



HAL
open science

Vulmob, a multidimensional vulnerability indicator to assess the impact of policies limiting car use - application to the Grenoble LEZ

Lola Blandin, Hélène Bouscasse, Sandrine Mathy

► To cite this version:

Lola Blandin, Hélène Bouscasse, Sandrine Mathy. Vulmob, a multidimensional vulnerability indicator to assess the impact of policies limiting car use - application to the Grenoble LEZ. 2026. <hal-05477824>

HAL Id: hal-05477824

<https://hal.science/hal-05477824v1>

Preprint submitted on 26 Jan 2026

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publi es ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou priv es.



HAL Authorization

Consumption - Energy - Innovation

**Vulmob, un indicateur de vulnérabilité
multidimensionnel pour évaluer l'impact de
politiques limitant l'usage de la voiture –
application à la ZFE de Grenoble**

**Lola Blandin
Hélène Bouscasse
Sandrine Mathy**

September 18, 2025

JEL: Q52, Q58, R48



Vulmob, un indicateur de vulnérabilité multidimensionnel pour évaluer l'impact de politiques limitant l'usage de la voiture – application à la ZFE de Grenoble

Vulmob, a multidimensional vulnerability indicator to assess the impact of policies limiting car use - application to the Grenoble LEZ

Lola BLANDIN

Univ. Grenoble Alpes, CNRS, INRAE, Grenoble INP, GAEL, 38 000 Grenoble, France

lola.blandin@gmail.com

ORCID 0009-0009-2394-3734

Hélène BOUSCASSE

CESAER UMR1041, INRAE, Institut Agro, F-21000, Dijon, France

helene.bouscasse@inrae.fr

ORCID 0000-0002-4337-5908

Sandrine MATHY

Univ. Grenoble Alpes, CNRS, INRAE, Grenoble INP, GAEL, 38 000 Grenoble, France

sandrine.mathy@univ-grenoble-alpes.fr

ORCID 0000-0002-7998-4115

Auteur correspondant

Mots-clés

Evaluation de politique publique ; Mobilité ; Report modal ; Vulnérabilités ; Zones à faibles émissions.

Keywords

Low emission zones ; Mobility; Modal shift; Public policy evaluation; Vulnerabilities.

Classification JEL : Q52; Q58; R48

Résumé

L'injustice sociale est souvent invoquée pour motiver les reculs successifs de déploiement des zones à faibles émissions (ZFE) en France. Pourtant, cet argument ne s'appuie sur aucune évaluation rigoureuse. Nous développons une méthodologie d'évaluation de l'impact d'une ZFE sur les vulnérabilités de mobilité à l'aide de l'indicateur de cumul de vulnérabilités (VulMob), et l'appliquons à la région grenobloise. Nous montrons que le nombre de ménages sans solution est extrêmement faible. Il existe donc des solutions ciblant spécifiquement ces ménages sans remettre en cause toute la politique. Par ailleurs, le report modal est une solution d'adaptation à fort potentiel pour tous les ménages, ce qui pourrait de plus améliorer les performances environnementales et sanitaires des ZFE. Cependant, les ménages très vulnérables sont plus affectés et plus nombreux à rester sans solution autre que l'achat d'une voiture conforme à la ZFE.

Abstract

Social (in)justice is an argument often put forward to explain the successive setbacks to the roll-out of low-emission zones (LEZs) in France. However, until now, this is not based on any rigorous assessment. We are developing a methodology for assessing the impact of a LEZ on mobility vulnerabilities based on a multidimensional vulnerability indicator (VulMob). We apply this methodology to the Grenoble region. Firstly, we show that the number of households without a solution is extremely low and that there are solutions to help these households specifically, without calling the whole policy into question. Moreover, modal shift appears to be a high-potential adaptation solution for all households, which could improve the environmental and health performance of the LEZs. It should be noted, however, that highly vulnerable households are more affected and more likely to remain without a solution other than buying a car that complies with the LEZ. This work can guide the operational implementation of the LEZs and the definition of support policies, taking into account vulnerability profiles and the specific characteristics of the area.

Points clés

- Nous développons un indicateur multidimensionnel de cumul de vulnérabilités en mobilité (VulMob)
- Nous évaluons l'impact d'une zone à faible émissions sur les vulnérabilités en mobilité à l'aide de VulMob
- La méthodologie est appliquée à l'aire urbaine de Grenoble.
- Le report modal est une solution d'adaptation à la ZFE à fort potentiel pour l'ensemble des ménages.
- L'identification et la spatialisation des profils de ménages vulnérables impactés guident la définition des mesures d'accompagnement

Introduction

La dépendance à la voiture a de nombreux impacts négatifs notamment en terme de pollution de l'air, de contribution aux émissions de gaz à effet de serre et de déficit d'activité physique. Des politiques incitatives et réglementaires sont nécessaires. Les zones à faibles émissions (ZFE) font partie de l'éventail de ces politiques en matière de transport. Elles interdisent l'accès des véhicules les plus polluants dans un périmètre englobant les centres urbains. Les ZFE ont connu une forte croissance en Europe : 320 ont été mises en place dans l'UE-27, au Royaume-Uni et en Norvège (CCC et T&E, 2022). En 2020, 46 des 130 grandes villes de 12 pays européens en avaient déployé une, alors que seules cinq grandes villes avaient instauré un péage urbain (Fageda et al., 2020).

Parce que la mobilité est une condition d'accès aux services et équipements de base, la mise en œuvre de ces politiques s'accompagne souvent d'une forte opposition invoquant notamment les enjeux de justice sociale. La crainte sous-jacente porte sur le risque d'exclusion sociale (Mattioli, 2014 ; De Vrij et Vanoutrive 2022), ce qui conduit les ZFE à être perçues comme favorisant les classes les plus privilégiées vivant dans les centres urbains. Un manque de soutien vis-à-vis de ces politiques peut conduire au déploiement d'une mesure moins efficace (Jia et al., 2017) ou à l'obligation de les modifier une fois mises en œuvre (Raux et al., 2004).

En France en particulier, la crainte que les ménages les plus fragiles soient les plus touchés par les ZFE a fortement freiné leur adoption. En 2012, l'expérimentation de ZAPA (Zones d'Actions Prioritaires pour la qualité de l'Air), ancien nom des ZFE, a été annulée pour cette raison. En 2019, les ZFE sont devenues obligatoires avec la Loi d'Orientation des Mobilités dans les onze villes dépassant les valeurs limites de qualité de l'air (Grand Paris, Lyon, Aix-Marseille, Toulouse, Nice, Montpellier, Strasbourg, Grenoble, Rouen, Reims et Saint-Étienne). La loi Climat et Résilience (2021) prévoyait la généralisation des ZFE en 2025 ainsi qu'une standardisation des véhicules réglementés. Elles devaient devenir obligatoires dans les agglomérations de plus de 150 000 habitants. Mais en 2023, notamment suite à la publication d'un rapport sénatorial (Tabarot, 2023) concluant, sur la base d'une consultation en ligne, aux « risques de fracture sociale et territoriale » que les ZFE pouvaient entraîner, cette obligation a été abandonnée et seules les villes dépassant régulièrement les seuils réglementaires doivent mettre en place une « ZFE effective » (Paris, Lyon, Aix-Marseille, Rouen, Strasbourg).

Malgré son aspect central dans la mise en œuvre des ZFE, il existe peu de littérature sur l'évaluation *ex ante* de l'impact des ZFE sur la mobilité des ménages et en particulier sur celle des vulnérables, que cette vulnérabilité soit économique ou par exemple liée à leur capacité à se reporter vers d'autres modes. Cette évaluation est pourtant nécessaire pour adapter la politique publique et pour définir des politiques de soutien aux ménages qui seraient particulièrement touchés. Cela pourrait conduire à une meilleure acceptation par la population et favoriser la mise en œuvre de politiques ambitieuses.

Une telle évaluation devrait prendre en compte la capacité des ménages à s'adapter à une ZFE et pas seulement la pauvreté financière. En effet, ce n'est pas parce qu'un ménage a un faible revenu et possède un véhicule polluant qu'il sera affecté par la ZFE. Un ménage dont les membres ne parcourent que de courtes distances et ont un accès à des alternatives à la voiture sera moins affecté qu'un ménage parcourant de longues distances et éloigné des transports publics. Dans ce travail, l'identification de différents types de cumuls de vulnérabilités permet

de définir des profils de ménages vulnérables et facilite la définition de politiques d'accompagnement ciblées plutôt que de mettre en place des politiques coûteuses et aux effets d'aubaine importants (subvention à la pompe).

L'indicateur VulMob a été développé pour prendre en compte les différentes dimensions et cumuls des vulnérabilités. Il est composé de 13 facteurs individuels organisés en quatre dimensions : les ressources financières, les contraintes professionnelles, l'utilisation intensive de la voiture et les contraintes structurelles, telles que l'accessibilité ou la structure du ménage.

L'objectif de cet article est d'évaluer, à l'aide de VulMob, l'impact d'une ZFE sur les vulnérabilités en terme de mobilité. Le terrain d'étude est la région de Grenoble. Pour cela, la deuxième partie décrit la littérature sur l'évaluation de l'impact social des ZFE ainsi que sur les indicateurs de ces vulnérabilités en terme de mobilité, la troisième partie, la méthodologie. La quatrième partie présente le territoire d'étude et les données et la cinquième partie, les résultats. La sixième partie discute les résultats et conclut.

-2-

Revue de la littérature

2.1. Evaluation de l'impact social des ZFE sur la mobilité

La littérature évaluant l'impact social des ZFE en termes de mobilité s'est concentrée sur l'impact du déploiement de véhicules peu polluants. Lindsey et al. (2023) concluent à un impact régressif des ZFE, les véhicules basses émissions étant plus onéreux. Ceci repose sur l'hypothèse de revenus corrélés positivement à la possession de véhicules à faibles émissions et de revenus des résidents plus élevés dans les périmètres des ZFE. En effet, selon Parkhurst (2017), les conducteurs à faible revenu sont plus susceptibles de posséder les véhicules les plus anciens soumis à des taxes ou à une interdiction. Charleux (2014), dans une étude prospective de ZFE dans l'agglomération grenobloise, montre que la probabilité d'être affecté par la ZFE est liée au groupe social : un périmètre de ZFE limité à un centre assez riche où se concentrent les ressources urbaines et ne s'appliquant qu'aux vieux véhicules, exempterait les ménages les plus aisés. Au contraire, une réglementation qui traiterait tous les véhicules de la même manière (comme un péage urbain) pourrait être plus égalitaire.

Jusqu'à présent, peu d'attention a été accordée à l'étude des effets potentiels des ZFE sur le report modal. Il a pourtant été démontré suite à l'instauration des ZFE de Madrid (Gonzalez et al., 2021) et de Londres (Aldred et Goodman, 2020) que les taux de motorisation sont nettement inférieurs dans les ménages situés à l'intérieur d'une ZFE. Selon Tarriño-Ortiz et al. (2022), la moitié des personnes interrogées – dont une majorité d'automobilistes - auraient changé de mode de transport suite au déploiement de la ZFE à Madrid. Il est donc important d'examiner les incidences potentielles d'une ZFE en termes de report modal, d'autant que cela pourrait contribuer à limiter les effets régressifs obtenus dans le cas d'une évaluation considérant comme seule adaptation l'achat d'un véhicule conforme à la ZFE. Le report modal dépendra de la localisation des ménages en fonction de leur niveau de revenu et de leur accès ou non à des alternatives à la voiture. Ainsi, l'instauration d'une ZFE à Bruxelles pourrait réduire les inégalités sociales et environnementales, la population à faible revenu résidant principalement dans le centre-ville avec un accès facilité aux transports publics, alors que ce serait l'inverse à Londres (Verbeek et Hincks, 2022).

Il y a donc un enjeu important à réaliser des évaluations de l'impact des ZFE sur les ménages en fonction de leurs caractéristiques économiques, familiales, de localisation résidentielle, etc. et en considérant un large éventail d'options d'adaptation de manière à identifier les catégories de ménages qui auront de grandes difficultés d'adaptation.

2.2. Les enjeux de la mesure de la pauvreté en transport et des vulnérabilités en terme de mobilité

Une littérature beaucoup plus récente que celle sur la précarité énergétique dans le logement s'est développée sur les enjeux de pauvreté en transport (Lowans et al., 2021) mais avec des définitions hétérogènes. Lucas et al. (2016) proposent de définir ce concept au regard de quatre dimensions :

- Pauvreté de mobilité : manque systématique de moyens de transports engendrant des difficultés de déplacement, liées à un manque de services et d'infrastructures,
- Pauvreté liée à l'accessibilité : difficulté d'accéder à certaines activités clés dans des conditions raisonnables de temps, de facilité et de coût,
- Faible accessibilité financière : manque de ressources économiques vis-à-vis des options de transport,
- Exposition aux externalités : accidents de la route, maladies chroniques ou décès dus à la pollution.

La pauvreté transport est un état de fait dont la vulnérabilité est un précurseur et les capacités d'adaptation sont un modérateur. Comme le souligne Adger (2006), le fait d'être exposé, impacté et incapable de s'adapter à une situation liée à la mobilité constitue une vulnérabilité en terme de mobilité. Certains ménages exposés à un phénomène ne seront pas en situation de pauvreté en transport grâce à leur capacité à adapter leurs comportements. En cas d'augmentation du prix des carburants, un ménage à haut revenu modifiera son arbitrage financier ou adoptera d'autres modes de transport. Un ménage à faible revenu utilisant principalement sa voiture pourrait ou non tomber dans la pauvreté en transport, selon sa possibilité de se reporter vers les transports publics ou les modes actifs.

Par ailleurs, vulnérabilité et adaptation sont intimement liées puisque le cumul de vulnérabilités contraint les capacités d'adaptation des ménages vis-à-vis de changements du système de mobilité dans lequel ils se déplacent (prix du carburant, infrastructures de transport, restriction de la circulation automobile). Mesurer ce cumul nécessite d'utiliser un indicateur multidimensionnel. Ces vulnérabilités sont étudiées dans la littérature, selon quatre dimensions : les contraintes monétaires, les contraintes professionnelles, l'utilisation intensive de la voiture et les contraintes structurelles.

Par ailleurs, l'indicateur doit être construit à l'échelle du ménage pour identifier les ménages faisant face à des difficultés d'adaptation et pour prendre en compte les contraintes internes au ménage : programmation des déplacements relatifs aux activités familiales quotidiennes, nombre de voitures disponibles, revenu et composition du ménage. Or, sur les quatre indicateurs multidimensionnels identifiés dans la littérature, deux sont utilisés au niveau géographique et non pas des ménages (Dodson et Sipe, 2007 ; Sustrans, 2012) ; les deux autres (Berry et al., 2016 ; Alonso-Epelde et al., 2023) ne considèrent pas toutes les composantes de la vulnérabilité.

Au-delà de la simple analyse des facteurs de vulnérabilité, l'identification de profils de vulnérabilité spécifiques au territoire serait utile pour définir des politiques d'accompagnement adaptées. Or, à notre connaissance, seuls Alonso-Epelde et al. (2023) et Van Dülmen et al.

(2022) identifient de tels profils, mais ils sont déterminés de manière exogène et non sur la base de l'analyse de données locales.

L'enjeu de répliquabilité est également important pour standardiser les évaluations. Alonso-Epelde et al. (2023) ont développé pour la première fois un indicateur facilement reproductible sur la base des enquêtes de budget des ménages en Espagne. Les enquêtes ménages déplacements (EMD) fournissent des données régulièrement mobilisées dans la littérature (par exemple Berry et al. (2016) à Paris), disponibles et renouvelées environ tous les dix ans dans la plupart des grandes villes françaises et européennes et constituent donc la base de notre indicateur.

2.3. Cahier des charges pour l'élaboration de VulMob

Etant donnée cette revue de littérature, l'indicateur VulMob que nous avons développé pour évaluer les vulnérabilités et l'impact d'une ZFE doit :

- être calculé au niveau du ménage,
- couvrir les différentes composantes qui contribuent à la vulnérabilité des ménages : ressources financières, contraintes professionnelles, familiales et territoriales, utilisation intensive de la voiture,
- dépasser la question financière, l'objectif n'étant pas seulement d'évaluer l'impact des changements dans le système de transport liés au prix des carburants, mais aussi liés aux politiques environnementales visant à restreindre l'usage de la voiture,
- intégrer une dimension adaptative pour évaluer la capacité des ménages à s'adapter à une modification du système de transport, en fonction des contraintes auxquelles ils sont confrontés et des solutions qu'ils sont susceptibles de déployer ou adopter (achat d'un nouveau véhicule, possibilité de report modal, modification de l'organisation familiale),
- être composite, afin de prendre en compte simultanément toutes les composantes,
- permettre d'établir des profils de ménages vulnérables afin de caractériser les conséquences des changements et d'adapter les politiques publiques,
- s'appuyer sur des données faciles à collecter et mises à jour régulièrement.

-3-

Méthodologie et données

3.1. VulMob, un indicateur multidimensionnel de cumul des vulnérabilités en terme de mobilité des ménages

VulMob s'appuie sur 13 facteurs individuels, regroupés selon les quatre dimensions mentionnées en section 2.2. (Tableau 1).

Les données utilisées sont :

- Les Enquêtes Ménages Certifiées CEREMA (EMC²) qui fournissent, selon une méthodologie standardisée, une description des ménages et de ses membres et des habitudes de mobilité (habitudes de déplacement au cours d'un jour de la semaine, principales caractéristiques du ou des véhicules des ménages).
- Les enquêtes Budget de famille réalisées tous les cinq ans pour estimer les coûts de la mobilité (INSEE, 2017).
- Les revenus de la base de données nationale FIDELI (INSEE et DGFIP).

Tableau 1 : Description des facteurs de vulnérabilité de VulMob

| Dimension | Facteur | Variable | Niveau (vulnérable si...) |
|----------------------------------|--|--|----------------------------------|
| 1 – Ressources financières | D1F1 – Revenu par unité de consommation | revenu | < Seuil de pauvreté |
| | D1F2 – Dépenses de mobilité | $\frac{\text{dépenses de mobilité}}{\text{revenu}}$ | > 2 x Médiane |
| 2 – Contraintes professionnelles | D2F1 – Part des déplacements obligatoires | $\frac{N_{\text{déplacements obligatoires}}}{N_{\text{déplacements}}}$ | > 75% |
| | D2F2 – Déplacements professionnels de nuit | $\frac{N_{\text{déplacements professionnels de nuit}}}{N_{\text{déplacements}}}$ | > 1 |
| | D2F3 – Distance domicile-travail | $\text{distance}_{\text{domicile-travail}}$ | > 10 km (SDES) |
| 3 – Usage intensif de la voiture | D3F1 – Fréquence d'utilisation de la voiture | / | “Tous les jours” |
| | D3F2 – Part des déplacements en voiture | $\frac{N_{\text{déplacements voiture}}}{N_{\text{déplacements}}}$ | ≥ 100% |
| | D3F3 – Distance maximale en voiture | $\max(\text{distance}_{\text{voiture}})$ | > Aire d'impact (km) |
| | D3F4 – Efficacité | Etiquette Crit'Air | ≥ 3 |
| 4 – Contraintes structurelles | D4F1 – Accessibilité transports en commun | PTAL ¹ | < Niveau 3 |
| | D4F2 – Accessibilité services | $\text{distance}_{\text{moy}}$ | > Q8 |
| | D4F3 – Accès aux voitures | $\frac{N_{\text{voitures}}}{N_{\text{conducteurs}}}$ | < 0.4 |
| | D4F4 – Structure du ménage | Catégories de la structure du ménage | retraités célibataires, familles |

¹ L'indicateur PTAL est notamment adopté par l'autorité organisatrice des transports de la métropole londonienne.

| | | | |
|--|---|--|---|
| | (variable catégorielle – 12 catégories) | | monoparentales, familles nombreuses (3 enfants et plus) |
|--|---|--|---|

La méthodologie d'élaboration de VulMob est détaillée dans Blandin et al. (2024). Un ménage est considéré comme vulnérable à un facteur spécifique si la valeur de ce facteur pour le ménage franchit le seuil indiqué dans la colonne « Niveau ». L'objectif étant d'analyser le cumul de vulnérabilités, le même poids est donné à chaque facteur et le score de VulMob est égal à la somme de ces vulnérabilités.

3.2. Identification des ménages hautement vulnérables et de leurs profils de vulnérabilités

Nous considérons comme hautement vulnérables (HV) les ménages concernés par au moins six vulnérabilités sur 13. Ces ménages partagent le fait de cumuler de nombreuses vulnérabilités mais la nature de leurs vulnérabilités n'est pas nécessairement la même et il est probable qu'il y ait beaucoup d'hétérogénéités au sein de ces ménages HV.

Nous décrivons donc des profils des ménages HV à l'aide d'une classification ascendante hiérarchique (Ward, 1963). Cet algorithme permet de regrouper les ménages en minimisant la variance intra-cluster sur les facteurs de vulnérabilité. Les clusters sont donc les plus homogènes possibles. Un atout de cette méthode est qu'elle est non supervisée : des groupes spécifiques aux données et à la zone d'étude sont automatiquement définis, sans choix prédéfini et en fonction des caractéristiques des ménages. Nous faisons tourner l'algorithme sur chaque secteur géographique de l'aide d'étude. Lorsque des clusters très similaires apparaissent sur plusieurs secteurs géographiques, nous les regroupons pour constituer les profils.

3.3. Identification des ménages à faible accessibilité financière

La dimension *ressources financières* joue un rôle spécifique au sein de VulMob car elle permet d'identifier les ménages qui cumulent les deux vulnérabilités associées aux ressources financières (faible revenu et part importante des revenus consacrée aux dépenses de mobilité), mais ces ménages ne sont pas forcément HV (section 3.2.).

3.4. Evaluation des impacts d'une ZFE sur la mobilité

Pour simuler l'impact d'une ZFE sur les ménages, nous décrivons les hypothèses relatives aux modalités de la ZFE ainsi que les possibilités d'adaptation pour les déplacements et ménages impactés.

3.4.1 Modalités de la ZFE

Les restrictions de circulation sont introduites suivant la classification standardisée des étiquettes Crit'Air déterminées selon l'âge et le type de carburant. Nous nous concentrons sur l'évaluation des impacts du scénario définie dans la Loi Climat et Résilience (Figure 1).



Figure 1 : Calendrier d'interdiction de la ZFE

Nous considérons une ZFE permanente : les interdictions s'appliquent 24 heures sur 24 et 7 jours sur 7. Nous identifions alors les déplacements en voiture qui partent, traversent ou arrivent dans le périmètre de la ZFE. Pour chaque trajet effectué en voiture, nous vérifions si celui-ci serait interdit par la ZFE, en considérant que le déplacement est réalisé avec la voiture la plus efficace du ménage.

3.4.2. Hypothèses d'adaptation à la ZFE

Pour s'adapter à la ZFE, les ménages ont différentes solutions dont l'enchaînement est décrit dans la Figure 2. Ces étapes explorent les différentes possibilités d'adaptation. Le report modal permet de conserver le même schéma de déplacement, tandis que la modification du trajet peut nécessiter davantage d'efforts. L'achat d'une nouvelle voiture résoudrait tous les problèmes d'adaptation, mais est considéré comme solution de dernier recours car l'un des objectifs des ZFE est de réduire l'utilisation de la voiture.

Report modal

Pour évaluer les possibilités de report modal pour les ménages affectés par la ZFE, nous tenons compte des distances des déplacements, de la pente, de l'inclusion dans une boucle de déplacement et comparons le temps de trajet en voiture et en transports publics. Nous nous appuyons sur les modalités de distances décrites dans Bouscasse et al. (2022) et sur les recommandations techniques du CEREMA pour les aménagements cyclables en France.

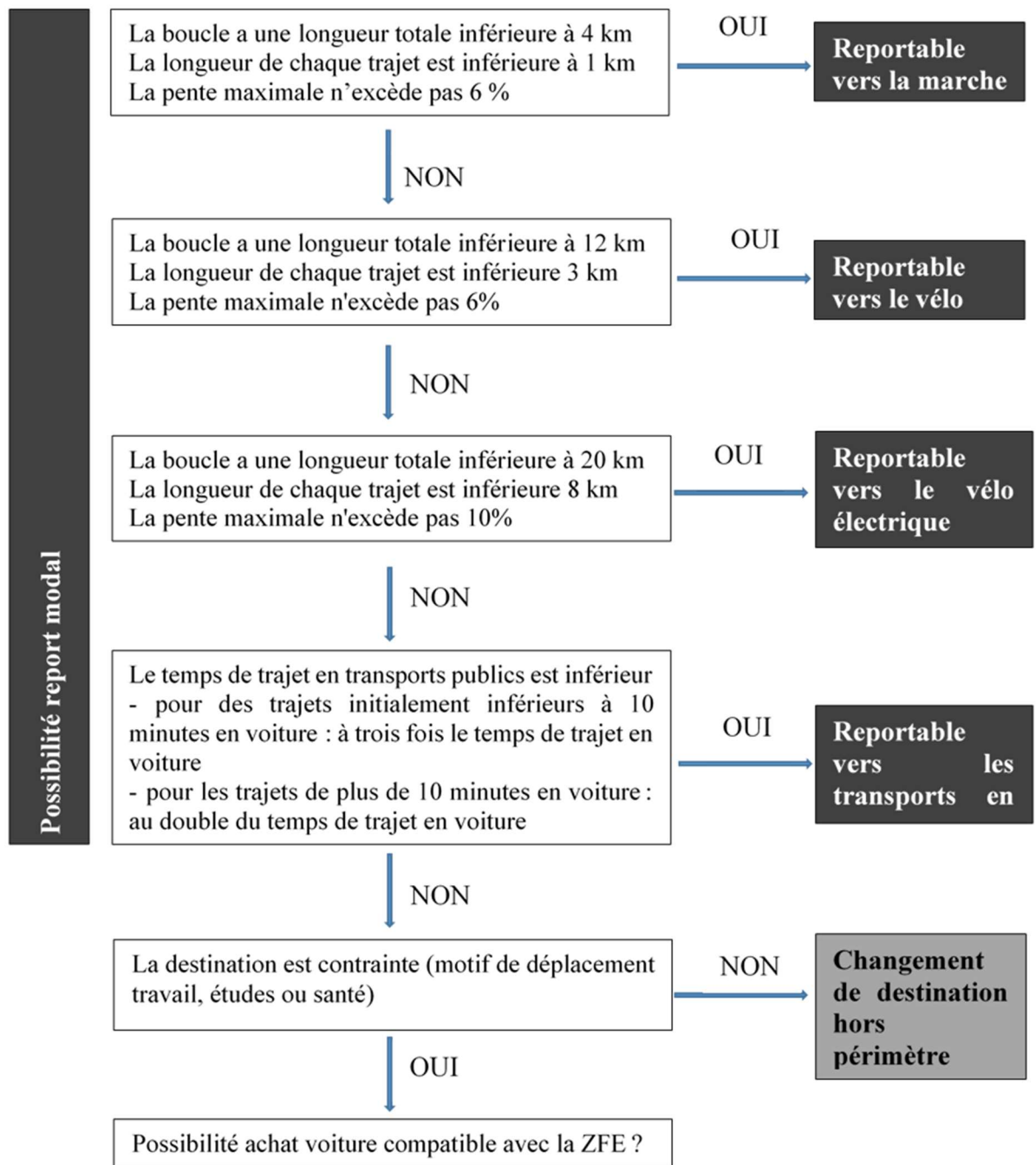
Nous appliquons ces hypothèses de report modal aux données des déplacements des ménages de l'EMC2. Pour chaque déplacement en voiture, nous identifions la boucle correspondante, calculons la distance totale et l'altitude maximale de la boucle, puis estimons pour chaque déplacement la durée du voyage en voiture et en transport public en utilisant l'API OpenTripPlanner.

Motifs du déplacement

Les déplacements pour travail, les études et la santé sont contraints en termes de destination. La destination d'autres déplacements (loisirs, achats) peut être flexible pour éviter la ZFE. Si une destination contrainte est incluse dans une boucle alors l'ensemble de la boucle est contraint.

Achat de voiture

La possibilité d'achat d'une voiture compatible avec la ZFE est discutée sur la base des déciles de revenus pour cibler les politiques de soutien financier.



Note : Une boucle est une combinaison de trajets successifs ayant pour origine et destination le domicile. Un déplacement est reportable vers un autre mode si tous les déplacements de la boucle le sont

Figure 2: Hypothèses d'adaptation à la ZFE

-4-

Description du territoire d'étude et des données

La région grenobloise comprend sept secteurs : Grenoble Alpes Métropole, entourée par la Bièvre, le Voironnais, la Chartreuse, le Grésivaudan, le Sud-Isère, le Vercors et le Sud-Grésivaudan (Figure 3). La population totale y était en 2020 de 826 000 habitants. Grenoble où se concentre une grande partie de la population est une ville plate mais avec de fortes pentes

lorsqu'on s'éloigne du centre. Le périmètre de la ZFE grenobloise comprend la ville de Grenoble et sa première couronne constituée de 12 autres communes².

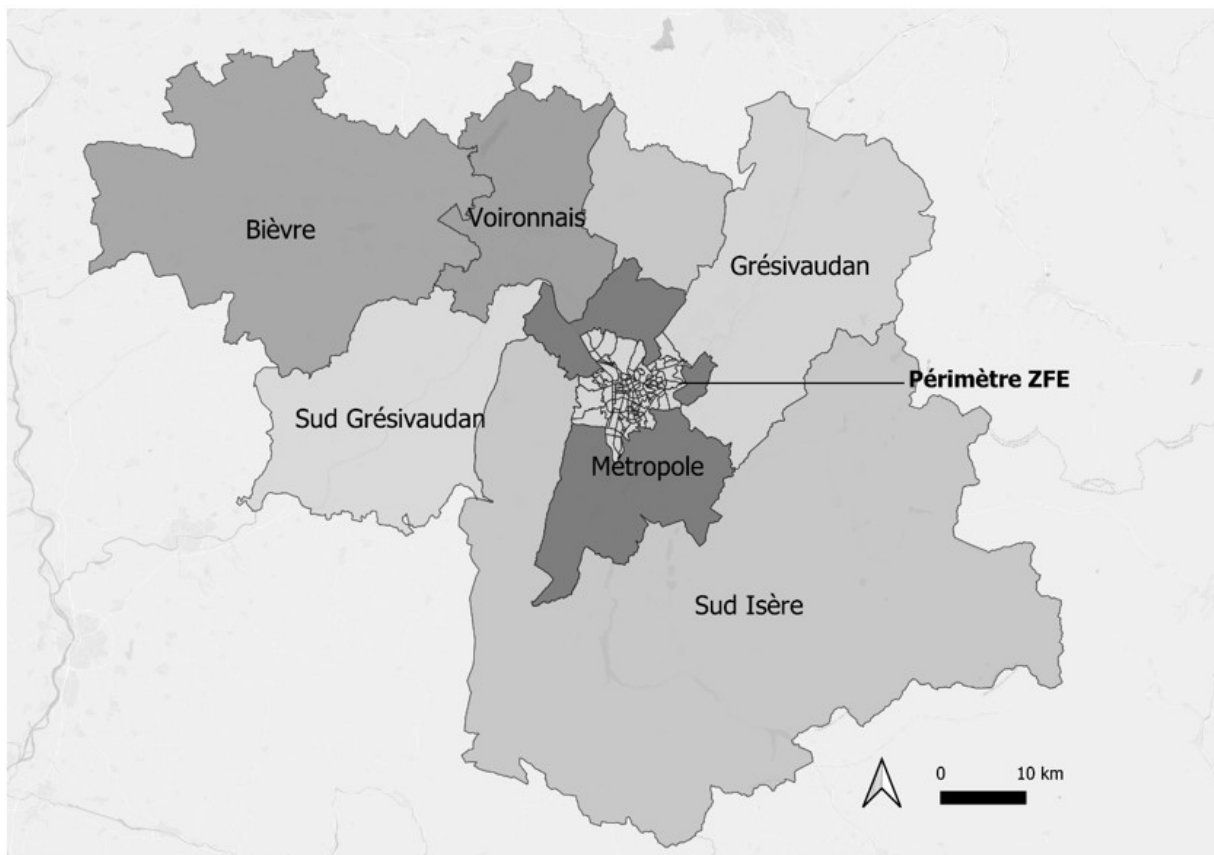


Figure 3 : Région grenobloise par secteur

La majorité des flux de mobilité convergent vers Grenoble, principal pôle urbain. Les ménages se déplacent principalement entre Grenoble et le Grésivaudan ou le Voironnais. En 2010, les habitants de la zone ont effectué en moyenne 236 000 déplacements entre la métropole et le reste de la grande région un jour de semaine. Les personnes résidant en dehors de la métropole ont effectué environ 75 % de ces déplacements, ce qui reflète son attractivité et les conséquences de la périurbanisation. Des changements significatifs dans les parts modales ont eu lieu entre 2010 et 2020 dans l'ensemble des périmètres (y compris les zones rurales). La part modale du vélo a doublé, celle de la marche a augmenté, tandis que celle de la voiture a diminué de 59,4 à 53,6%. Au niveau métropolitain, l'attrait des modes actifs (marche et vélo) devient encore plus important, et la part modale de la voiture y a décliné de 46,1% à 39,7%.

-4- Résultats

² Les 12 communes sont Échirolles, Eybens, Fontaine, Gières, La Tronche, Le Pont-de-Claix, Meylan, Saint-Égrève, Saint-Martin-d'Hères, Saint-Martin-le-Vinoux, Seyssinet-Pariset et Seyssins.

4.1. Ménages hautement vulnérables et ménages à faible accessibilité financière

Plus de 34 000 ménages (9,6%) de notre échantillon sont HV au sens de VulMob (Figure 4). Les ménages touchés uniquement par une faible accessibilité financière en mobilité représentent une part plus faible de la population totale (5,5%) mais ne constituent pas une sous-catégorie des ménages HV. Un ménage peut avoir un faible revenu et avoir des dépenses importantes à sa mobilité sans être vulnérable s'il ne cumule pas d'autres critères de vulnérabilité, concernant par exemple sa configuration familiale ou l'accessibilité de son logement en transports en commun.

Les ménages HV sont inégalement répartis sur le territoire (Figure 5-A), avec une plus forte concentration dans le Sud-Isère, le Sud-Grésivaudan et, dans une moindre mesure, le Grésivaudan. Sur ces territoires, entre 16 et 20,3 % des ménages sont HV, contre moins de 7 % dans la Métropole. La proportion de ménages avec une faible accessibilité financière est plus homogène sur le territoire, bien que l'on puisse observer une proportion plus élevée dans certaines communes de la métropole et dans certains secteurs de la Bièvre ou du Sud Isère (Figure 5-B).

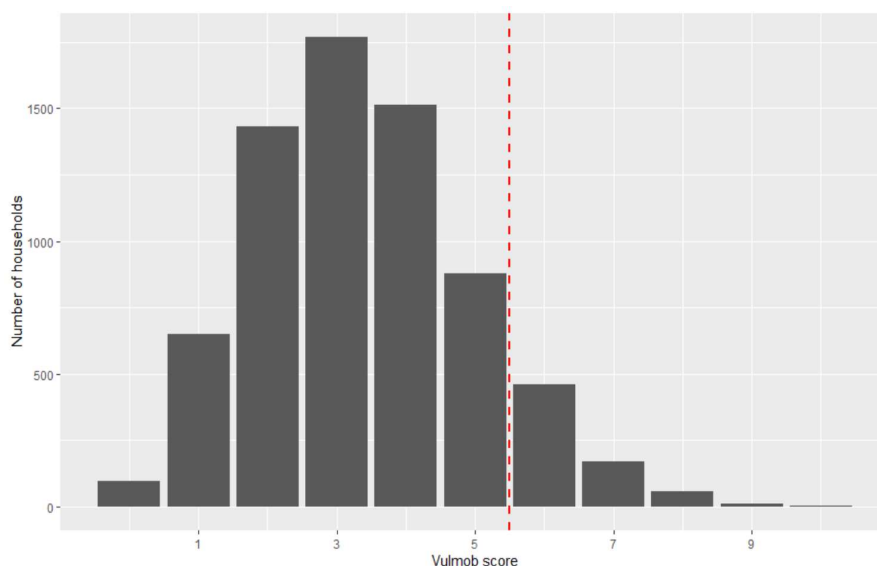
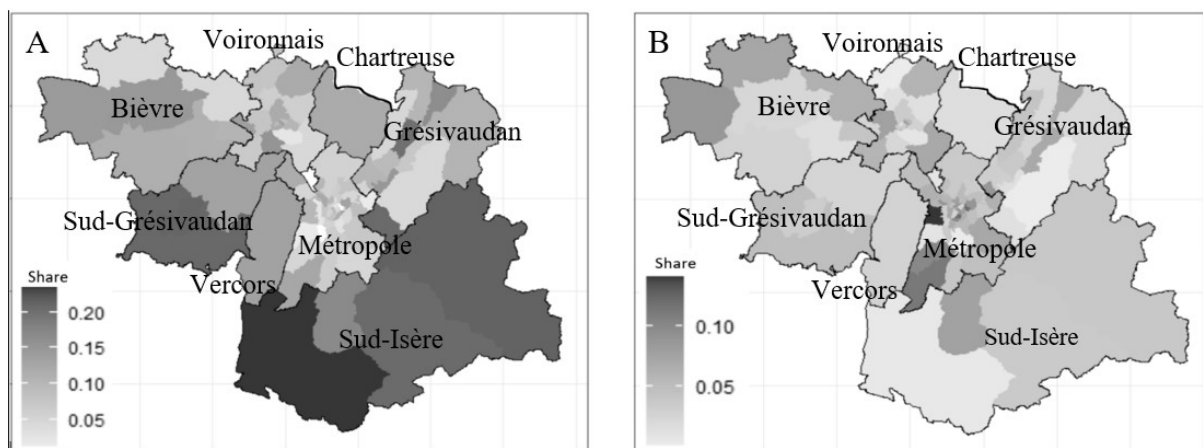


Figure 4 : Distribution du score de l'indicateur VulMob dans la population
La ligne rouge représente la limite à partir de laquelle un ménage est HV



Figures 5-A et 5-B : Répartition (a) des ménages HV et (b) avec une faible accessibilité financière en fonction de leur lieu de résidence.

4.3. Identification et localisation résidentielle des profils de ménages hautement vulnérables

La CAH conduit à l'identification de cinq profils de vulnérabilités répartis dans les différents secteurs géographiques. Ces cinq profils regroupent 30 883 ménages HV (sur environ 34 000 au total). Trois de ces profils sont confrontés à une faible accessibilité aux transports publics. Les différents profils de HV sont caractérisés comme suit (Tableau 3):

- Profil A ("contraintes monétaires") : combine faible revenu par unité de consommation et mauvaise accessibilité aux transports publics.
- Profil B ("sans alternative") : cumule des problèmes de déséquilibre spatial et une mauvaise accessibilité aux transports publics.
- Profil C ("travail nocturne") : regroupe des ménages ayant des contraintes de travail de nuit et vivant loin de leur lieu de travail.
- Profil D ("utilisation structurelle de la voiture") : regroupe des ménages avec des structures familiales contraignantes, utilisant leur voiture tous les jours.
- Profil E ("utilisation intense et coûteuse de la voiture") : composé de ménages cumulant des dépenses de mobilité élevées, un mauvais accès aux transports publics et se déplaçant uniquement en voiture.

Spatialement, certains profils ne sont présents que dans certains secteurs (Tableau 4), tandis que d'autres se retrouvent sur l'ensemble du territoire. Par exemple, il n'y a pas de cluster correspondant au profil « contraintes monétaires » dans le Grésivaudan, ce qui est cohérent avec le niveau élevé de revenu observé dans cette zone, mais le profil des travailleurs de nuit est présent dans tous les secteurs. Par ailleurs, si un profil n'apparaît pas dans un secteur, cela ne signifie pas pour autant qu'il n'y ait pas certains ménages concernés par cette combinaison de vulnérabilités mais qu'ils sont trop peu nombreux pour avoir été regroupés dans l'étape de clustering.

Tableau 3 : Caractérisation des profils de ménages HV

| | 1 – Ressources financières | | 2 – Contraintes professionnelles | | | 3 - Usage intensif de la voiture | | | | 4 – Contraintes structurelles | | | | Nombre de ménages |
|---|----------------------------------|----------------------|------------------------------------|-------------------------------------|---------------------------|---------------------------------------|----------------------------------|------------------------------|------------|----------------------------------|------------------------|----------------|---------------------|-------------------|
| | D1F1 | D1F2 | D2F1 | D2F2 | D2F3 | D3F1 | D3F2 | D3F3 | D3F4 | D4F1 | D4F2 | D4F3 | D4F4 | |
| | Revenu par unité de consommation | Dépenses de mobilité | Parts de déplacements obligatoires | Déplacements professionnels de nuit | Distance domicile-travail | Fréquence d'utilisation de la voiture | Part des déplacements en voiture | Distance maximale en voiture | Efficacité | Accessibilité transports publics | Accessibilité services | Accès voitures | Structure du ménage | |
| A - Contraintes monétaires | ■ | | | | | | | | | ■ | | | | 3 452 |
| B - Sans alternative | | | | | | | | | | ■ | ■ | | | 5 705 |
| C - Travail nocturne | | | | ■ | ■ | | | | | | | | | 10 702 |
| D - Utilisateurs structurels de la voiture | | | | | | ■ | | | | | | | ■ | 5 000 |
| E - Utilisation intense et coûteuse de la voiture | | ■ | | | | | ■ | | | ■ | | | | 6 024 |

Tableau 4 : Répartition des profils selon leur localisation résidentielle

| Secteurs | A Contraintes monétaires | B Sans alternative | C Travail nocturne | D Utilisateurs structurels de la voiture | E Utilisation intense et coûteuse de la voiture |
|----------------------|--------------------------------|--------------------------|--------------------------|--|--|
| Grésivaudan | | 15,6% | 5,8% | 22,3% | 19,9% |
| Sud | | 31,5% | 8,0% | | 14,1% |
| Grésivaudan | | | | | |
| Sud Isère | 31,2% | 7,0% | 16,1% | 9,9% | |
| Bièvre | 23,6% | 18,1% | 4,7% | 16,7% | |
| Voironnais | 21,1% | | 7,9% | 16,5% | 21,0% |
| Métropole | 24,1% | 27,8% | 57,5% | 34,6% | 45,0% |
| TOTAL | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% |
| Nombre de ménages | 3 452 | 5 705 | 10 702 | 5 000 | 6 024 |

4.4. ZFE, capacités d'adaptation et impacts sur les vulnérabilités

4.4.1 Evaluation des impacts de la mise en œuvre de la ZFE

Dans la zone étudiée, 80,8% des ménages possèdent une voiture. 2,2 % de ces voitures seront interdites d'ici 2023, 4,8 % d'ici 2024 et 19,3 % d'ici 2025. Les ménages à faibles revenus sont les plus susceptibles de détenir les voitures les plus polluantes (Figure 6).

Au total, 28 854 ménages seraient touchés entre 2023 et 2025 (8% de la population, voir tableau 5). Les impacts spatiaux de la ZFE sont hétérogènes. Une part importante des ménages affectés vit dans le périmètre de la ZFE (83,6 %), les autres ménages touchés vivant principalement dans le Voironnais et le Grésivaudan (Figure 7).

Parmi les ménages touchés, 11,6 % sont HV. Les ménages HV impactés par la ZFE représentent 0,9% de la population de l'aire grenobloise. Ils sont donc peu nombreux mais, proportionnellement, ces ménages HV sont légèrement plus touchés par la ZFE que les non-HV (9,6% des HV *versus* 7,9% des non-HV ; tableau 5, figures 7 et 8). Ceci est encore plus marqué au niveau des déplacements : 17% des déplacements HV sont affectés par la ZFE, contre 8,9% des déplacements non HV. Cela peut s'expliquer par une concentration relative des HV dans la métropole (tableau 4) et plus généralement les ménages HV concernés par la ZFE ont plus de déplacements à l'intérieur de son périmètre. En effet, les déplacements en voiture dans le périmètre représentent 20,8 % des déplacements en voiture effectués par les ménages impactés; cette proportion s'élève à 48,3 % pour les ménages HV³ (Figure 8).

³ Nombre de déplacements en voiture dans le périmètre divisé par le nombre total de déplacements en voiture effectués par les mêmes ménages dans la zone globale, hors restrictions liées aux vignettes Crit'Air.

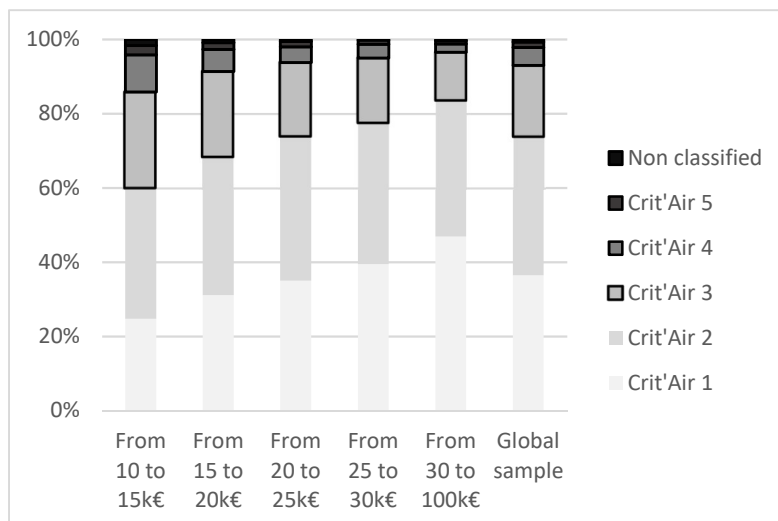


Figure 6 : Vignette Crit'Air de la voiture la plus efficace des ménages en fonction du revenu par unité de consommation

Tableau 5 : Impacts globaux de la ZFE selon le scénario

| | Impactés par la ZFE | Non impactés par la ZFE | Total |
|---|---------------------|-------------------------|---------------------|
| Non HV | 25 516 (7.1%) | 299 162 (85.8%) | 324 678 (90.4%) |
| HV | 3 338 (0.9%) | 31 411 (8.7%) | 34 749 (9.6%) |
| Total | 28 854 (8.0%) | 330 573 (92.0%) | 359 427 (100.0%) |
| Note : Les pourcentages sont par rapport à l'échantillon global | | | |

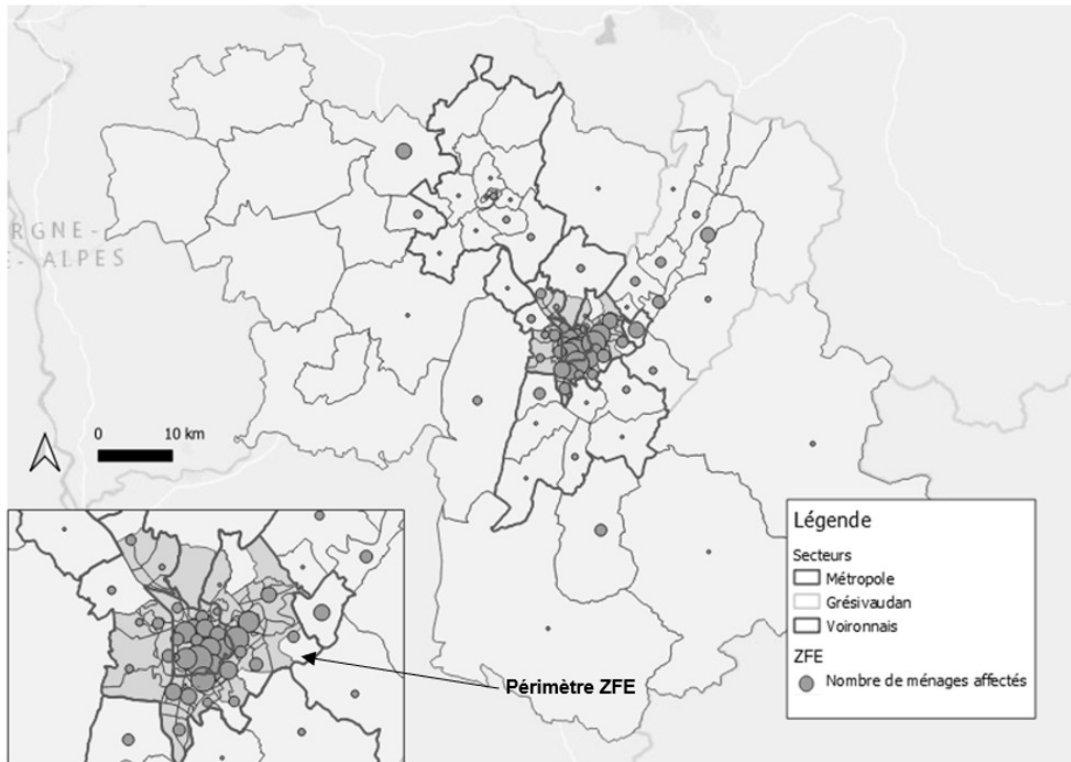


Figure 7 : Localisation résidentielle des ménages impactés

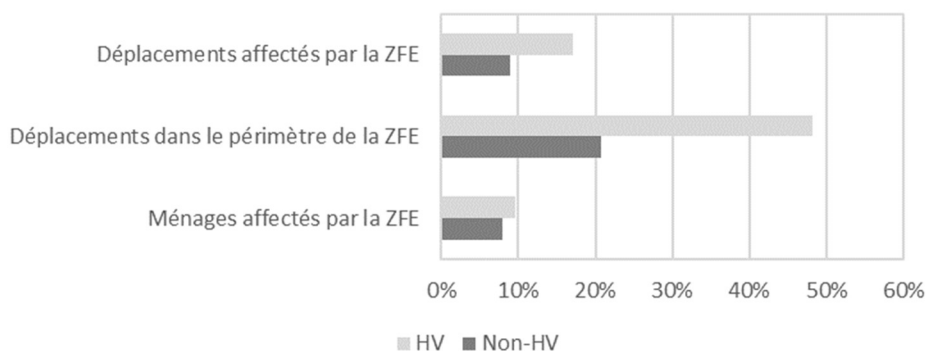


Figure 8 : Différenciation des impacts de la ZFE sur les ménages et leurs déplacements (HV *versus* non-HV)

4.4.2. Quelle capacité d'adaptation à la ZFE ?

Nous décrivons ici les capacités d'adaptation à la ZFE des ménages notamment par profil. Plus de résultats sont décrits dans Blandin et al. (2025).

a- Analyse des solutions d'adaptation

Première solution envisagée, le report modal est possible pour 57% des ménages affectés par la ZFE. Cependant, les ménages non HV bénéficient davantage de cette option que les ménages HV, puisque 59% des ménages HV affectés restent sans solution de report modal, contre seulement 43% des ménages non HV affectés (Figure 9). Globalement, 0,5% de la population est HV, touchée par la ZFE et sans solution de report modal (Figure 10).

Deuxièmement, après avoir pris en compte la possibilité d'un changement de destination pour les déplacements non contraints, 45,8% des ménages HV touchés restent sans solution, contre 28,1 % seulement pour les ménages non HV touchés. L'écart se creuse donc entre les deux catégories de population. Globalement, 0,4% de la population est HV, touchée par la ZFE et sans solution de report modal et avec une destination contrainte (Figure 10).

Troisièmement, parmi les ménages qui restent sans solution de report modal et avec des déplacements contraints, certains sont également des ménages à faible accessibilité financière (5,6 % des ménages touchés par la ZFE ; 0,4 % de l'ensemble des ménages HV), ce qui réduit encore leur capacité d'adaptation avec des solutions alternatives telles que l'achat d'une voiture compatible avec la ZFE (voir plus bas). Ils représentent 1 530 ménages qui auraient besoin de politiques de soutien. Parmi eux, certains souffrent d'une combinaison de vulnérabilité financière et d'autres vulnérabilités : 0,1 % de la population est HV, avec une faible accessibilité financière et n'a pas de solution pour le report modal ou le changement de destination.

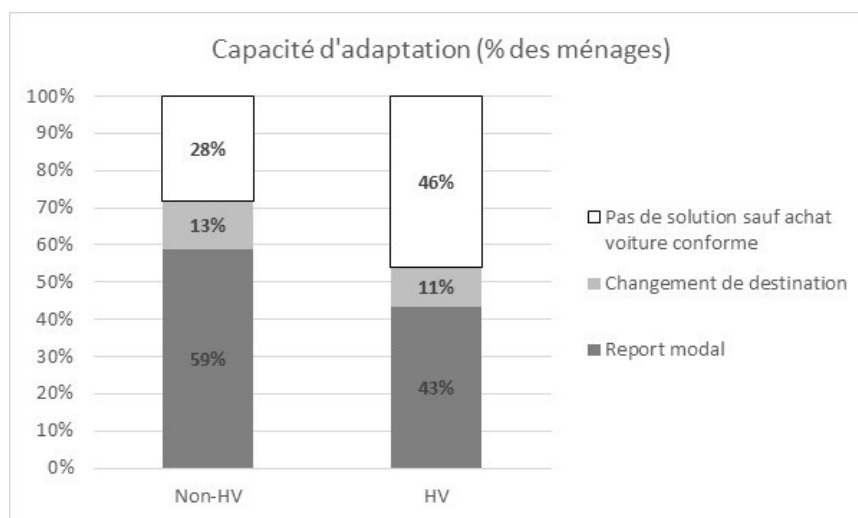


Figure 9 : Capacités d'adaptation des ménages non-HV et HV à la ZFE

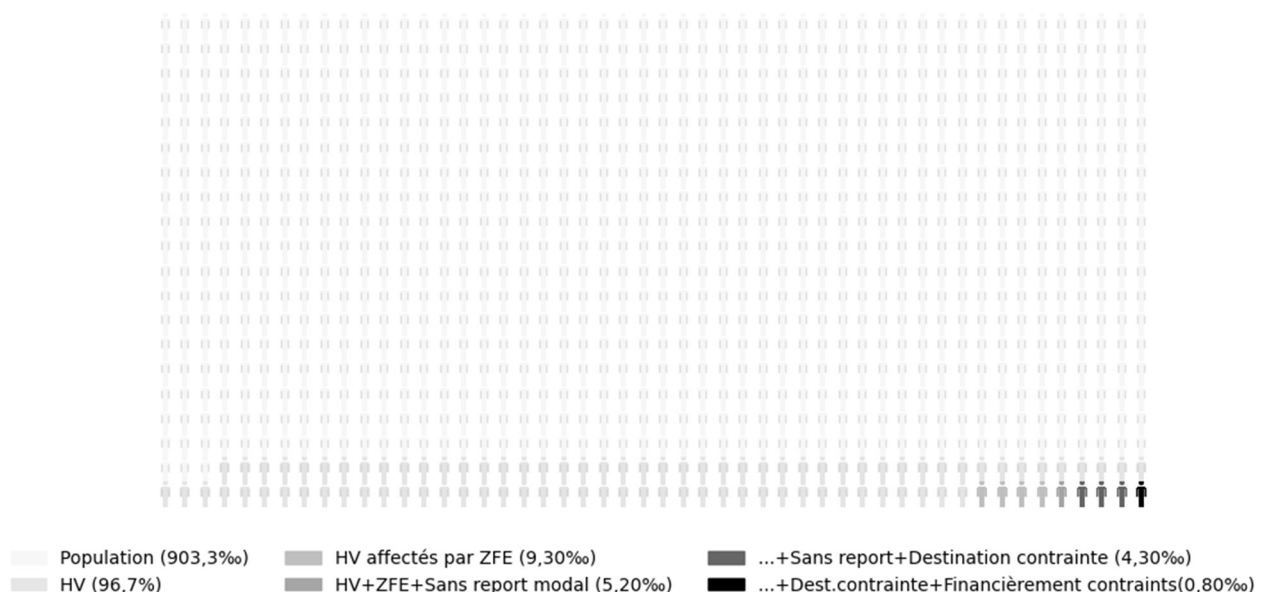


Figure 10. Représentation de la population cumulant successivement le statut HV, le fait d'être affecté par la ZFE et l'absence de capacité individuelle d'adaptation (sans report modal, destination contrainte et financièrement contraint).

b- Analyse par profil HV – analyse au niveau des ménages

La ZFE a des impacts différenciés selon les profils HV (Figure 11). Tout d'abord, la part des ménages sans solution de report modal varie de manière significative entre 29,9 % (profil "utilisateurs structurels de la voiture") et 83,1 % (profil "sans alternative") des ménages affectés, alors qu'elle représente 43,0 % des ménages de l'échantillon global. Cependant, le profil "sans alternative" a moins de déplacements contraints que les autres ménages et, après avoir envisagé la possibilité de changer de destination, seuls 26,6 % d'entre eux demeurent sans solution (pas de report modal et déplacement contraint), ce qui est moins que la population générale. À l'autre extrémité de l'échelle, 78,5 % des ménages avec "utilisation intense et coûteuse de la voiture" restent sans solution.

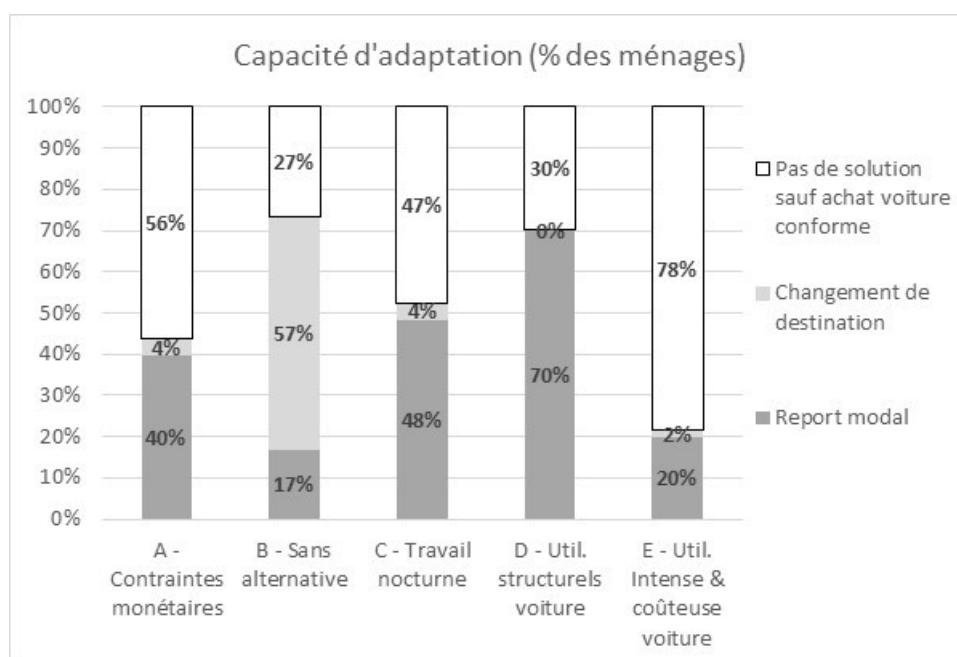


Figure 11 : Capacités d'adaptation à la ZFE des ménages HV selon les profils

c- Analyse du report modal, y compris par profil HV – analyse au niveau des déplacements en voiture

La Figure 12 propose une analyse par profil de vulnérabilité au niveau des déplacements, ce qui permet d'examiner les alternatives possibles à la voiture pour chaque déplacement.

Le vélo conventionnel et les transports publics sont deux alternatives qui permettraient de reporter, à eux deux, près d'un tiers des déplacements affectés par la ZFE. Les vélos électriques seraient utilisés pour près d'un autre tiers des déplacements (28,6 %), tandis que la marche à pied reste marginale en termes de report modal potentiel (3,2 %). Le potentiel global de report modal est plus faible pour les déplacements effectués par les ménages HV, en raison d'une plus faible capacité de report vers la marche et les transports publics. En revanche, le report modal vers le vélo (conventionnel ou électrique) est très similaire, que le ménage soit HV ou non.

Ces possibilités de report modal restent contrastées en fonction des différents profils des ménages HV. En particulier, les vélos classiques permettraient de reporter près de 25% des déplacements des ménages "à contrainte monétaire", et les vélos électriques apparaissent

comme une solution intéressante pour les ménages "utilisateurs structurels de la voiture". Au contraire, les ménages "sans alternative" et avec "utilisation intense et coûteuse de la voiture" n'ont pas la possibilité de reporter leurs déplacements sur des vélos conventionnels et un faible accès au vélo électrique (respectivement 10,4% et 5,7%) en raison de leur localisation résidentielle. 77,8 % et 85,1 % des déplacements concernés pour ces deux profils restent sans solution de report modal. La spécificité du profil "utilisation intense et coûteuse de la voiture" réside également dans le fait que 77,1 % des déplacements concernés ont une destination contrainte. Bien que ce profil ne concerne que 1,7% de la population, il faut noter que ces déplacements seraient particulièrement affectés par la ZFE, ce qui est cohérent avec le fait que les ménages de ce profil vivent principalement dans la Métropole, le Voironnais et le Grésivaudan (Tableau 4).

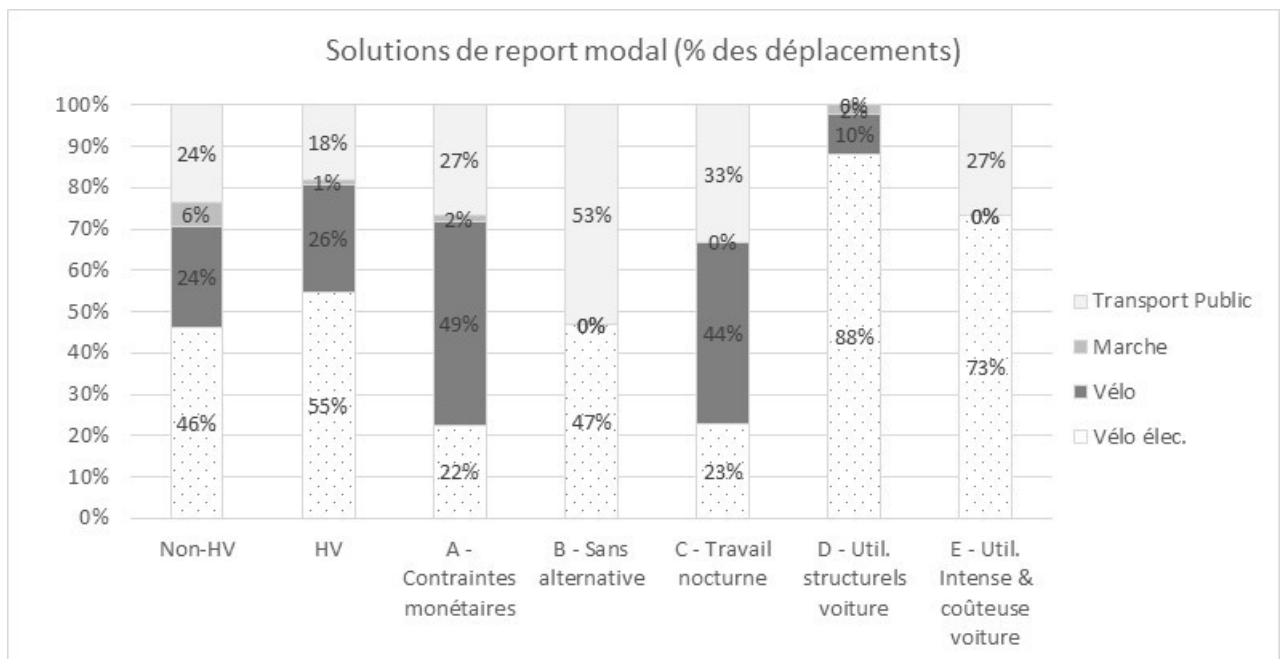


Figure 12 : Solutions de reports modaux pour les ménages non-HV et HV, et selon les profils de ménages HV

d- Achat d'une voiture

La dernière solution est l'achat d'un véhicule conforme à la ZFE. Les véhicules neufs restent très onéreux malgré les subventions existantes pour les voitures neuves (Mattioli, 2017), les véhicules électriques neufs coûtent 45 à 50% plus cher que les véhicules conventionnels et il est difficile de trouver des voitures d'occasion conformes à la ZFE à un prix abordable (De Vrij et Vanoutrive, 2022).

Nous évaluons le potentiel d'achat d'une voiture pour les ménages HV sans solution de report modal et avec des déplacements contraints, en considérant que les ménages dont le revenu est inférieur au revenu médian ne peuvent pas se permettre d'acheter une voiture compatible avec la ZFE. 51 % des 1 530 ménages HV (2% du nombre total de ménages HV ; 0,1% de la population totale) restent alors sans aucune solution, y compris l'achat d'une voiture. La situation est particulièrement compliquée pour les ménages sous le seuil de pauvreté ou à faible accessibilité financière (Figure 13).

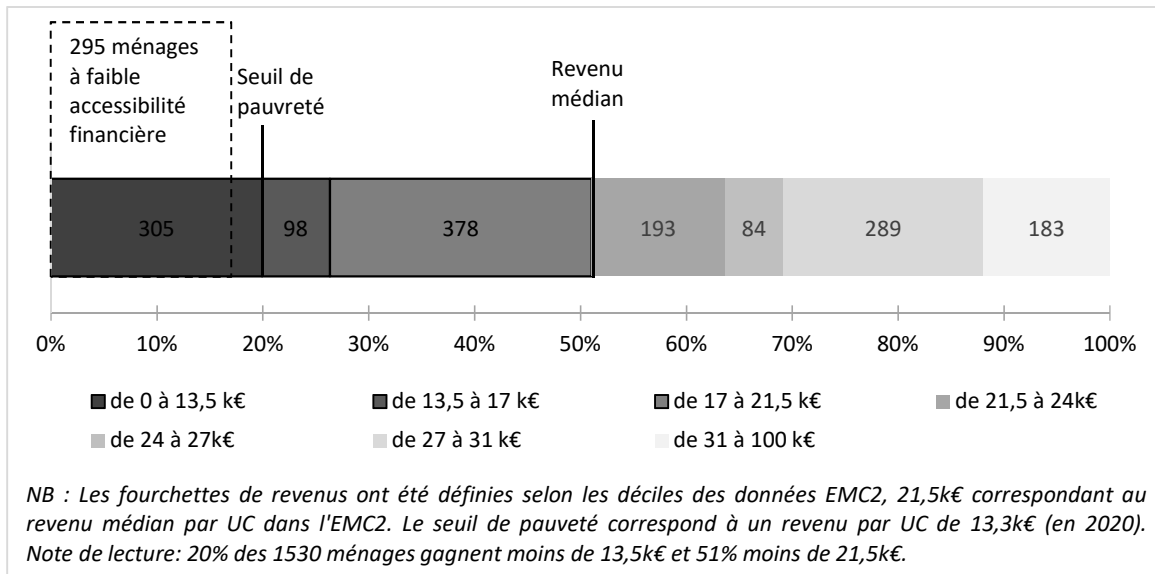


Figure 13 : Répartition des 1 530 ménages HV sans solution de report modal et avec destination contrainte selon leur revenu

-6-

Discussion et conclusion

Notre méthodologie, basée sur l'indicateur VulMob, permet tout d'abord d'identifier les ménages en situation de vulnérabilité en terme de mobilité ainsi qu'une typologie de profils de cumul de ces vulnérabilités qui peut donner lieu à une analyse spatiale. VulMob permet également d'évaluer les impacts de la ZFE de Grenoble sur la vulnérabilité et la faible accessibilité financière des ménages en matière de transports.

Nos résultats montrent dans le cas de la ZFE de Grenoble que les ménages HV sont surreprésentés parmi les ménages affectés par la ZFE et qu'ils disposent de moins de solutions d'adaptation.

Notre approche identifie précisément les ménages HV impactés. Cela permet de définir des recommandations en fonction des profils des ménages et de leur localisation résidentielle. Parmi les cinq profils de ménages HV, trois peuvent rencontrer des difficultés importantes à s'adapter à la ZFE : les ménages avec contraintes monétaires, les ménages vivant loin des services et n'ayant pas accès aux transports publics, les ménages ayant un usage intensif de la voiture et des coûts de mobilité élevés. Nos résultats permettent ainsi de réfléchir à des solutions spécifiques à apporter à chacun de ces profils de ménages.

Malgré la grande diversité de ces profils, le report modal apparaît comme une solution d'adaptation à fort potentiel. L'approche adoptée par l'agglomération grenobloise, qui fournit des conseils personnalisés sur les solutions de report modal dans le cadre de l'adaptation à la ZFE, va dans ce sens. Néanmoins, les actions à mener pour encourager le report modal sont nombreuses : renforcer la sécurité, développer les infrastructures pour les transports publics et les modes actifs, soutenir financièrement l'achat de vélos notamment électriques, par exemple comme cela est déjà fait en France avec une prime de 1 500 euros pour l'achat d'un vélo électrique lors de la mise à la casse d'une voiture. La littérature récente montre également que la mobilité active peut être considérée comme un comportement de santé (Bouscasse et al., 2022). L'argument santé peut constituer un levier que les pouvoirs publics ou les acteurs du

territoire peuvent mettre en avant pour favoriser l'adoption de la marche et du vélo au travers de motivations autodéterminées, propres à la personne (Rejeb et al., 2023b).

L'un des enseignements principaux est que la ZFE a un impact fort, sans réelle solution, pour une partie de la population. Mais la frange de la population concernée représente un très faible nombre de ménages (2% des ménages hautement vulnérables restent sans aucune solution, soit 0,08% de la population totale), ce qui donne l'opportunité aux décideurs publics de cibler ces ménages et de leur apporter le soutien financier nécessaire. Par l'identification précise de ces ménages, VulMob permet de concentrer l'aide publique plutôt que de la diffuser comme cela peut être le cas en subventionnant le prix de l'essence à la pompe (exemple de la remise carburant mise en place en avril 2022 par la France). Le budget en résultant serait bien moindre et plus efficace en termes incitatifs. La Cour des comptes (2024) s'est prononcée dans ce sens en notant que des subventions ciblées pour ceux les moins à mêmes de supporter l'augmentation des prix de l'énergie aurait permis de maintenir une incitation à réduire la consommation au travers du signal prix.

L'approche développée présente toutefois certaines limites.

D'autres hypothèses de distance ou de temps supplémentaire pour les alternatives à la voiture, pour définir le potentiel de report modal, pourraient être envisagées, en fonction des motifs de déplacement.

Les calculs de reports modaux auraient pu être conduits plus finement. Ainsi, il n'a pas été tenu compte de l'âge des personnes, des handicaps (ce qui diminuerait le potentiel de report modal), ni des possibilités de multimodalité ou de covoiturage (ce qui augmenterait le potentiel de report modal). Cependant les hypothèses de report vers les modes actifs sont peu exigeantes (en termes de distance notamment), de sorte que le report doit pouvoir être pratiqué par une large partie de la population.

Nous aurions aussi pu nous appuyer sur un modèle de transport multimodal tel que celui développé sur l'agglomération grenobloise pour modéliser le report modal. Dans ces modèles le mode de transport est choisi au travers d'un modèle de choix discret dans lequel le coût généralisé (sommant le coût financier et temporel du déplacement) joue un rôle prépondérant. Seules des modifications des infrastructures (augmentation de l'offre TC, diminution de l'accessibilité voiture par une ZFE...) ou des conditions financières de la mobilité peuvent donc conduire à augmenter la part des modes alternatifs à la voiture. Ils ne tiennent en particulier pas compte de changements structurels de comportements ou de préférences qui porteraient les agents à accepter ou même désirer faire du vélo ou marcher sur de plus longues distances qu'actuellement, du fait de la prise en compte de bénéfices environnementaux ou sanitaires (augmentation de l'activité physique). Notre objectif est bien de calculer un "potentiel" de report modal, ce qui pourrait théoriquement être fait et non pas ce qui sera effectivement réalisé en optimisant temps et coût, comme cela est le cas dans les modèles de transport multimodaux.

Enfin, l'enchaînement particulier de solutions d'adaptation retenu considère le report modal comme la solution à privilégier et l'achat d'une nouvelle voiture comme la dernière solution. Ce choix, qui peut être discuté, s'appuie sur l'idée de maximiser l'ensemble des co-bénéfices de la ZFE rendus possibles par un report modal maximal (bénéfices environnementaux, sanitaires et en termes de bien-être).

Ce travail montre qu'il est possible d'évaluer ex ante les impacts d'une ZFE sur les vulnérabilités de mobilité et la pauvreté, en utilisant une approche rigoureuse basée sur l'indicateur multidimensionnel VulMob. Une telle approche devrait se généraliser pour éclairer les politiques publiques sur les questions de mobilité. Nous avons réalisé une évaluation de la ZFE telle qu'envisagée dans la loi Climat et résilience mais d'autres conceptions de ZFE ou types de politiques visant à restreindre la circulation automobile pourraient être étudiés.

Les résultats obtenus dans la région grenobloise ne peuvent pas être généralisés aux autres agglomérations françaises, les dimensions sociodémographiques, les contraintes foncières, les infrastructures et l'aménagement du territoire étant spécifiques à chaque territoire. D'autres contextes urbains devraient ainsi être étudiés.

Remerciements

Ce travail a été soutenu par l'Agence Nationale de la Recherche dans le cadre des Investissements d'avenir (ANR-15-IDEX-02) à travers les projets CDP-IDEX-UGA MOBILAIR et CDTTool-IDEX-UGA ACME.

Bibliographie

Adger, WN (2006) Vulnerability. *Global Environmental Change, Resilience, Vulnerability, and Adaptation: A Cross-Cutting Theme of the International Human Dimensions Programme on Global Environmental Change* 16, 268–281.

Aldred R, Goodman A (2020) Low Traffic Neighbourhoods, Car Use, and Active Travel: Evidence from the People and Places Survey of Outer London Active Travel Interventions. *Findings*.

Alonso-Epelde E, García-Muros X, González-Eguino M (2023) Transport poverty indicators: A new framework based on the household budget survey. *Energy Policy* 181, 113692.

Berry A, Jouffe Y, Coulombel N, Guivarch C, (2016) Investigating fuel poverty in the transport sector: Toward a composite indicator of vulnerability. *Energy Research & Social Science, Energy demand for mobility and domestic life: new insights from energy justice* 18, 7–20.

Blandin, L., Bouscasse, H., & Mathy, S. (2024). Vulmob, a new multidimensional indicator of mobility vulnerability. *Energy Economics*, 136, 107730.

Blandin, L., Bouscasse, H., & Mathy, S. (2025). Assessing the ex-ante impacts of a low-emission zone on transport poverty and vulnerability with the VulMob indicator. *Case Studies on Transport Policy*, 19, 101308.

Bouscasse H, Gabet S, Kerneis G, Provent A, Rieux C, Ben Salem N, Troude F, Mathy S, Slama R (2022) Designing local air pollution policies focusing on mobility and heating to avoid a targeted number of pollution-related deaths: forward and backward approaches combining air pollution modeling, health impact assessment, and cost-benefit analysis. *Environment International*, 159, 107030.

CEREMA (2020) Enquête mobilité certifiée Cerema - aire grenobloise.

Charleux L (2014) Contingencies of environmental justice: the case of individual mobility and Grenoble's Low-Emission Zone. *Urban Geography* 35, 197–218.

Clean Cities Campaign and Transport & Environment (2022) The development trends of low and zero-emission zones in Europe. Tech.rep. URL: <https://cleancitiescampaign.org/wp-content/uploads/2022/07/The-development-trends-of-low-emission-and-zero-emission-zones-in-Europe-1.pdf>

Cour des Comptes (2024). Les mesures exceptionnelles de lutte contre la hausse des prix de l'énergie. Rapport Public Thématique.

De Vrij E, Vanoutrive, T (2022) 'No-one visits me anymore': Low Emission Zones and social exclusion via sustainable transport policy. *Journal of Environmental Policy & Planning* 24, 640–652.

Dodson J, Sipe N (2007) Oil Vulnerability in the Australian City: Assessing Socioeconomic Risks from Higher Urban Fuel Prices. *Urban Studies* 44, 37–62.

Fageda X, Flores-Fillol R, Theilen B (2020) Price versus quantity measures to deal with pollution and congestion in urban areas: A political economy approach, Vol. 7.

Gonzalez, JN, Perez-Doval J, Gomez J, Vassallo JM (2021) What impact do private vehicle restrictions in urban areas have on car ownership? Empirical evidence from the city of Madrid. *Cities* 116, 103301.

Jia N, Zhang Y, He Z, Li G (2017) Commuters' acceptance of and behavior reactions to license plate restriction policy: A case study of Tianjin, China. *Transp. Res. Part D Transp. Environ.* 52, 428–440.

Lindsey R, Tikoudis I, Hassett K (2023) Distributional effects of urban transport policies to discourage car use: A literature review. OECD report.

Lowans C, Furszyfer Del Rio D, Sovacool BK, Rooney D, Foley AM (2021) What is the state of the art in energy and transport poverty metrics? A critical and comprehensive review. *Energy Economics* 101, 105360.

Lucas K, Mattioli G, Verlinghieri E, Guzman A (2016) Transport poverty and its adverse social consequences. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Transport* 169, 353–365.

Mattioli G (2014) Where Sustainable Transport and Social Exclusion Meet: Households Without Cars and Car Dependence in Great Britain. *Journal of Environmental Policy & Planning* 16, 379–400.

Mattioli G (2017) "Forced car ownership" in the UK and Germany: socio-spatial patterns and potential economic stress impacts. *Social Inclusion* 5, 147–160.

Parkhurst J (2017) *The Politics of Evidence: From evidence -based policy to the good governance of evidence.* Taylor & Francis.

Raux C, Souche S (2004) The Acceptability of Urban Road Pricing A Theoretical Analysis Applied to Experience in Lyon. *J. Transp. Econ. Policy*, 38, 191–215.

Rejeb R, Bouscasse H, Chalabaev A, Mathy S (2023b) What is the role of active mobility habits in the relationship between self-determination and modal shift intentions? A mediation analysis. *Transportation research part F: traffic psychology and behaviour*, 99, 289-305.

Sustrans (2012) *Locked Out, Transport Poverty in England*. Bristol.

Tabarot, P (2023) Rapport d'information fait au nom de la commission de l'aménagement du territoire et du développement durable relatif aux zones à faibles émissions mobilité (ZFE-m), enregistré à la Présidence du Sénat le 14 juin 2023.

Tarriño-Ortiz J, Gómez J, Soria-Lara J.A, Vassallo JM (2022) Analyzing the impact of Low Emission Zones on modal shift. *Sustainable Cities and Society*, 77, 103562.

Van Dülmen C, Šimon M, Klärner A (2022) Transport poverty meets car dependency: A GPS tracking study of socially disadvantaged groups in European rural peripheries. *Journal of Transport Geography* 101, 103351.

Verbeek T, Hincks S (2022) The 'just' management of urban air pollution? A geospatial analysis of low emission zones in Brussels and London. *Applied Geography*, 140, 102642.

Ward JH (1963) Hierarchical Grouping to Optimize an Objective Function. *Journal of the American Statistical Association* 58, 236–244.