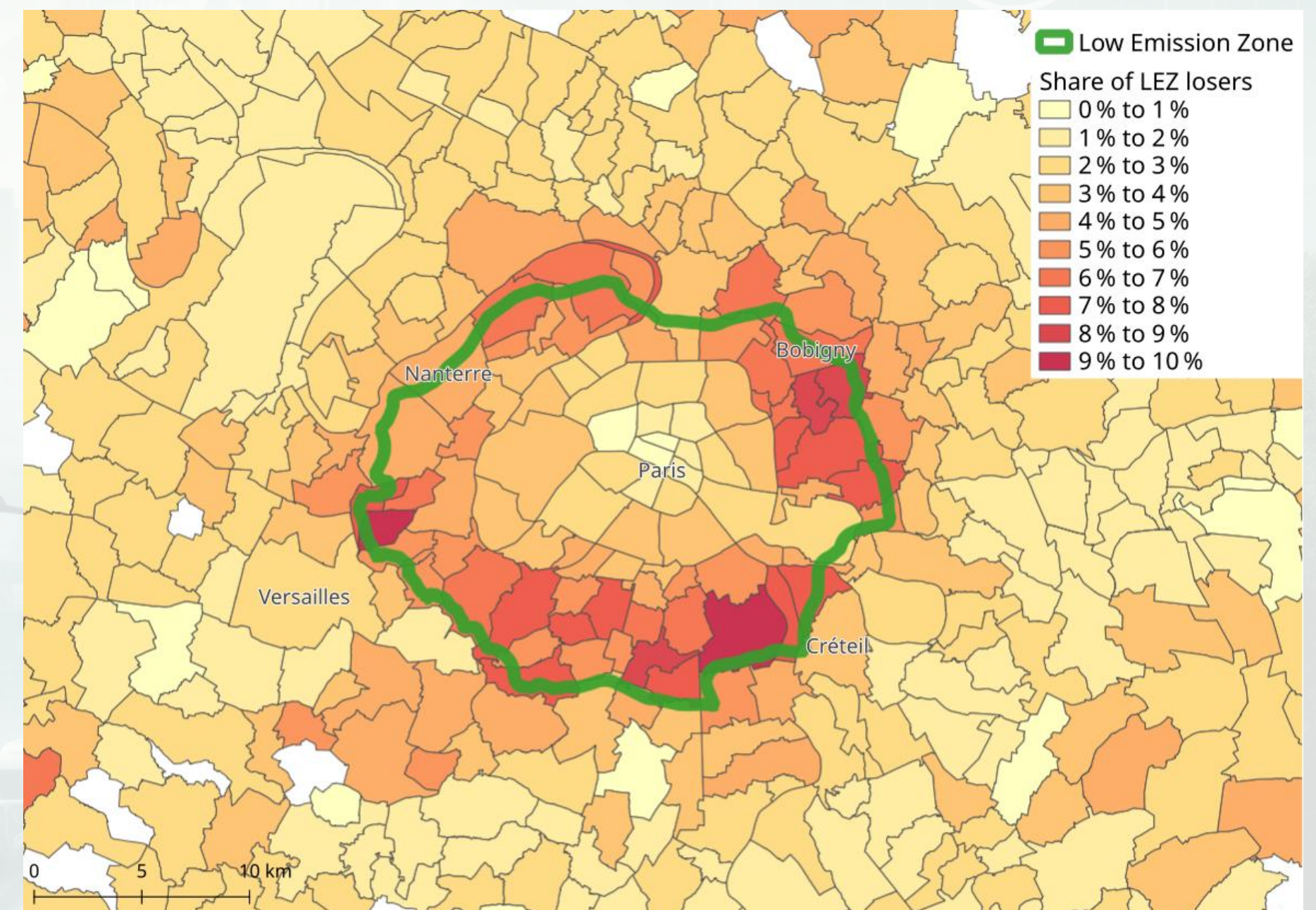
	Gagnants	Perdants	Autres
Critère	$\Delta\text{surplus} \geq 1 \text{ € / jour}$	$\Delta\text{surplus} \leq -1 \text{ € / jour}$	$ \Delta\text{surplus} < 1 \text{ € / jour}$
Variation moyenne du surplus	+2.0 €	-7.2 €	+0.0 €
Possession de véhicule autorisé	97 %	4 %	53 %
Possession de véhicule non autorisé	3 %	96 %	19 %
Longueur des déplacements	45 km	32 km	15 km
Accès aux transports en commun	51 %	64 %	85 %
Part modal voiture (réf.)	79 %	79 %	33 %
Part modal voiture (ZFE)	83 %	1 %	33 %

Localisation des gagnants et perdants

- Les « gagnants » sont dispersés dans la région
- Les « perdants » sont principalement le long de la ZFE



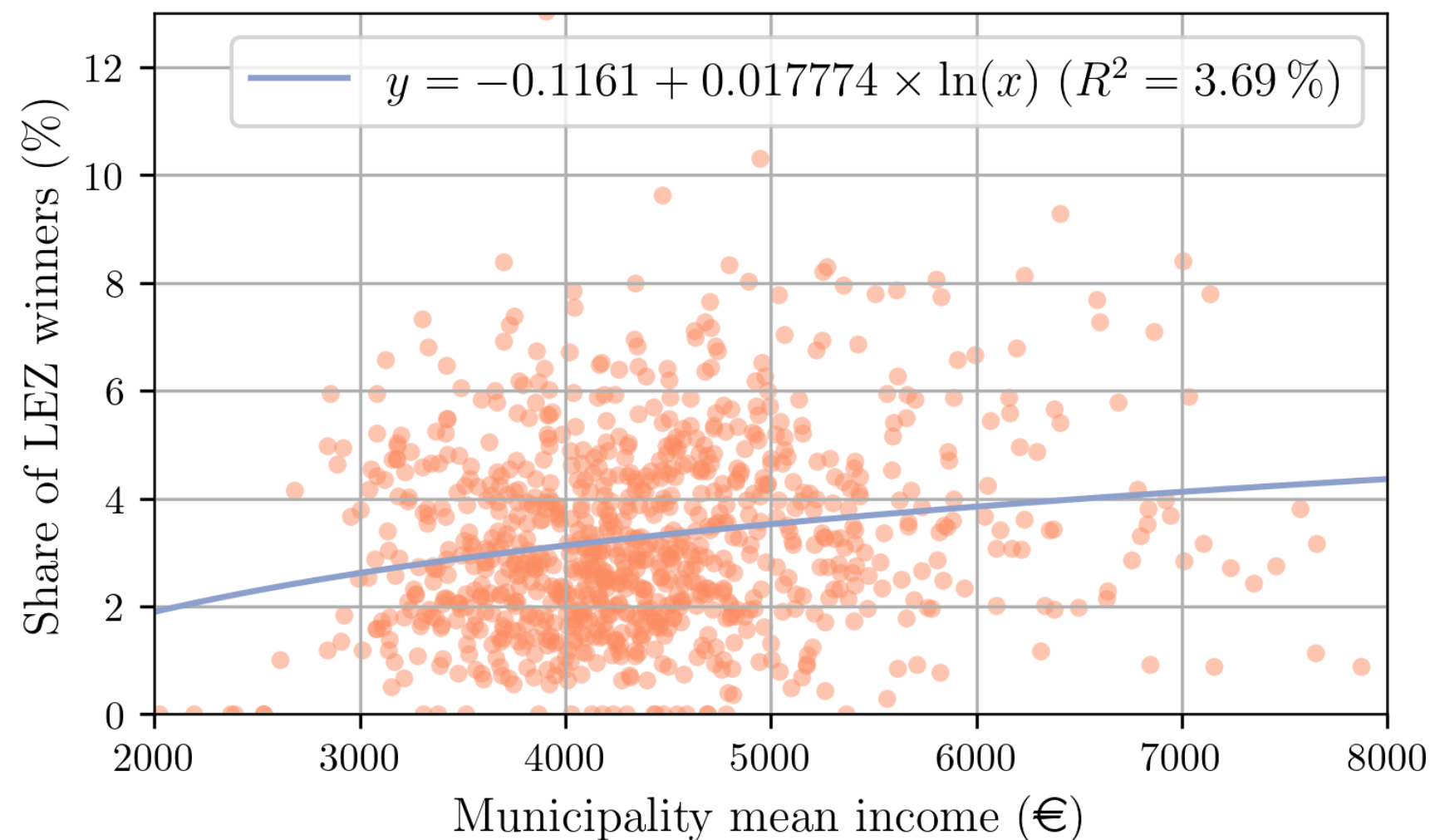
Gagnants



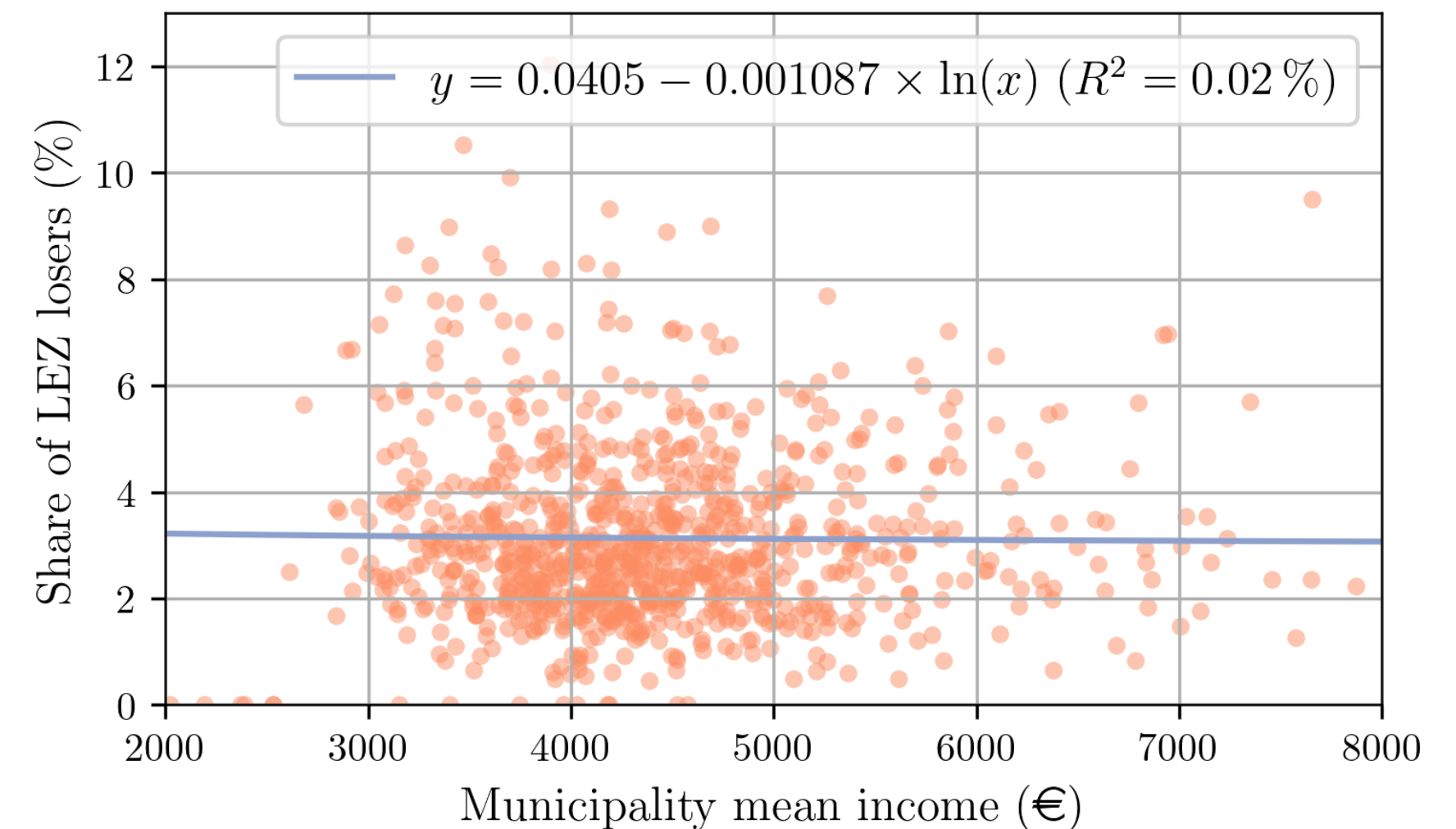
Perdants

Revenus des gagnants et perdants

- Part de « gagnants » légèrement croissante avec le revenu, au niveau municipalité
- Part de « perdants » non corrélé avec le revenu, au niveau municipalité



Gagnants



Perdants

LOW EMISSIONS ZONE



Low Emissions Zone



Low Emissions Zone



Low Emissions Zone



Low Emissions Zone



Low Emissions Zone



Low Emissions Zone

Conclusion

Conclusion

- Méthodologie pour évaluer des politiques publiques à partir d'un simulateur de transport
- Effets globaux : baisse de l'usage de la voiture, des véhicules-kilomètres, de la congestion et de la pollution
- Effets au niveau individuel :
 - Impact sur la santé réparti assez équitablement
 - Fortes inégalités en terme d'impact sur les déplacements
- Caractérisation des gagnants et perdants de la politique
- Limites :
 - Pas d'analyse de l'effet du revenu au niveau individuel
 - Analyse court terme : pas de modèle de choix de véhicule, de choix d'activité, de choix de localisation

LOW EMISSIONS ZONE



Low Emissions



Low Carbon



Low Carbon



Low Carbon



Low Carbon



Low Carbon

Thank you