

LOW EMISSIONS ZONE

L'intérêt des simulations multi-agents : l'exemple de METROPOLIS2 et la ZFE de Paris

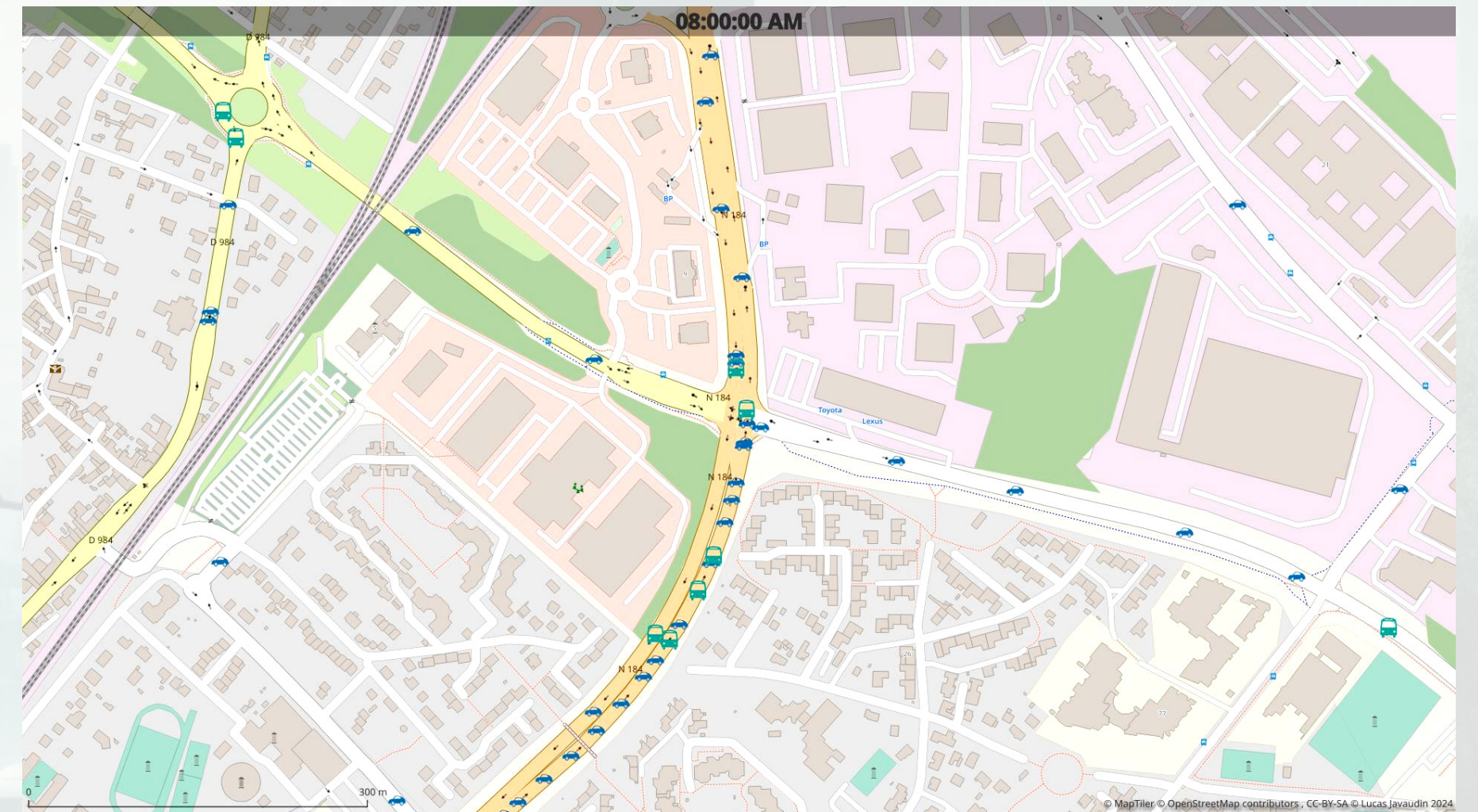
Lucas Javaudin

LVMT, Institut Polytechnique de Paris

Club Mobilités FNAU – 5 juin 2026

Simulateurs de transport multi-agents

- 1 individus = **1 agent** → entité autonome avec ses propres préférences / décisions
- **Population synthétique** avec **chaînes d'activités**
- Choix de **mode**, d'**heure de départ**, de **route**
- Congestion **dynamique mesoscopique** (bottleneck)
- Exemples : MATSim, SimMobility, METROPOLIS2



Données entrantes : Population synthétique

- **Population fictive** de ménages et personnes, générés pour être représentatifs d'une population (Hörl & Balac, 2021)
- **Combinaison de données** : recensement, EGT / EMC², SIRET, BDTOPO
- **Exemple de ménage** :
 - ID: 19
 - Nombre de voitures : 1
 - Nombre de vélos : 3
 - Revenu moyen : 11 865 €

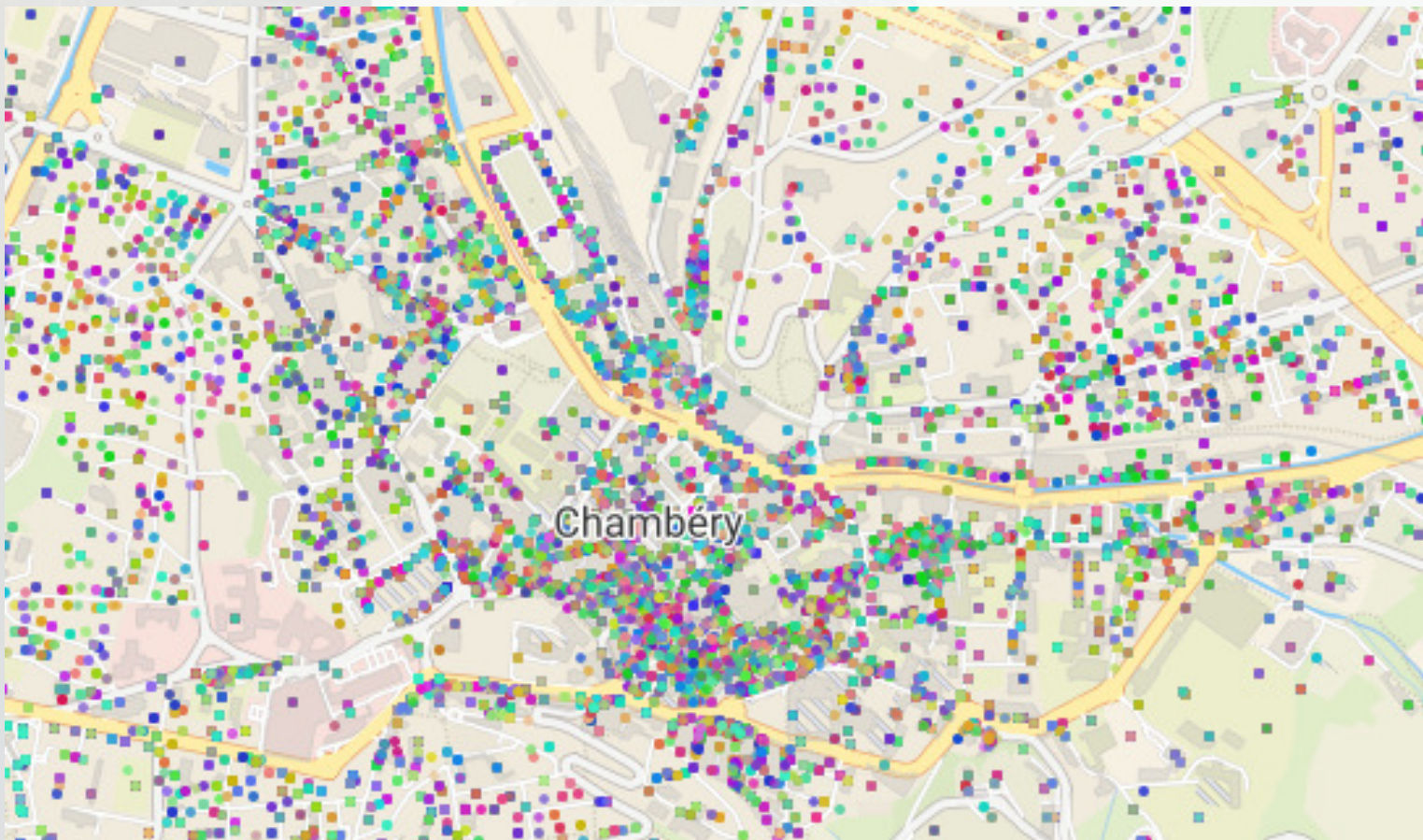
Données entrantes : Population synthétique

Personnes

ID	Âge	Genre	Classe professionnelle
34	51	Homme	Employé
35	48	Femme	Cadre
36	17	Homme	Étudiant
37	14	Femme	Étudiant

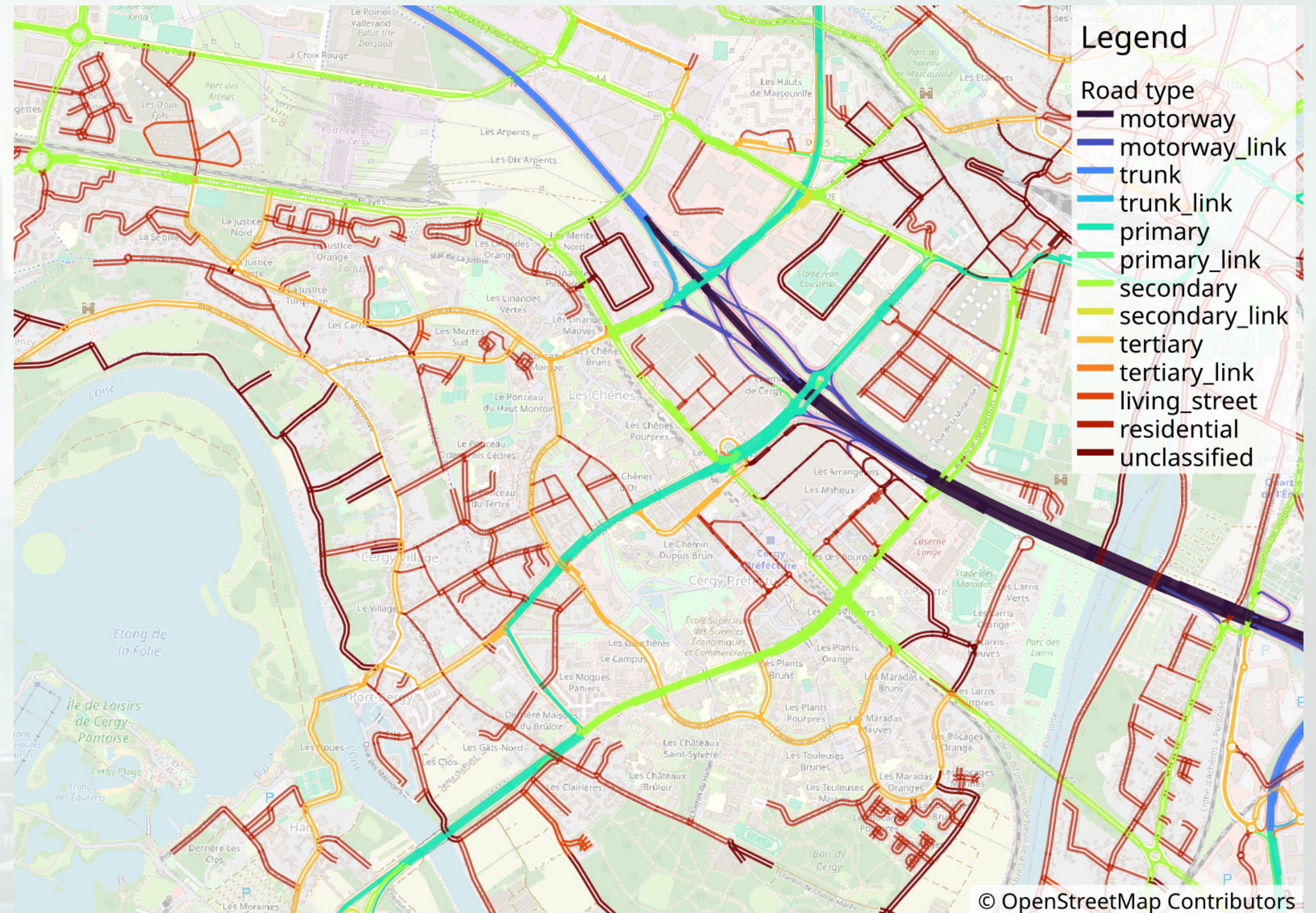
Déplacements

ID	Personne	Motif précédent	Motif suivant	Durée d'activité
133	34	Domicile	Travail	06:35:00
134	34	Travail	Domicile	
135	35	Domicile	Travail	08:03:00
136	35	Travail	Domicile	
137	36	Domicile	Éducation	06:55:00
138	36	Éducation	Domicile	
139	36	Domicile	Loisir	01:25:00
140	36	Loisir	Domicile	
141	37	Domicile	Éducation	07:10:00
142	37	Éducation	Domicile	



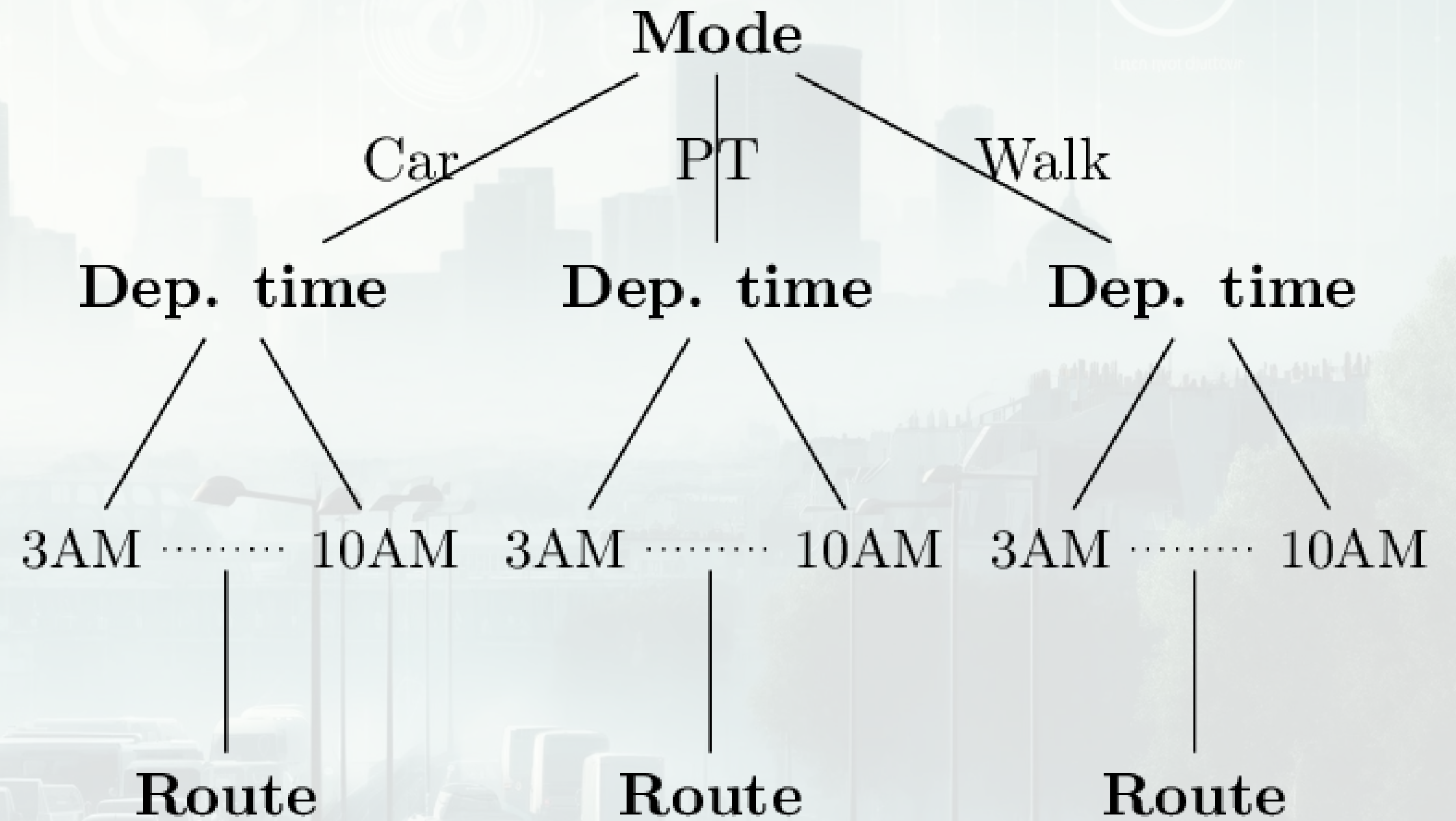
Données entrantes : OpenStreetMap & GTFS

- Le réseau routier est importé depuis **OpenStreetMap**
- Les horaires de transports en commun sont lus depuis des fichiers **GTFS**



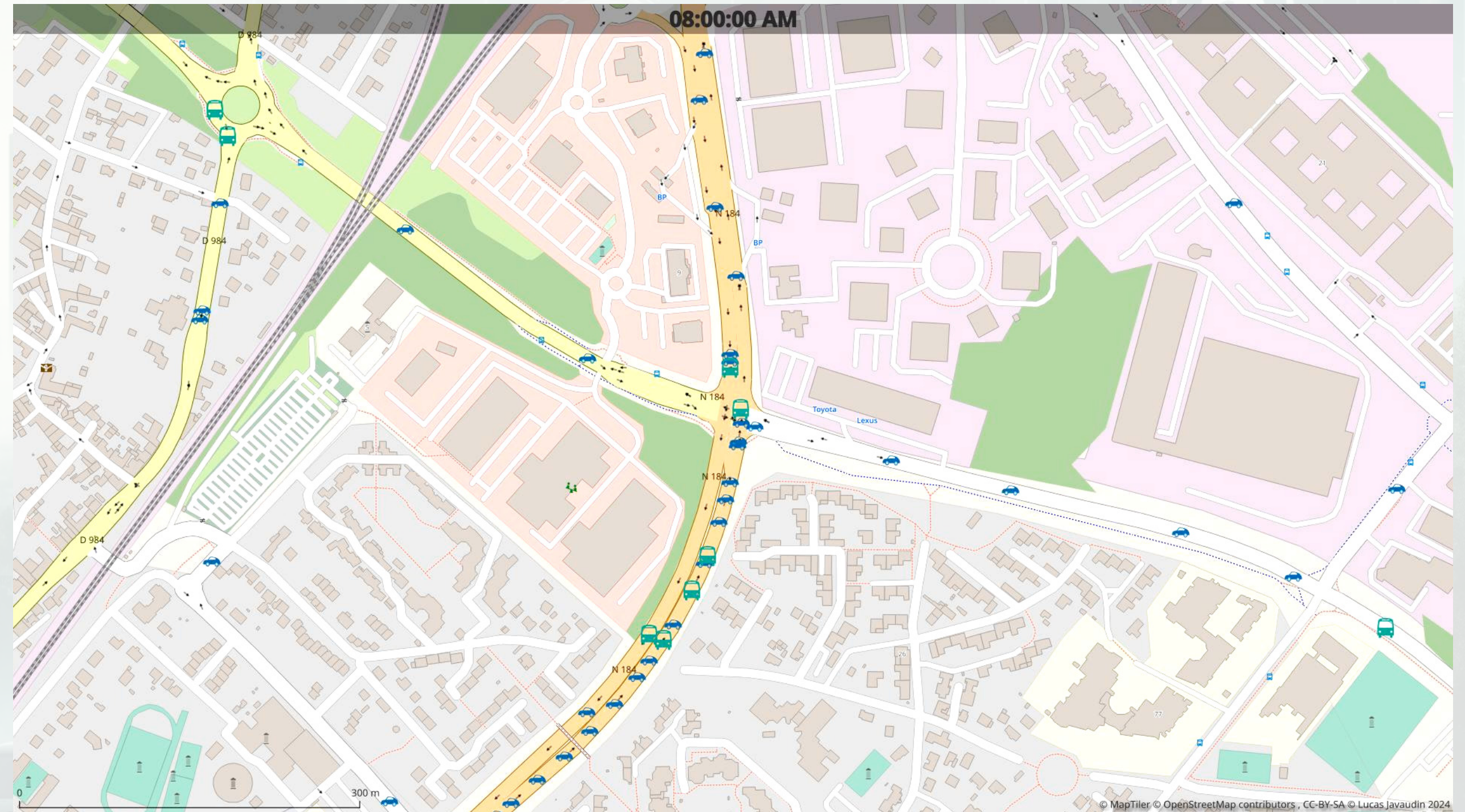
Processus de décision

- 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



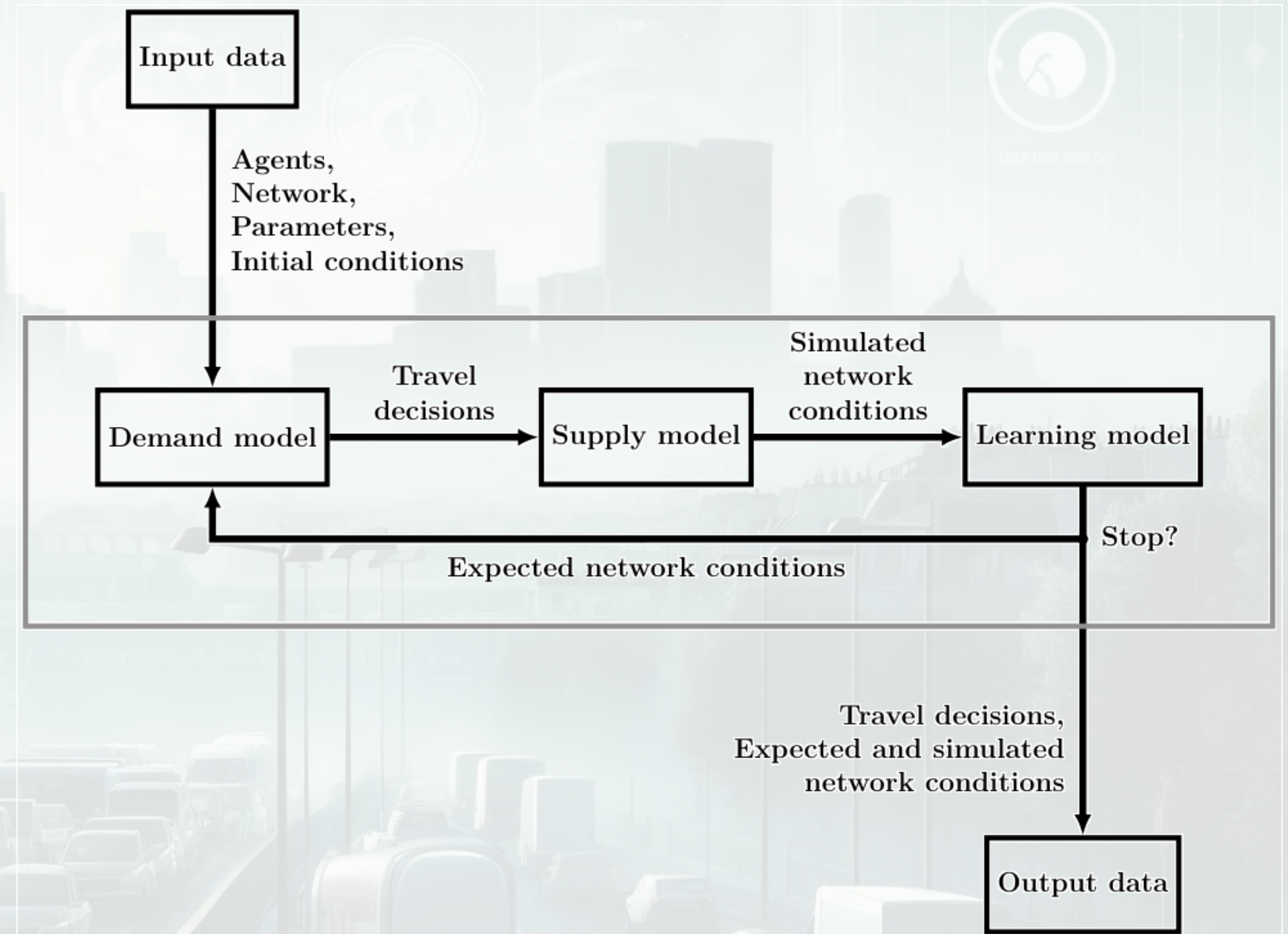
Modélisation de la congestion

- **Goulots d'étranglements (bottleneck)** : le flux de véhicules (dynamique) est limité par la capacité
- **Propagation des files (spillback)** : le flux de véhicules est limité par la capacité de stockage du tronçon



Processus de convergence

Un processus **itératif** est utilisé pour ajuster les décisions des agents jusqu'à ce que la congestion anticipée coïncide avec la congestion simulée



Calibration

Étape	Paramètres calibrés	Valeurs cibles	Données	Méthodologie
1	Vitesse et pénalité par tronçon	Temps de trajet à vide	TomTom API	Régression LASSO
2	Capacités des tronçons	Temps de trajet avec congestion	TomTom API	Régression OLS
3	Pénalités de des-horage	Distribution des heures de départ, par cluster	Enquête transport	Opt. bayésienne avec processus gaussiens
4	Valeurs du temps et constantes par mode	Parts modales, par cluster	Enquête transport	Régression <i>Random Forest</i>

Étude de cas : la ZFE du Grand Paris

LOW EMISSIONS ZONE



Low Emissions Zone



Tree and Leaf



Leaf and Leaf



Leaf and Leaf



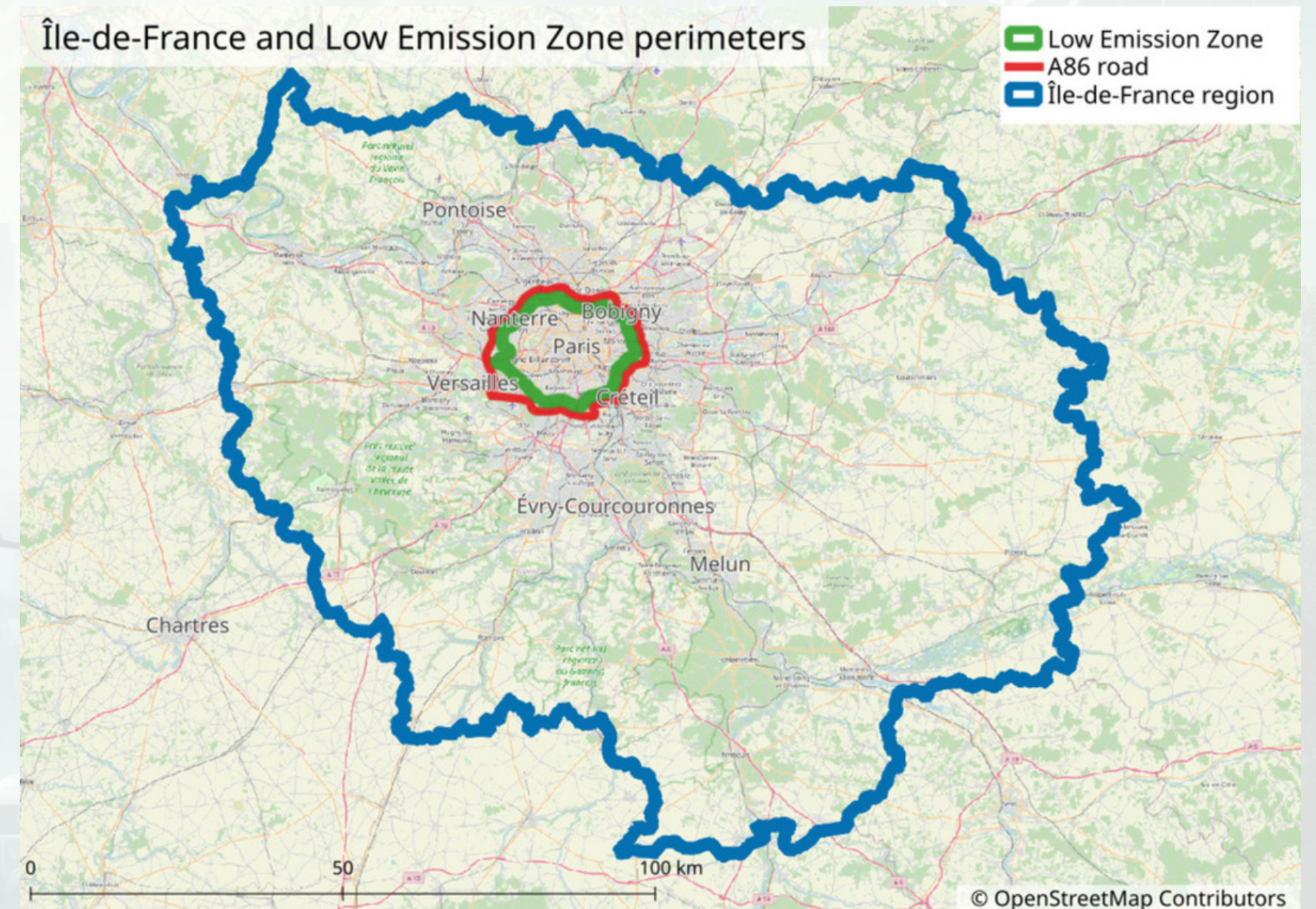
Leaf and Leaf



Leaf and Leaf

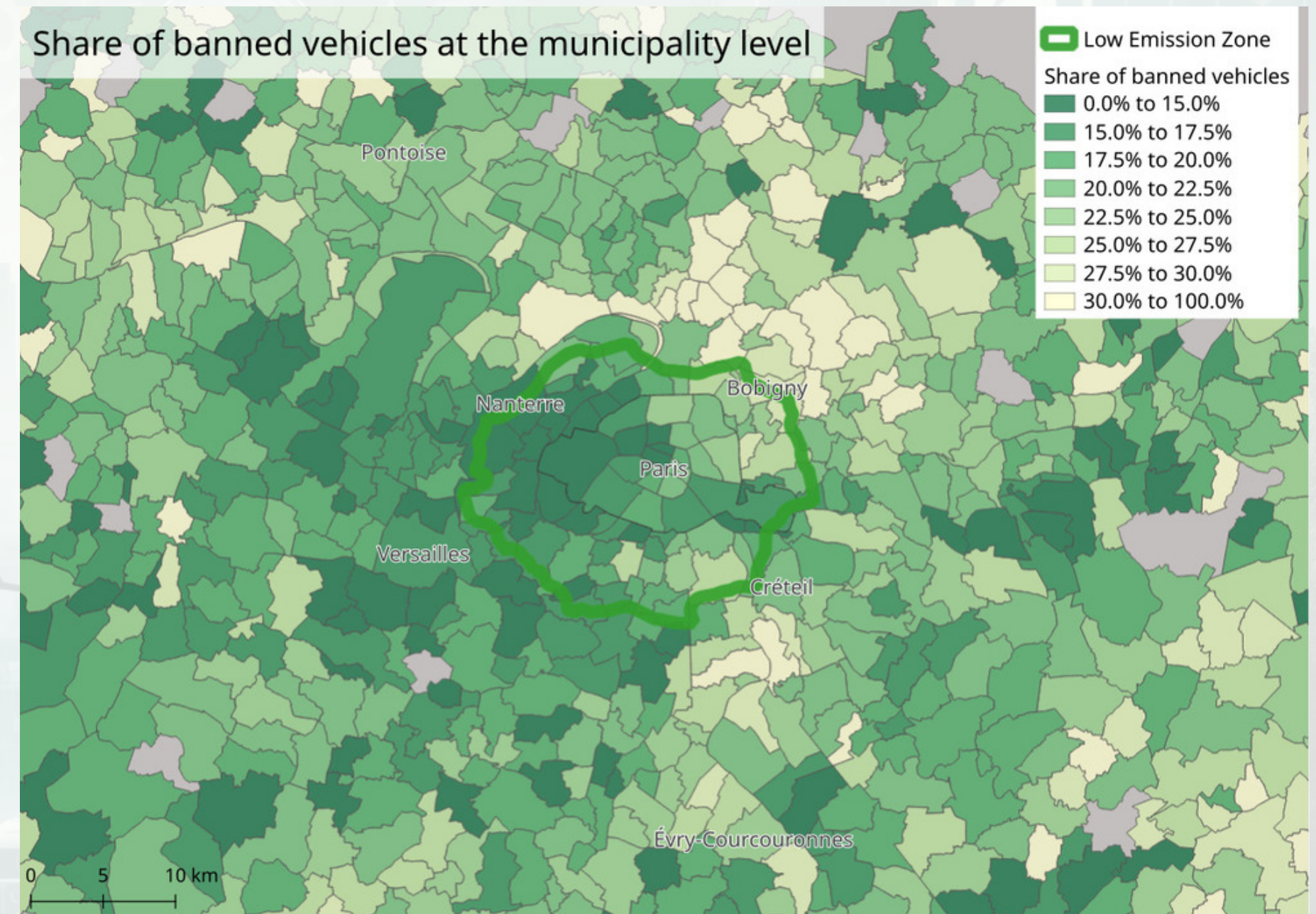
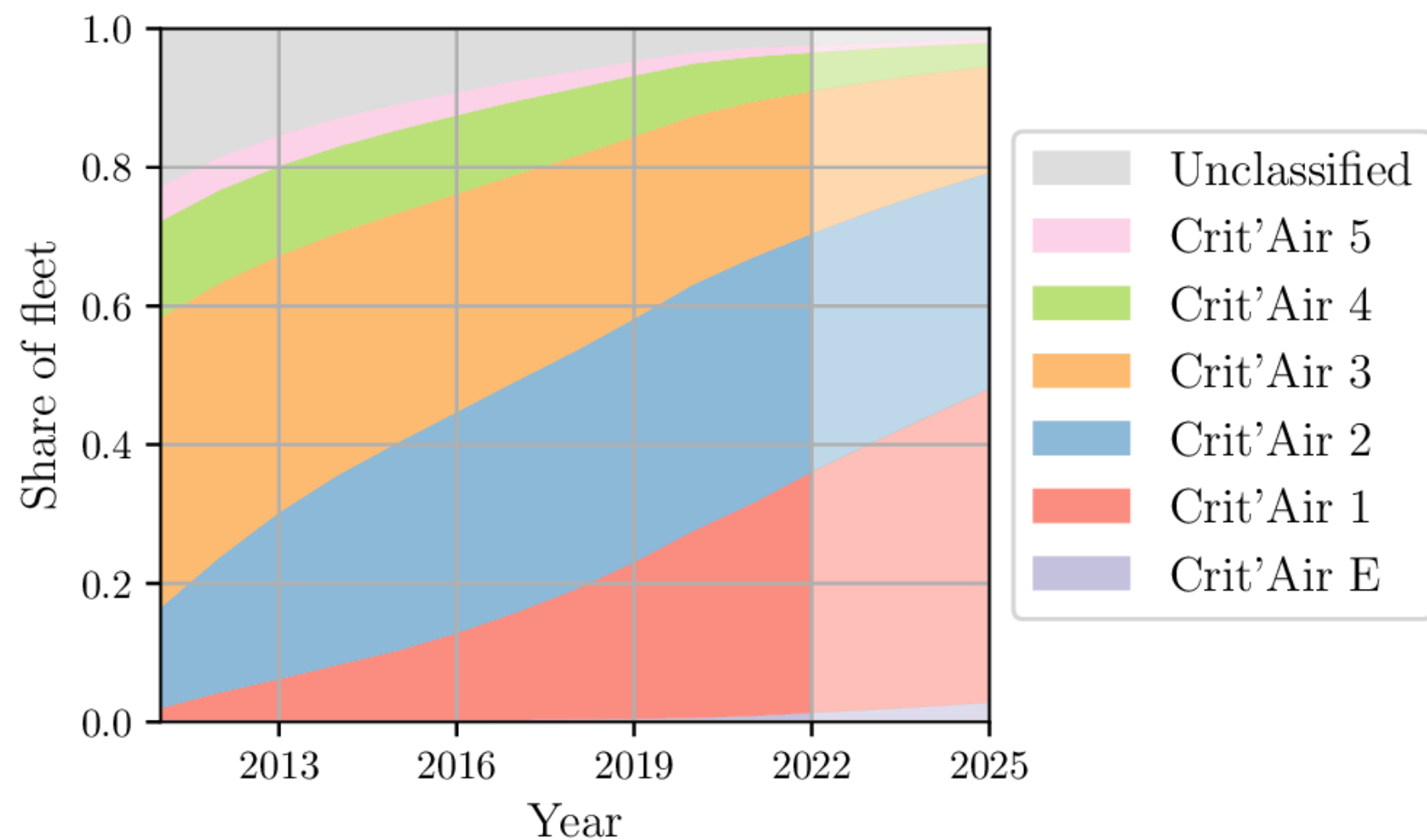
Zone à faibles émissions de la Métropole du Grand Paris

- 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



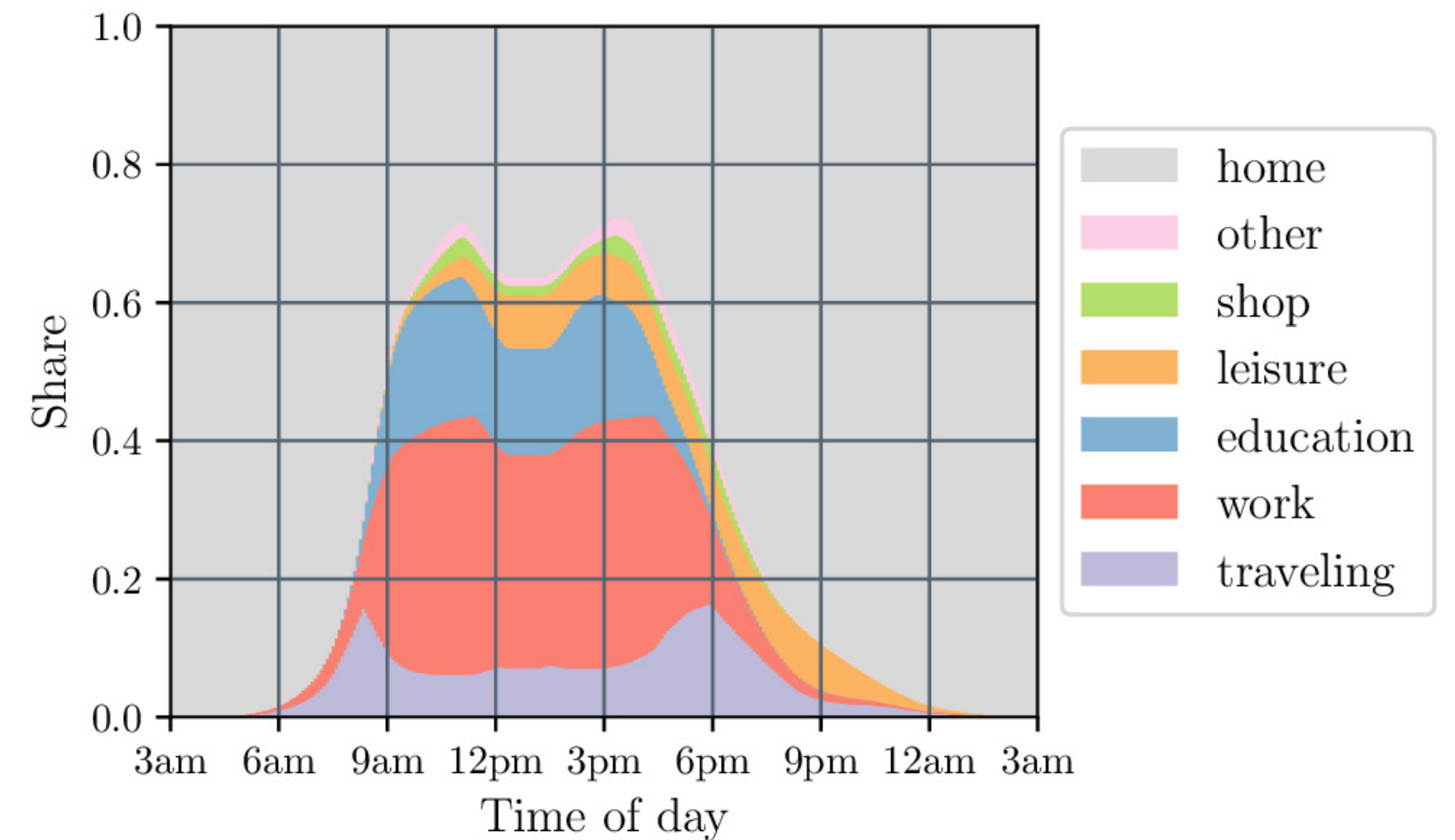
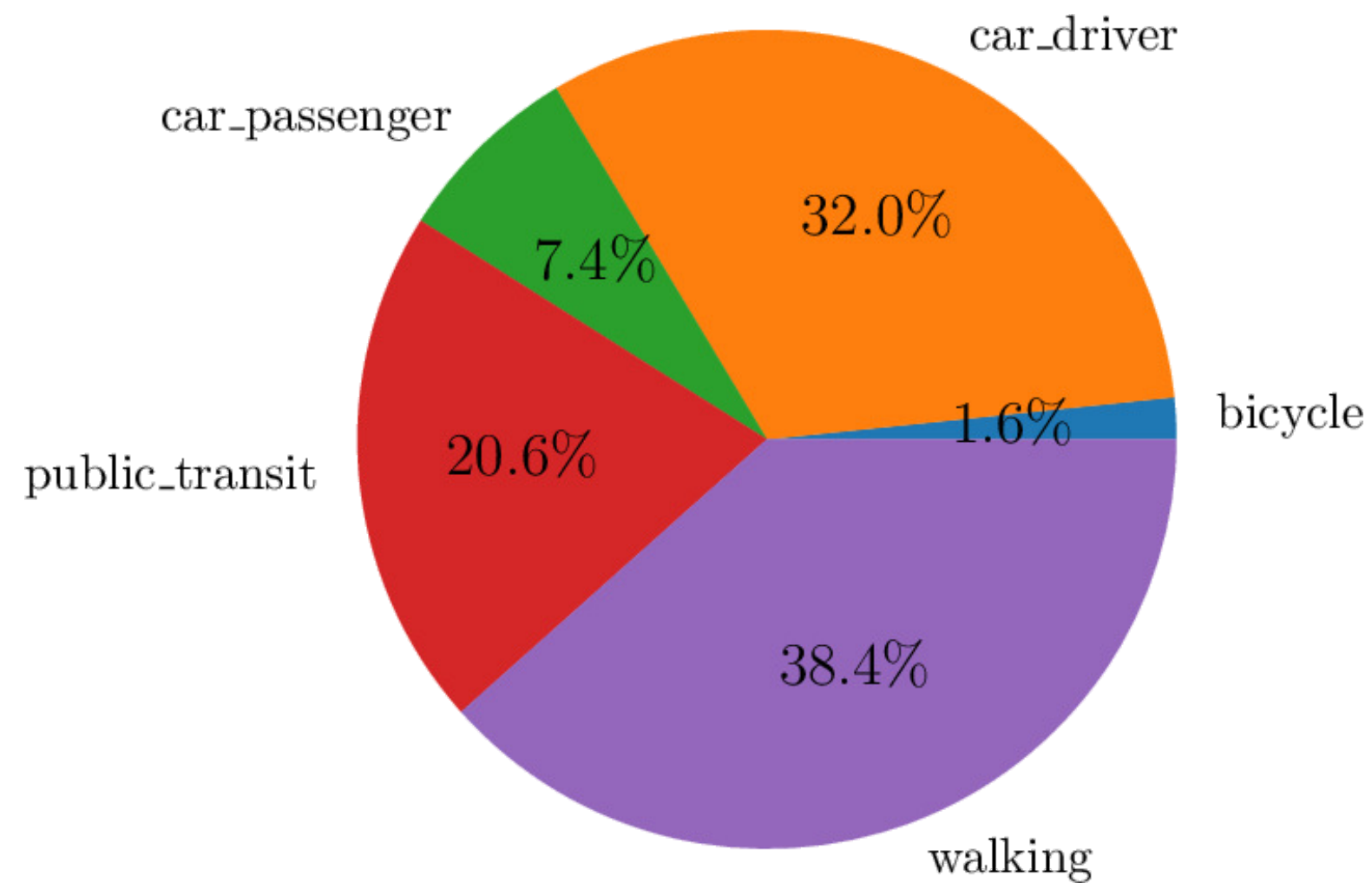
Le parc automobile d'Île-de-France

- 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



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



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 %	

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

Résultats agrégés

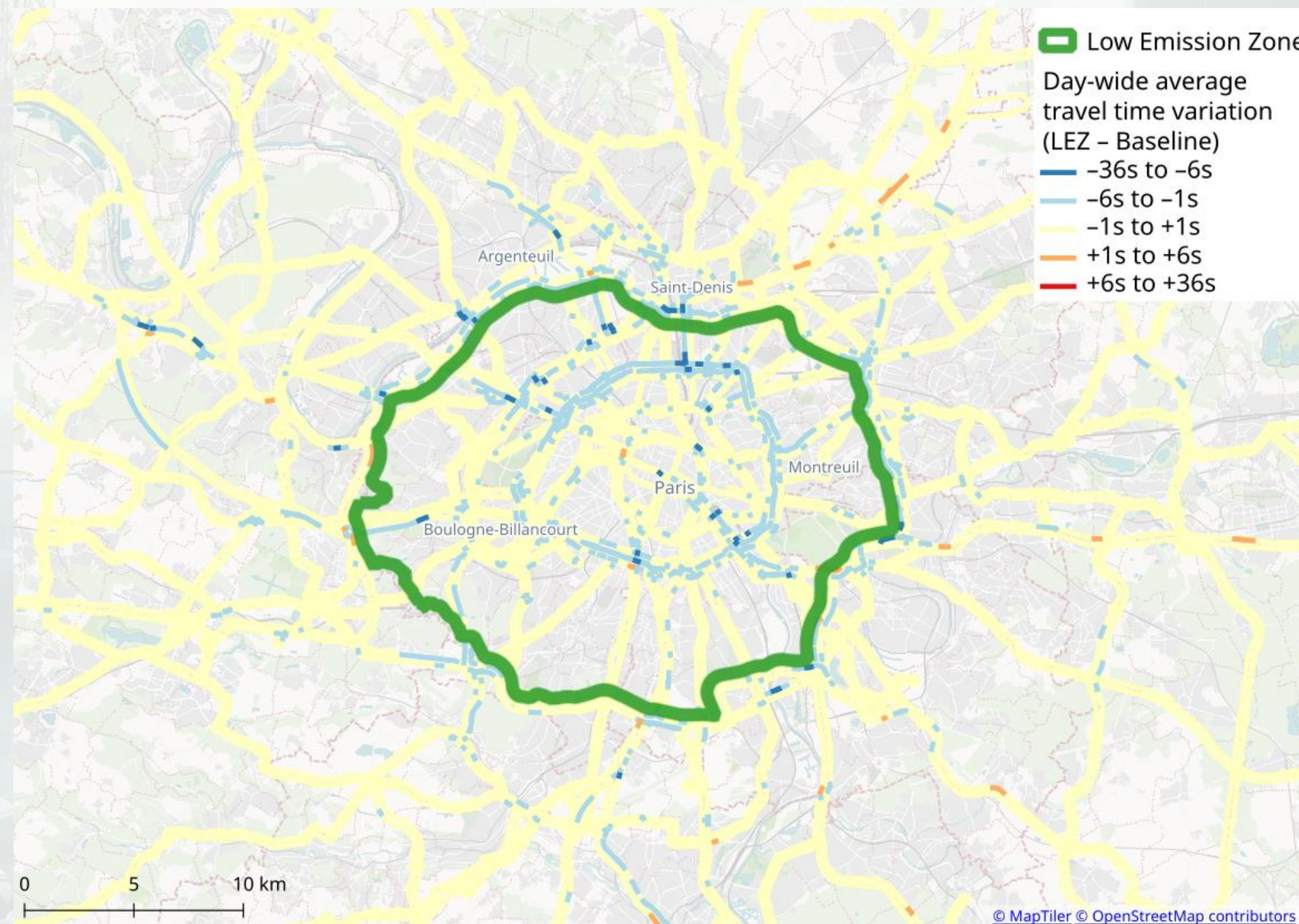
	Référence	ZFE	Variation
Surplus moyen des déplacements	-28.96 €	-29.03 €	-0.07 €
Temps de trajet moyen	01:12:05	01:12:55	+50s
Véhicules-kilomètres	123.30 M km	119.72 M km	-2.9 %

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%

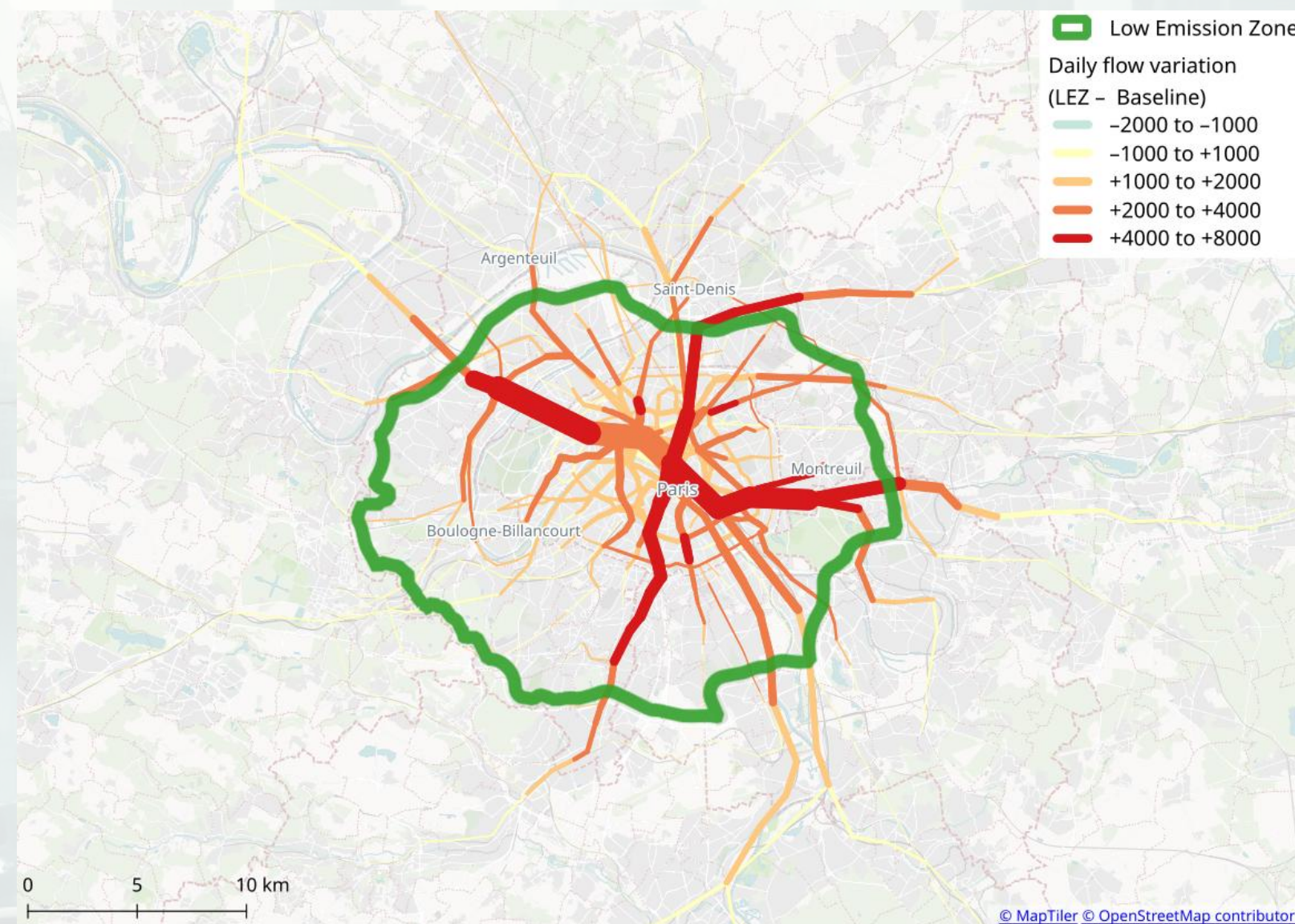
Impact sur la congestion

- 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

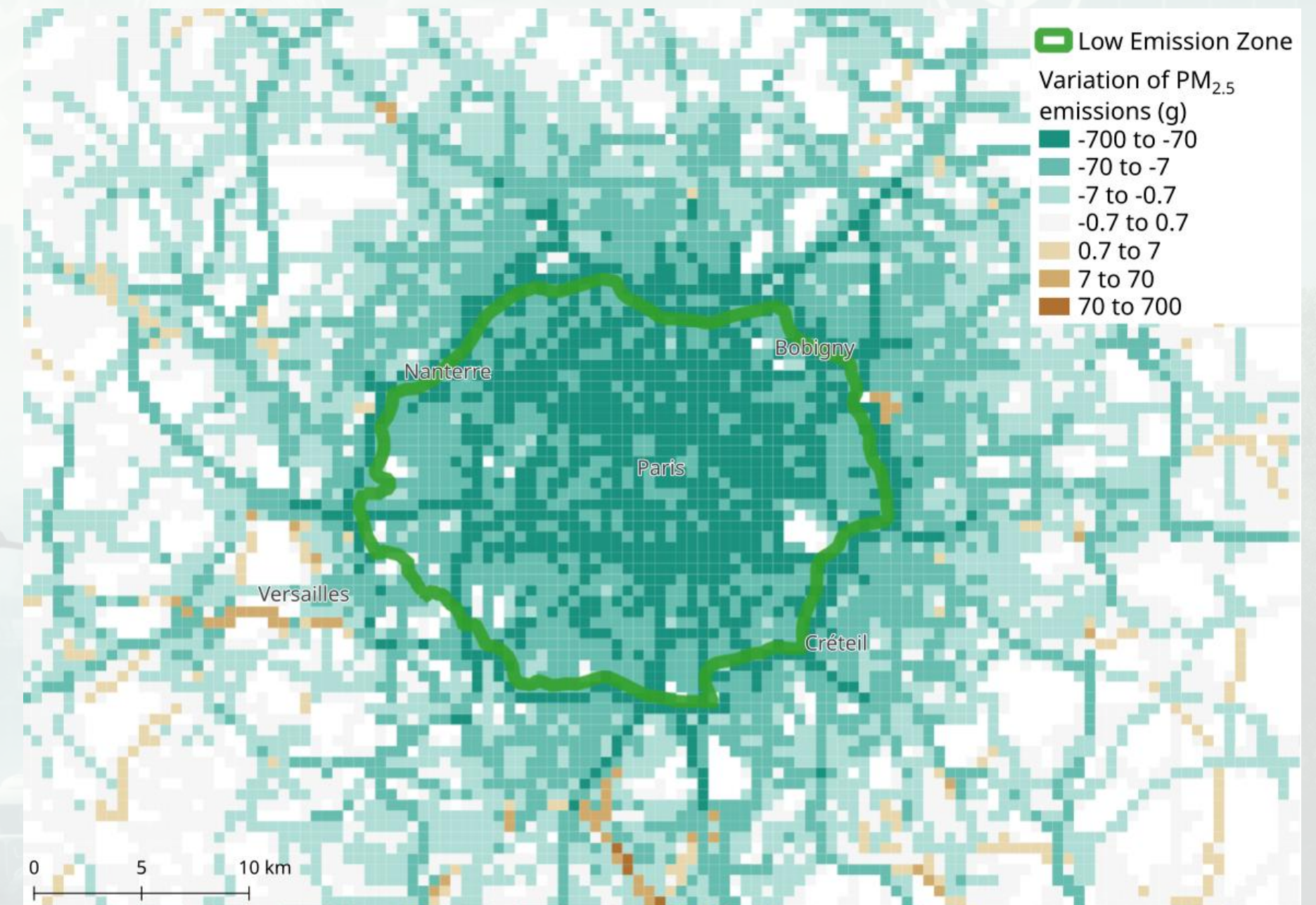
- Hausse des flux sur la plupart des tronçons, principalement en petite couronne (nord, est, sud)
- RER A : +1.2% passagers-kilomètres
- RER B : +2.1% passagers-kilomètres
- Tramway T7 : +24.4% passagers-kilomètres



Émissions de polluants (METRO-TRACE)

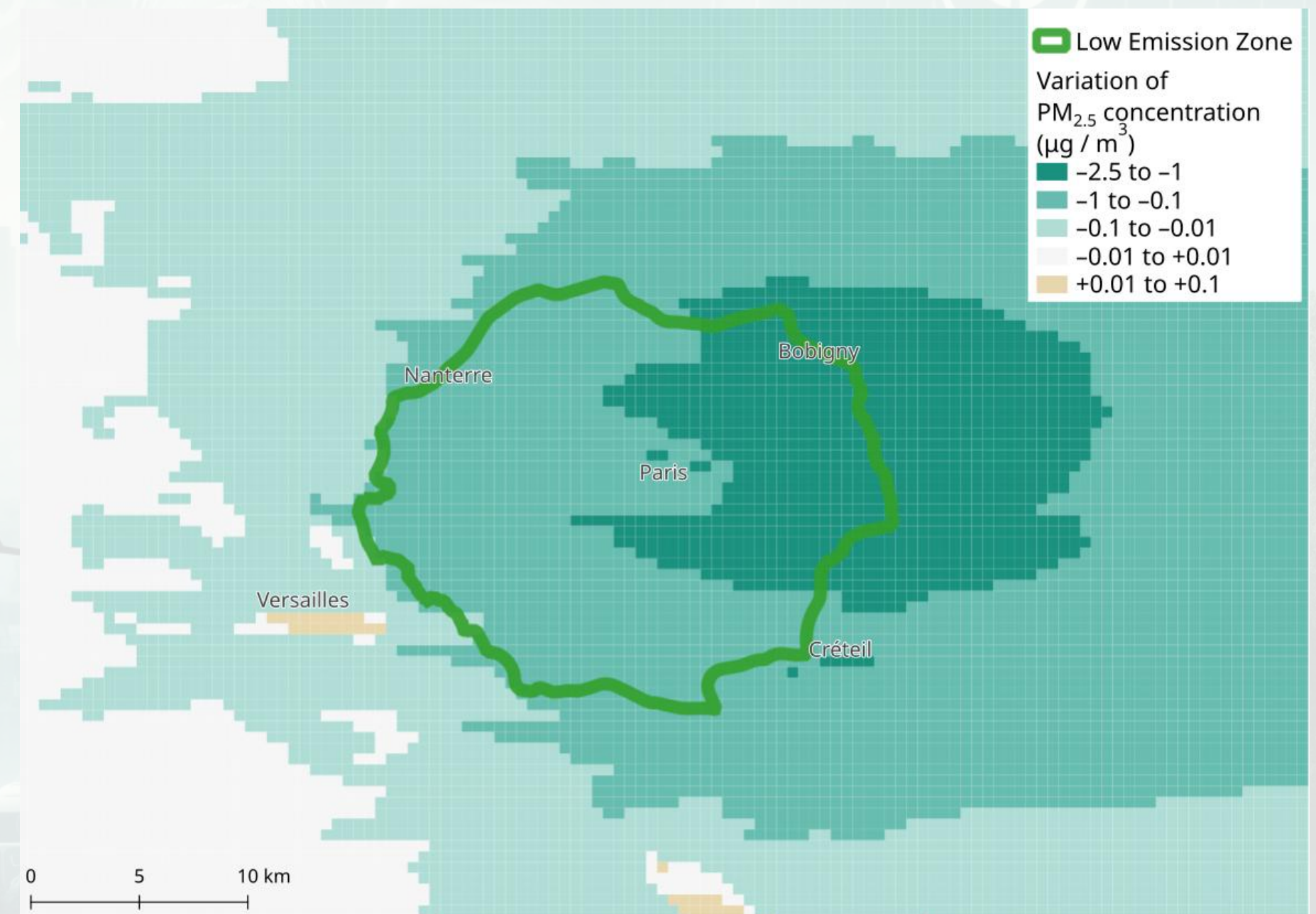
- Les émissions de **PM_{2.5}** et **NO_x** générées par le trafic routier sont calculés à partir du modèle EMISENS
- Les émissions sont une fonction de la **motorisation** et de l'**âge** des véhicules ainsi que de leur **vitesse** (au niveau arc)
- Les émissions diminuent plus fortement au sein de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

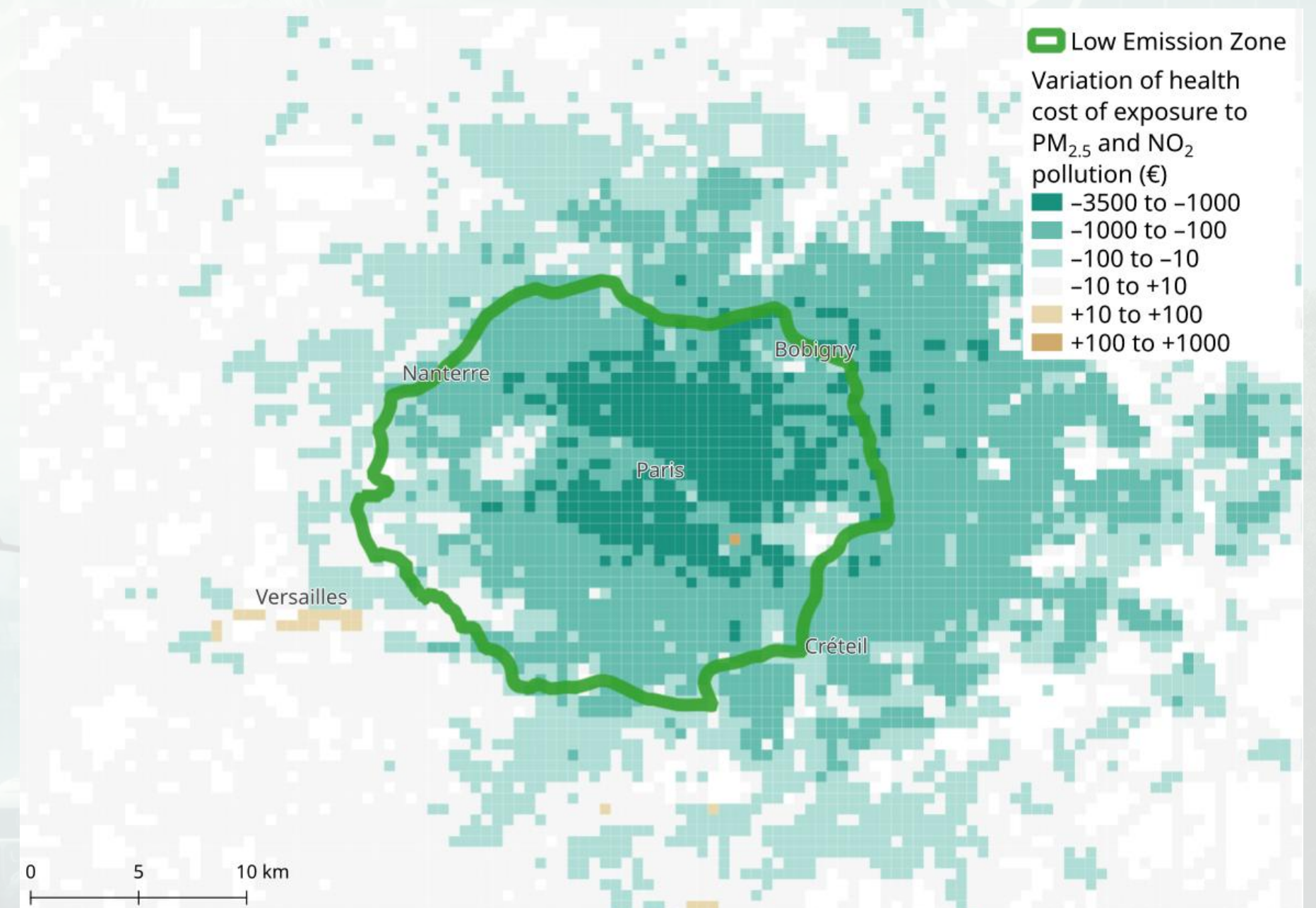
- Les émissions de $\text{PM}_{2.5}$ et NO_x sont **dispersées** dans l'atmosphère par un **modèle gaussien Plume**
- La dispersion dépend d'un **vent** moyen (vers l'est, 10 km/h)
- La concentration en polluants diminue plus fortement dans la ZFE et à l'est



Exposition des populations à la pollution (METRO-TRACE)

- 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

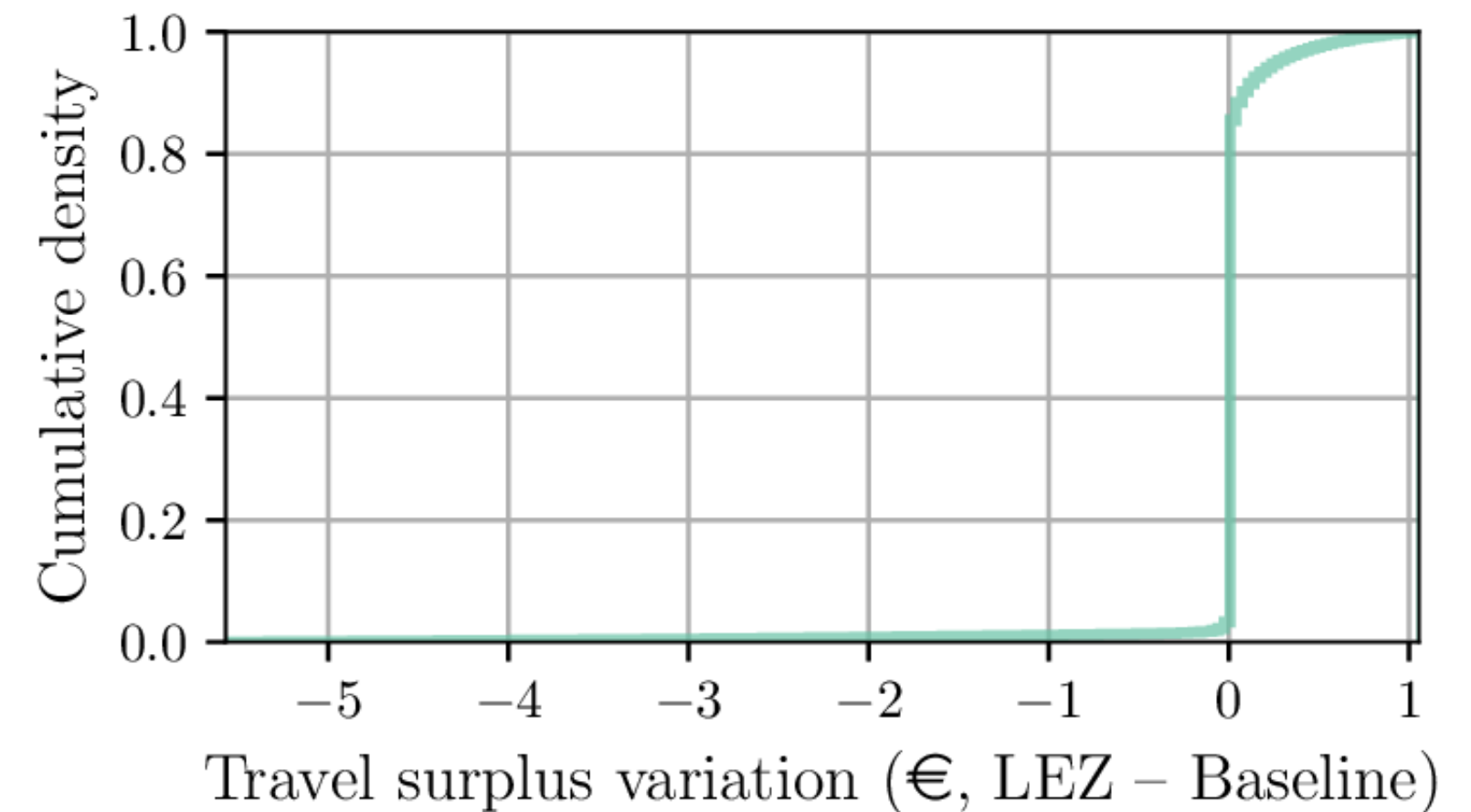
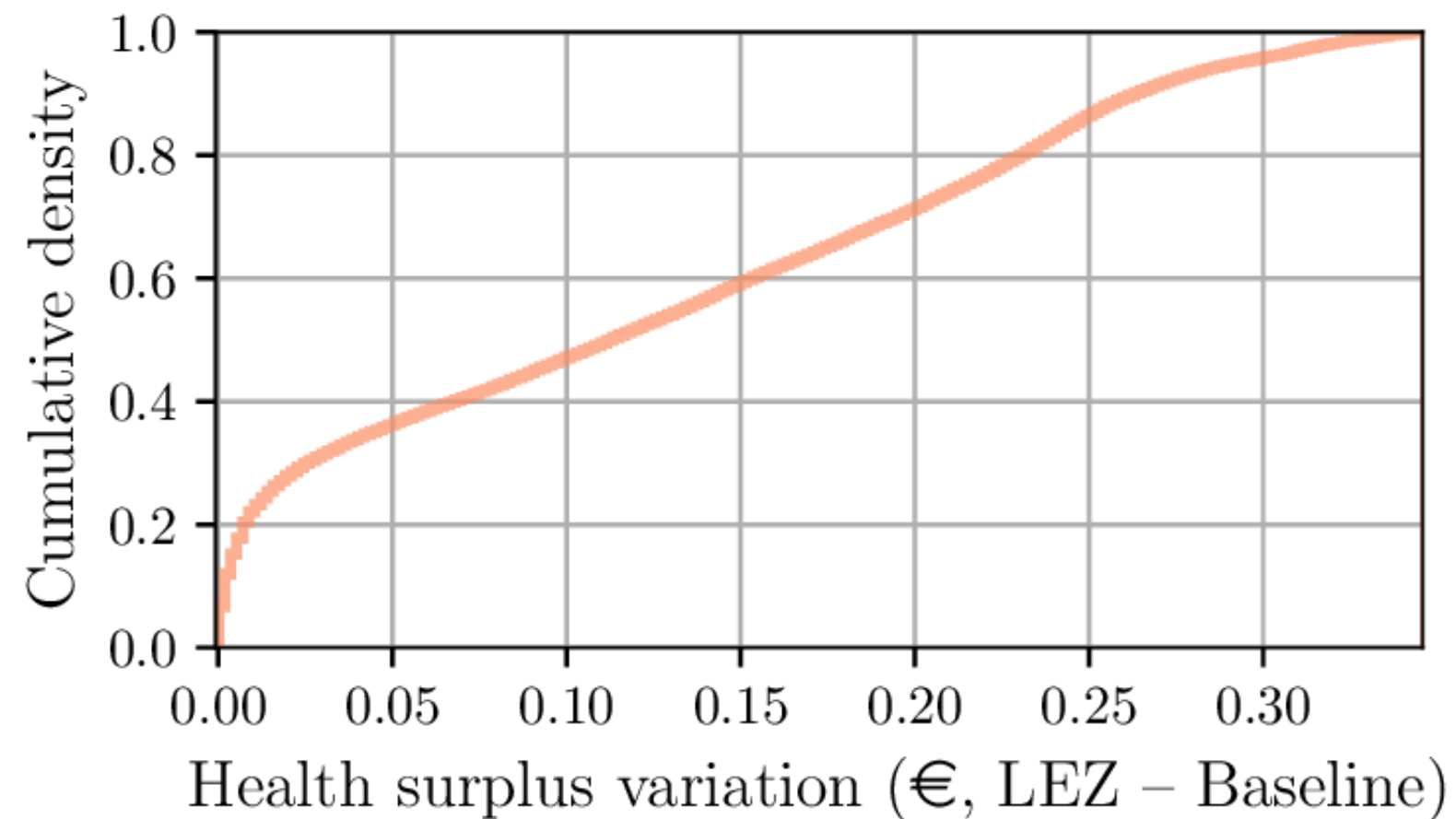
	Variation
Véhicules-kilomètres	-2.9 %
Émissions de PM _{2.5}	-6.0 %
Décès prématurés PM _{2.5}	-9.4 %

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

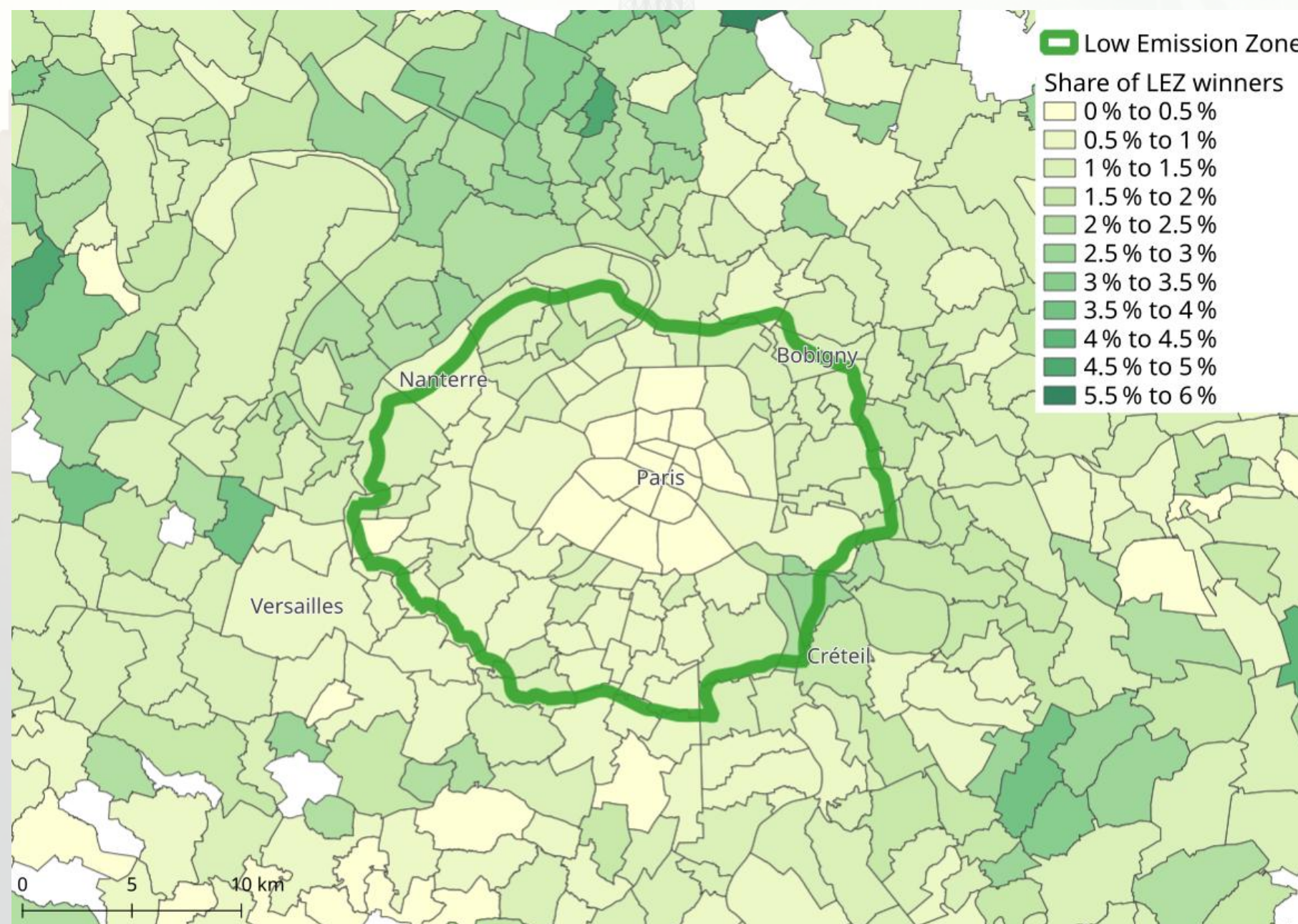


Caractérisation des gagnants et perdants

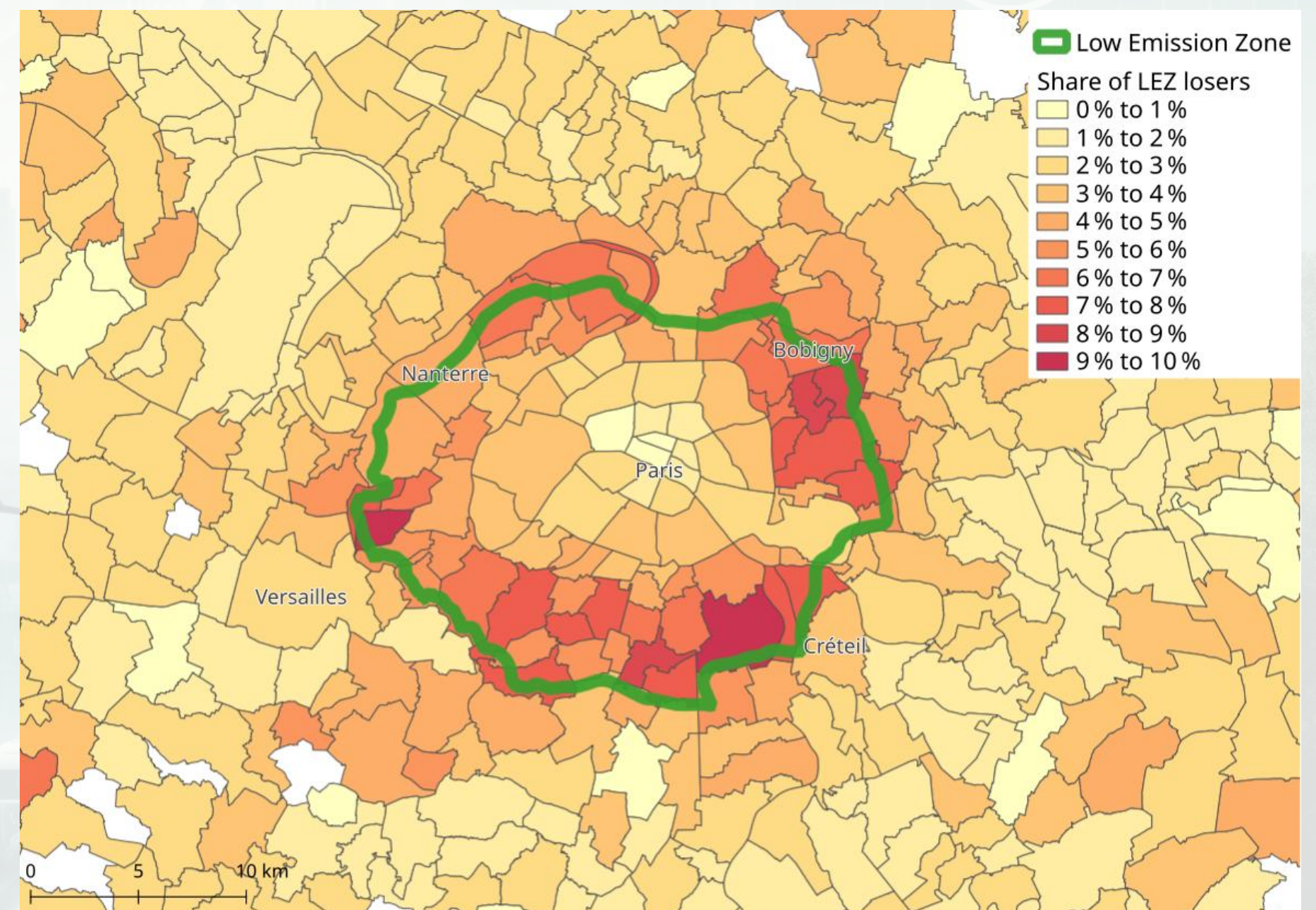
	Gagnants	Perdants	Autres
Critère	$\Delta\text{surplus} \geq 1 \text{ € / jour}$	$\Delta\text{surplus} \leq -1 \text{ € / jour}$	$ \Delta\text{surplus} < 1 \text{ € / jour}$
Variation moyenne du surplus	+2.0 €	-7.2 €	+0.0 €
Possession de véhicule autorisé	97 %	4 %	53 %
Possession de véhicule non autorisé	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



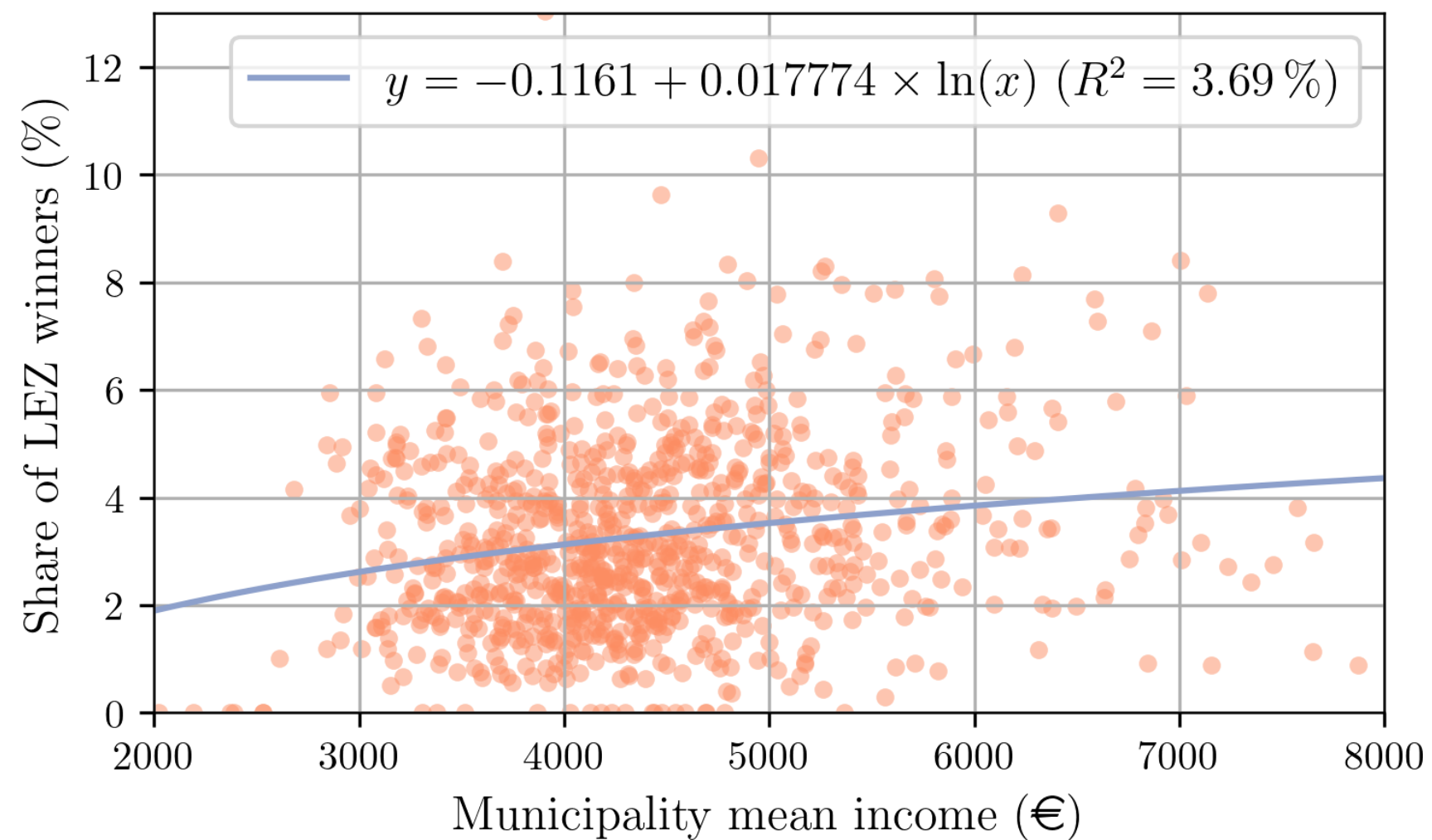
Gagnants



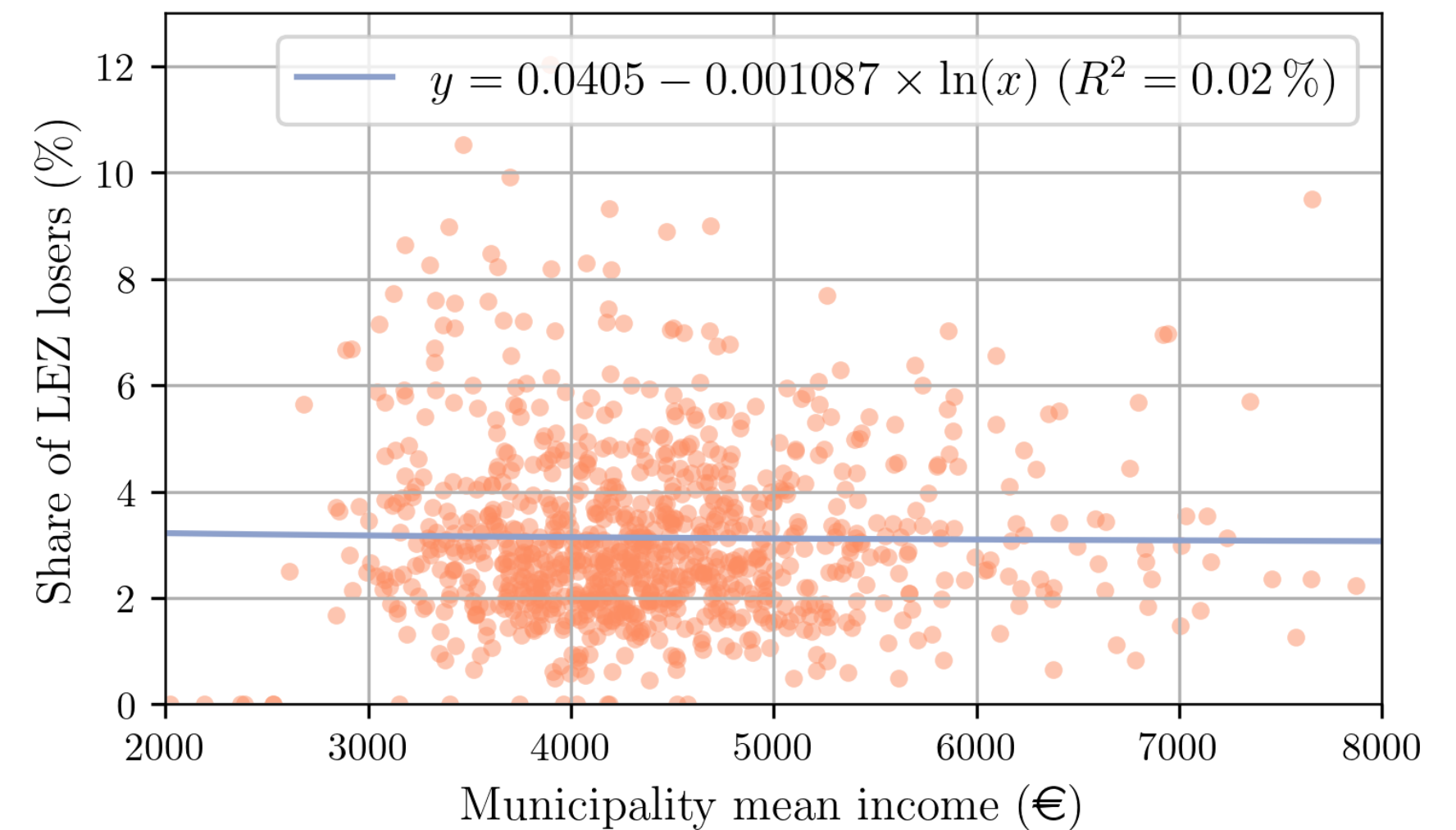
Perdants

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



Low Carbon



Low Carbon



Low Carbon



Low Carbon



Low Carbon

Thank you