MINISTÈRE
DE LA TRANSITION
ÉCOLOGIQUE
Liberté
Égalité
Fraternité

DOCUMENT DE TRAVAIL

Effets distributifs d'un péage urbain

Cadre théorique et application à l'Île-de-France

Mars 2022

Résumé

Le développement de l'usage de la voiture dans les grandes agglomérations induit d'importants effets négatifs en matière de congestion, de pollution locale, de bruit, de gaz à effet de serre, effets dont la maîtrise et la réduction constituent un défi majeur pour les politiques publiques. Un des leviers d'action possible est la mise en place d'un péage urbain, déjà adopté dans plusieurs grandes métropoles européennes, mais dont les effets sociaux supposés peuvent constituer un frein à son adoption. Cette étude propose un cadre d'analyse pour apprécier ces impacts distributifs, appliqué ensuite à l'agglomération parisienne et l'Île-de-France pour quatre scénarios, en fonction du type de péage et du tarif.

Un modèle de choix modal (véhicule particulier/transports en commun) est spécifié et estimé économétriquement sur la base des données de l'enquête globale transport de 2010. Ce choix modal dépend en particulier du temps associé au déplacement et du coût de ce déplacement. Ces deux facteurs varient ensuite selon le scénario de péage envisagé. En outre, nous montrons que la sensibilité (élasticité) du choix modal à ces deux facteurs dépend du revenu du ménage et du comportement en termes de mobilité : les individus aux revenus modestes utilisant beaucoup leur voiture seront quatre fois plus sensibles à une hausse des coûts de leur déplacement.

La variation de surplus des automobilistes induite par le péage, calculée sur la base des paramètres estimés, est en moyenne négative, avec un faible pourcentage d'automobilistes « gagnants ». Rapportée aux revenus, la perte de surplus est plus importante dans les 1ers quartiles de revenus que dans les quartiles supérieurs et l'effet est donc clairement régressif. Les modalités d'atténuation de ces effets régressifs, notamment à travers l'utilisation qui peut être faite des recettes générées par le péage, sont donc un enjeu central à examiner pour favoriser l'acceptabilité d'un tel dispositif. Pour un bilan socio-économique complet, l'analyse devrait également être complétée pour inclure les externalités environnementales (pollution locale, GES, bruit…).

Remerciements

Ce travail est issu du stage de M. Sylvain Daou réalisé de mars à août 2020 au CGDD. Ce stage a été co-encadré par Zéhir Kolli (CGDD) et Benoît Schmutz (École Polytechnique).

Nous remercions l'ensemble des experts qui ont contribué à l'étude et en particulier : Mathilde Clément (CGDD), Sophie Peng-Casavecchia (DGITM), Stéphane Taszka (CGDD), Kiarash Motamedi (CGDD), Maude Jolly (CGDD), Benoît Boucaud (CGDD). Les auteurs remercient Tomas Hidalgo, Vincent Marcus et Claude Baudu-Baret (CGDD) pour leur relecture attentive et leurs commentaires.

Auteurs

Sylvain Daou – stagiaire au CGDD (lors de la réalisation de cette étude)

Zéhir Kolli – chargé d'études économiques (SEVS)

Les jugements et opinions exprimés dans ce document n'engagent que les auteurs, et non les institutions auxquelles ils appartiennent, ni a fortiori le ministère de la Transition écologique.

SOMMAIRE

SOMMAIRE **3**

INTRODUCTION **4**

I. CONTEXTE 4
II. TYPOLOGIE DES PÉAGES URBAINS 4
III. SUJET DE L'ÉTUDE 5

01 MODÈLE ET DONNÉES **7**

I. MODÈLE THÉORIQUE DE CHOIX MODAL 8
II. MODÈLE ÉCONOMÉTRIQUE 8
III. DONNÉES ET HYPOTHÈSES 9

02 CALCUL DE LA SENSIBILITÉ DES INDIVIDUS AU PRIX ET AU TEMPS DES TRANSPORTS **13**

I. REGROUPEMENT DES MÉNAGES EN « CLUSTERS » 14
II. ESTIMATION ÉCONOMÉTRIQUE DU CHOIX MODAL 20

01) Calculs préliminaires *20*
02) Résultats du choix modal en l'absence de péage *21*
03) Estimation du choix modal en présence du péage *24*
04) Prise en compte de l'impact du péage sur le trafic et effet rebond *25*

03 VARIATION DE SURPLUS, ÉQUITÉ ET EFFETS DISTRIBUTIFS **27**

I. VARIATION MOYENNE DES SURPLUS INDIVIDUELS 28
II. ÉQUITÉ ET EFFETS DISTRIBUTIFS 29

CONCLUSION **33**

BIBLIOGRAPHIE **35**

ANNEXE **36**

INTRODUCTION

I. Contexte

Les pouvoirs publics, collectivités et métropoles nationales, se heurtent aujourd'hui à de nombreux problèmes liés à l'usage de la voiture : des enjeux d'accessibilité avec la hausse des trafics, des externalités telles que la pollution locale, les nuisances sonores et les émissions de gaz à effet de serre, l'entretien et la rentabilité des infrastructures…

Une des solutions à la portée des élus à la recherche de solutions durables à ces questions liées à la mobilité automobile consiste en la mise en place d'un péage urbain. Plusieurs grandes métropoles européennes (Rome, Milan, Londres, Stockholm, Oslo, etc.) ont déjà fait ce choix. En France, l'article 65 de la loi dite Grenelle 2, votée en 2010, a ouvert la voie à l'expérimentation des péages urbains dans les villes de plus de 300 000 habitants, mais les agglomérations françaises peinent à sauter le pas.

L'argument de l'inéquité sociale du péage urbain contribue fortement à son impopularité auprès de l'usager contributeur. Ainsi, le péage urbain concentrerait les pertes (coûts, temps) sur les usagers ayant de bas revenus. En effet, pour les automobilistes concernés, un péage suscite un gain sous la forme d'un temps de trajet réduit du fait de la réduction de la congestion, en contrepartie d'une perte financière égale au tarif du péage. Les individus à faibles revenus, valorisant moins le temps gagné et davantage la perte financière, ont ainsi beaucoup plus de chances de perdre que les individus à hauts revenus.

II. Typologie des péages urbains

Un péage urbain peut être classé dans l'une des trois catégories suivantes en fonction de sa couverture spatiale :

- d'infrastructure ;
- péage de zone ;
- péage péage de cordon.

Le premier, appliqué à une infrastructure déterminée (axe autoroutier, pont, etc.), offre en contrepartie aux automobilistes la possibilité de circuler sur une voirie plus fluide. Quant aux péages de zone et de cordon, ils portent sur l'ensemble d'une aire délimitée par des points d'entrée/sortie : le péage de zone est acquitté par tous les véhicules qui circulent ou qui sont présents dans la zone concernée, alors que le péage de cordon est acquitté lors de l'entrée dans la zone.

III. Sujet de l'étude

Cette étude vise à apporter des pistes de réflexion sur la question de la tarification de l'usage urbain de la voiture au travers de la mise en place d'un péage urbain.

Le péage envisagé possède les caractéristiques suivantes :

- **périmètre :** péage autour de Paris intramuros, couvrant 105 km^2, ce péage serait comparable au célèbre péage de Singapour, plus grand péage urbain actuel en termes de couverture spatiale avec 100 km^2 ;
- **types de péages testés :** péage de cordon et péage de zone ;
- **tarification :** tarification journalière (même principe que le péage londonien). Les tarifs de 5 euros et 2.5 euros sont retenus, 5 euros étant le plafond maximal de tarif initialement prévu pour les grandes agglomérations de plus de 500 000 habitants dans la loi d'orientation des mobilités (2019) ;
- **objectif principal :** réduire la congestion routière ;
- **jours de fonctionnement :** jours ouvrés ;
- **plages horaires de fonctionnement :** en continu.

La *partie 1* présente d'abord le modèle théorique et économétrique qui sera mobilisé.

Dans la *partie 2*, il s'agira de proposer des regroupements de ménages « clusters » sur la base de leur usage quotidien de l'infrastructure (kilométrage), mais également sur la base du poids budgétaire des transports dans le revenu du ménage. Ce regroupement se fera par une méthode de minimisation de l'homogénéité intra-clusters et maximisation inter-clusters, appliquée aux caractéristiques de mobilité des ménages.

Il s'agira ensuite d'estimer l'utilité marginale du revenu ainsi que la valeur du temps des individus en fonction de la classe de ménage à laquelle ils appartiennent. Cette estimation se fera économétriquement, sur la base d'un modèle théorique de variation des surplus individuels, avec l'enquête globale transports 2010.

Dans la *partie 3*, il s'agira enfin d'évaluer les indicateurs suivants :

- le degré d'acceptabilité vis à vis de la mise en place du péage : il s'agit de la moyenne de la variation de surplus des automobilistes induite par le péage ;
- l'effet distributif entre classes de revenu (redistribution verticale) : il s'agit de la relation entre la variation de surplus et le revenu.

Partie 1

Modèle et données

Cette partie est consacrée à la construction d'un modèle théorique simplifié permettant de simuler le choix modal des individus. Ce dernier servira de support pour estimer le choix de mode des individus lors des phases de simulation de mise en œuvre des différents scenarios de péages.

I. Modèle théorique de choix modal

Dans ce modèle, pour se déplacer, l'individu i a le choix entre trois options : prendre sa voiture (VP) et traverser le péage, prendre sa voiture (VP) et contourner Paris si son origine et sa destination sont hors de Paris, ou utiliser les transports en commun (TC).

Il choisit alors la solution qui minimise sa désutilité Ω. Celle-ci comporte deux composantes : le temps perdu lors du déplacement et le coût monétaire du déplacement (coût des titres de transport en commun, coût de la voiture, tarif du péage).

Ainsi :

$$\Omega_{VP}^{i}(\alpha) = min \begin{pmatrix} \lambda \cdot T_{VP}^{i}(\alpha) + C_{VP}^{i} + \alpha \cdot p & \text{l'automobiliste traverse alors le péage} \\ \lambda \cdot T_{VP}^{i}(\alpha) \cdot (1 + \alpha \cdot \mu) + C_{VP}^{i} & \text{l'automobiliste contourne Paris} \end{pmatrix}$$

$$\Omega_{TC}^{i} = \lambda \cdot T_{TC}^{i} + C_{TC}^{i}$$

Avec λ la valeur unitaire du temps, α une variable binaire indiquant la présence ou non d'un péage, p le tarif dudit péage s'il existe, et μ l'allongement du trajet si l'automobiliste contourne Paris plutôt que de la traverser.

Ainsi, l'individu se déplace en automobile si : $\Omega TCi - \Omega VPi(\alpha) \geq 0$

Autrement dit, l'individu i, choisira l'automobile plutôt que les transports en commun si le temps gagné en utilisant la voiture fournit un bénéfice supérieur au surcoût de l'usage de celle-ci.

Finalement, la variation de surplus des automobilistes est égale à :

$$\begin{cases} \Omega_{VP}^{i}(0) - \Omega_{VP}^{i}(1) & \text{si l'individu continue à se déplacer en VP} \\ \Omega_{VP}^{i}(0) - \Omega_{TC}^{i} & \text{si l'individu opte pour les TC} \end{cases}$$

La variation de surplus des usagers des TC qui continuent à privilégier les TC est nulle.

II. Modèle économétrique

Nous commençons par estimer économétriquement la fonction d'utilité relative au choix modal des individus. La description faite ici est une description simplifiée puisqu'elle ne tient pas compte de l'hétérogénéité de la valeur du temps et de l'utilité marginale du revenu entre les différentes classes de ménages qui seront définies et implémentées sous la forme de variables d'interaction dans la *partie 2, paragraphe I - regroupement des ménages en « clusters »*.

L'utilité (désutilité) relative du choix modal d'un individu i peut s'écrire sous la forme :

$$\Delta\Gamma^i(\alpha) = \Gamma^i_{TC} - \Gamma^i_{VP}(\alpha) = \beta_0 + \beta_1 DeltaC^i + \beta_2 DeltaT^i(\alpha) + \beta_3 \cdot X^i + \tau$$

$$DeltaC^i = C^i_{TC} - C^i_{VP}, \quad DeltaT^i(\alpha) = T^i_{TC} - T^i_{VP}(\alpha)$$

Et βi les paramètres à estimer économétriquement, et Xi un vecteur de variables de contrôle (détaillé ensuite au *paragraphe III - Données et hypothèses*).

Nous utilisons pour ce faire l'enquête globale transport de 2010 (EGT2010)[1] qui décrit les choix individuels entre automobile et transport collectif dans un contexte sans péage ($\alpha=0$).

Ainsi, en utilisant une régression logistique, il est possible d'estimer les paramètres βi et d'en déduire une estimation de la valeur unitaire du temps $\lambda=\beta 2/\beta 1$ et de l'utilité marginale du revenu $\beta 1$.

On peut finalement en faire découler une estimation de la variation du surplus individuel pour un automobiliste. Ce dernier, en présence du péage, a deux principales options qui s'offrent à lui : décider de continuer à utiliser son VP ou choisir de recourir aux TC :

$$\begin{cases} \Omega^i_{VP}(0) - \Omega^i_{VP}(1) = \frac{1}{\beta_1} \cdot [\Gamma^i_{VP}(0) - \Gamma^i_{VP}(1)] = \frac{1}{\beta_1} \cdot [\Delta\Gamma^i(1) - \Delta\Gamma^i(0)] \text{ si l'individu continue en VP} \\ \Omega^i_{VP}(0) - \Omega^i_{TC} = \frac{1}{\beta_1} \cdot [\Gamma^i_{VP}(0) - \Gamma^i_{TC}] = -\frac{1}{\beta_1} \cdot [\Delta\Gamma^i(0)] \text{ si l'individu opte pour les TC} \end{cases}$$

La variation de surplus des utilisateurs des TC est nulle.

L'utilité marginale du revenu $\beta 1$ permet de transformer l'utilité en unités monétaires permettant les comparaisons interindividuelles.

III. Données et hypothèses

Les données utilisées sont celles de l'enquête globale transport de 2010 (EGT 2010[1]). Cette enquête a été pilotée par l'Île-de-France mobilités (STIF) et la Direction régionale de l'Équipement d'Île-de-France (DREIF), désormais Direction régionale et interdépartementale de l'environnement, de l'aménagement et des transports (DRIEAT), et elle permet d'analyser les pratiques des Franciliens en matière de mobilité.

L'échantillon enquêté est représentatif de la population francilienne, tant par les caractéristiques sociales que géographiques. Ce sont 18 000 ménages franciliens qui ont été enquêtés en 2010 (soit 42 529 personnes pour un total de 143 508 déplacements recensés). Chacun des membres du ménage est interrogé sur tous les déplacements qu'il a effectués la veille du jour de l'enquête. Pour chaque déplacement, les enquêteurs recueillent un nombre important de caractéristiques (heures de départ et d'arrivée, motifs de déplacement, origines et destinations, etc.). Les enquêteurs recueillent également les caractéristiques générales du ménage (localisation, revenu, nombre de personnes, etc.) ainsi que les caractéristiques de chacun de ses membres (âge, sexe, profession, etc.).

[1] Rappelons à cet effet que l'EGT2020 n'est pas disponible à l'heure de la réalisation de cette étude.

Le choix modal est estimé sur les déplacements contraints (domicile-travail, domicile-études, etc.). Ceux-ci représentent environ 42 % des déplacements en voiture ou en transports en commun en Île-de-France.

Se limiter aux déplacements contraints permet d'écarter les scénarios dans lesquels, face au péage, l'individu décide de s'abstenir de se déplacer ou encore de modifier son heure de départ. L'estimation économétrique de la fonction d'utilité des usagers se déplaçant également pour un motif non-contraint aurait nécessité une modélisation plus large pour intégrer d'autres facteurs motivant ces déplacements.

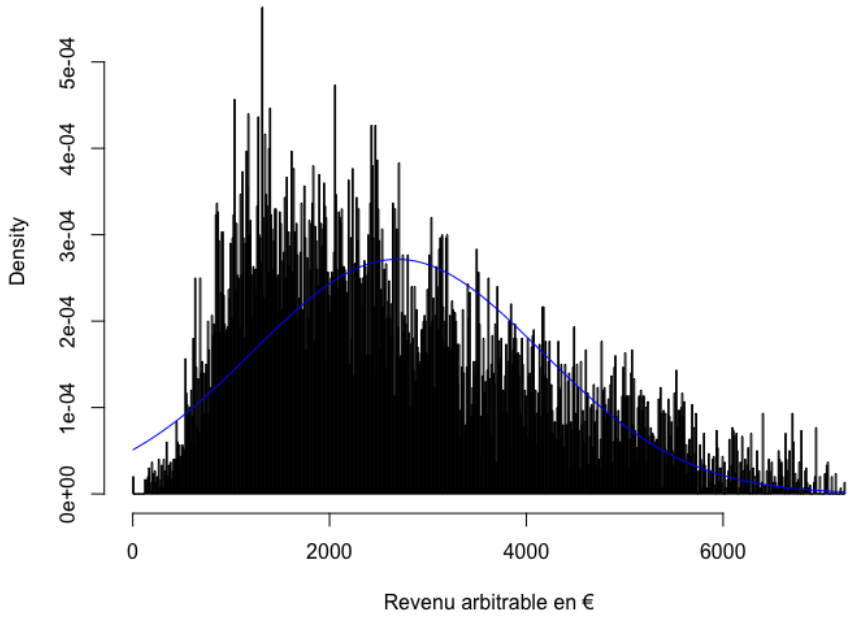
De plus, nous nous limitons aux déplacements des individus utilisant la voiture ou les transports collectifs puisque les péages relèvent principalement et majoritairement (mais pas uniquement) d'une alternative voiture versus transport collectif.

Pour ne garder que les observations pour lesquelles les transports en commun constituent une réelle alternative à l'automobile, nous ne conservons que les déplacements dont les carreaux d'origine et de destination se situent à portée des TC, c'est-à-dire dans limite de 15 minutes de marche à pied dans Paris et en petite couronne (4km/h), et 15 minutes en voiture particulière en grande couronne (24 km/h)[2].

D'autre part, la variable « revenu » dans l'EGT est une variable catégorielle correspondant à des intervalles de revenus nets. Il serait préférable d'utiliser le revenu disponible une fois les dépenses de logement payées, appelé revenu arbitrable, dans la mesure où il existe une relation entre dépenses de logement et dépenses de transport.

La part de ces dépenses de logement, dites pré-engagées, dans le budget du ménage peuvent être estimées en fonction du niveau de vie du ménage et du statut d'occupation du logement[3]. Pour ce faire, il convient de discrétiser au préalable la variable « revenu » : nous avons recours à des tirages uniformes sur chaque intervalle.

Figure 1 : distribution des revenus arbitrables des ménages de l'échantillon étudié



***Source** : EGT 2010, calculs des auteurs*

[2] Calcul a posteriori des distances dans les enquêtes ménages déplacements, Cerema (2009).
[3] DREES (2018), dépenses pré-engagées : quel poids dans le budget des ménages ?

Le *tableau 1* présente quelques statistiques descriptives des variables de l'échantillon étudié. On observe par exemple que les déplacements en VP représentent environ 54 % de l'échantillon et qu'ils ont en moyenne une durée plus faible de 25 minutes comparé aux TC.

Tableau 1 : statistiques descriptives des variables de l'échantillon étudié

Variable	Définition	Nombre d'observations	Moyenne	Écart-type
VP	=1 si déplacement en VP	30014	0.54	0.50
deltaC	$C_{TC} - C_{VP}$	30014	-3.22	3.96
deltaT	$T_{TC} - T_{VP}$	30014	25.04	22.19
revenu_uc	Revenu par unité de consommation* en €	30014	1942	957
FEMME	=1 si l'individu est une femme	30014	0.48	0.50
AGE	Age de l'individu	30014	35.95	14.32
MNP	Nombre d'individus dans le ménage	30014	3.08	1.46
NB_VD	Nombre de VP à disposition du ménage	30014	1.5	0.87

avec unité de consommation : 1 uc attribuée au premier adulte du ménage, 0.5 uc aux individus de plus de 14 ans, 0.3 uc aux individus de moins de 14 ans.
***Source** : EGT 2010, calculs des auteurs*

Partie 2

Calcul de la sensibilité des individus au prix et au temps des transports

Cette partie est consacrée à la catégorisation des ménages en différentes classes dites « clusters » sur la base de variables caractéristiques de leur mobilité, pour aboutir au calcul des élasticités de la demande individuelle au prix et au temps des transports en s'appuyant sur le modèle économétrique exposé dans la *partie 1*.

I. Regroupement des ménages en « clusters »

Il s'agit de former des « clusters », c'est-à-dire des classes ou groupes les plus homogènes possibles, destinés à fournir une typologie efficace des ménages interrogés. Chaque groupe fait ensuite l'objet d'une description à partir des variables caractéristiques ci-dessous, de manière à faciliter l'interprétation des résultats obtenus.

Tableau 2 : glossaire des principales variables d'intérêt et leur définition

Variable	Définition
NB_VD	Nombre de véhicules particuliers à la disposition du ménage
kilometrage_menageTC	Kilométrage journalier total effectué en TC par les membres du ménage (en km)
kilometrage_menageVP	Kilométrage journalier total effectué en VP par les membres du ménage (en km)
revenu_arbitrable	Revenu arbitrable mensuel du ménage (en €)
budget_transp_menages	Budget transport journalier du ménage (en €)
part_transport_revenu	Part du budget transport dans le revenu arbitrable du ménage

***Source** : EGT 2010, calculs des auteurs*

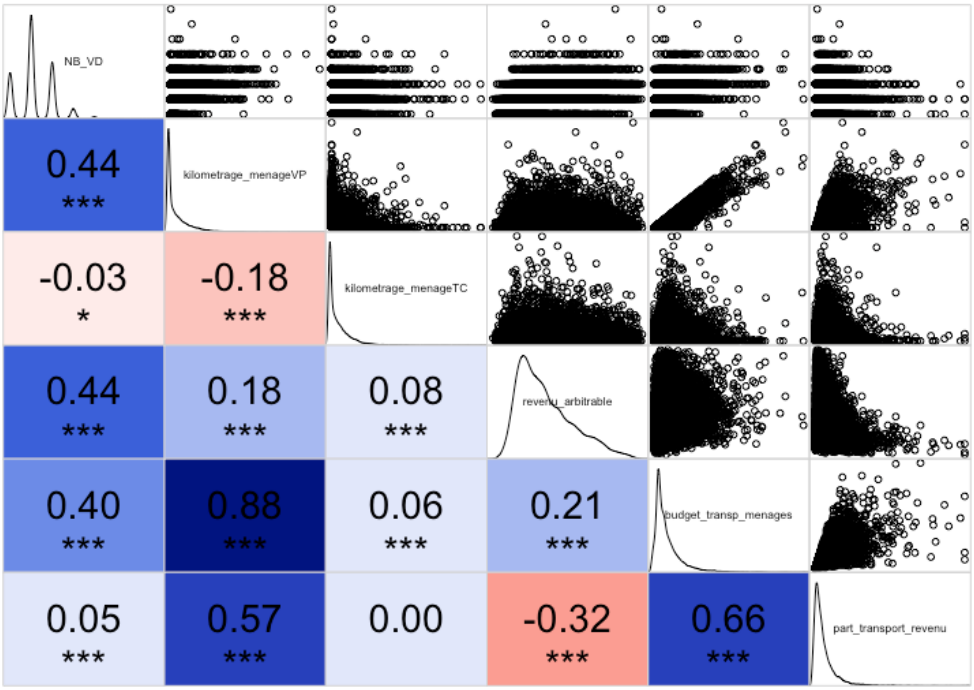
Le corrélogramme met en évidence les corrélations entre ces variables en utilisant le coefficient de corrélation « rho » de Spearman (*figure 2*).

La diagonale du corrélogramme représente la distribution de chaque variable. De plus, les cases roses (respectivement bleues) représentent une corrélation négative (respectivement positive), dont la couleur est plus foncée à mesure que cette corrélation est élevée (tend vers *rho = - 1 ou rho = 1* respectivement).

On y retrouve des relations cohérentes : le nombre de véhicules particuliers à la disposition du ménage est positivement corrélée avec le revenu et avec le kilométrage journalier en VP, et souvent significatives à 1 %.

Cependant, les corrélations entre le budget transport du ménage d'une part, et le kilométrage en VP ainsi que la part du budget transport dans le revenu d'autre part, sont très élevées. La variable budget_transp_ménages est donc omise pour éviter une redondance lors de la formation des « clusters ».

Figure 2 : corrélogramme des variables d'intérêt (obtenues selon le coefficient de corrélation « rho » de Spearman)



***Source** : EGT 2010, calculs des auteurs*

Il s'agit ensuite d'obtenir un bon partitionnement en minimisant l'inertie intra-classe pour obtenir des « clusters » les plus homogènes possibles, tout en maximisant l'inertie inter-classe afin d'obtenir des sous-ensembles bien différenciés.

Pour ce faire, il convient d'utiliser un algorithme de partitionnement : l'algorithme des k-médoïdes, *partitionning around medoïds (PAM)*, proposé par *Kaufman et Rousseeuw 1990*, est un algorithme de partitionnement plus robuste que le traditionnel algorithme des k-moyennes vis-à-vis des valeurs aberrantes. Le noyau d'une classe est alors un médoïde, c'est-à-dire une observation au sein d'une classe qui minimise la moyenne des distances ou dissimilarités avec les autres observations de la classe. À la différence de l'algorithme des k-moyennes, un médoïde fait partie des données et permet donc de partitionner des matrices de dissimilarités. En contrepartie, il est limité par le nombre d'observations n (temps de calcul de l'algorithme en O(n2)).

Cet algorithme présente d'autres avantages : il ne requiert pas nécessairement une distance Euclidienne. On peut alors envisager d'utiliser la distance de Gower. Celle-ci permet de traiter des données à la fois continues et discrètes. De plus, son application sur le logiciel statistique R permet de pondérer les variables en leur attribuant un poids lors de la formation des « clusters ». Cette propriété nous permettra d'appliquer une méthode de maximisation de l'homogénéité des « clusters » similaire à celle de *Bektas 2019*.

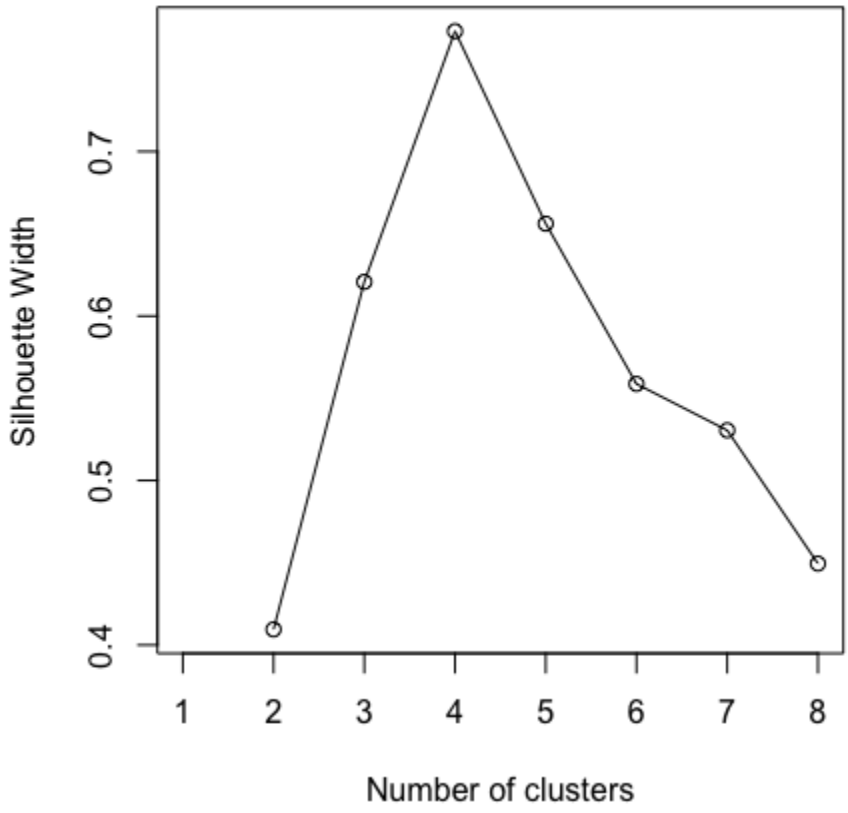
Avant cela, il faut choisir le nombre optimal de « clusters ». L'indicateur retenu est le coefficient de silhouette moyen, *average silhouette sidth (ASW), Rousseeuw 1987*. Ce coefficient est une mesure de qualité d'une partition d'un ensemble de données : pour chaque point, le coefficient de silhouette est la différence entre la distance moyenne avec les points du même groupe que lui (cohésion) et la distance moyenne avec les points des autres groupes voisins (séparation). Si cette différence est négative, le point est en moyenne plus proche du groupe voisin que du sien : il est donc mal classé. Le coefficient de silhouette moyen n'est autre que la moyenne du coefficient de silhouette pour tous les points. Il suffit

alors de calculer le coefficient de silhouette moyen de notre échantillon pour un nombre de « cluster » allant de 2 à 8 : la valeur maximale est obtenue pour un nombre de « clusters » égal à 4.

Il s'agit ensuite de maximiser l'homogénéité de ces « clusters » en introduisant des coefficients de pondération des variables explicatives. Il convient dès lors de trouver la combinaison de coefficients de pondération maximisant le coefficient de silhouette moyen, en utilisant par exemple la fonction optim sur le logiciel R. Ainsi, pour les variables explicatives suivantes (NB_VD (nbre_de_VP_du_ménage), kilométrage_ménageVP, kilométrage_ménageTC, revenu_arbitrable, part_transport_revenu) la combinaison optimale obtenue est de 1, 0.85, 0.82, 0.5 et 0.84.

Le diagramme représente les coefficients de silhouette moyens de notre échantillon obtenus pour un nombre de « clusters » allant de 2 à 8 *(figure 3)*. La valeur maximale, obtenue pour un nombre de « clusters » égal à 4, est de 0.78 : cela correspond à une augmentation de 11 %.

Figure 3 : coefficient de silhouette moyen



Source : *EGT 2010, calculs des auteurs*

Le *tableau 3* décrit les quatre « clusters » obtenus sur la bases des cinq variables explicatives retenues. On y observe deux catégories de ménages : les ménages à faibles revenus « clusters 2 et 4 » d'une part, et les « clusters » à hauts revenus d'autre part « clusters 1 et 3 ». Cependant, le revenu n'explique pas à lui seul toute la variabilité : au sein des ménages à bas revenus, on peut distinguer à nouveau nettement les ménages se déplaçant surtout en TC « cluster 4 », et les ménages se déplaçant surtout en VP « cluster 2 », qui possèdent deux fois plus de VP que leurs homologues du « cluster 4 », sont deux fois plus mobiles en termes de kilométrage total parcouru, et dont le poids du budget transport dans le revenu arbitrable du ménage est trois fois plus élevé. Cette même distinction se retrouve au sein des ménages à hauts revenus.

Ainsi de manière schématique, l'analyse permet d'aboutir à quatre grandes catégories de ménages en Île-de-France, selon la classification de revenu à laquelle ils appartiennent et selon leur choix de mobilité, VP ou TC :

- cluster 1 : revenus « élevés », mobilité voiture particulière ;
- cluster 2 : revenus « bas », mobilité voiture particulière ;
- cluster 3 : revenus « élevés », mobilité TC ;
- cluster 4 : revenus « bas », mobilité TC.

Tableau 3 : moyennes des variables par cluster

cluster	NB_VD	kilométrage_ménageVP	kilométrage_ménageTC	revenu_arbitrable	part_transport_revenu
1	2.11	42.9	22.72	3 323.15	0.03
2	1.11	51.72	10.13	1 767.75	0.06
3	0.93	7.31	33.42	3 606.77	0.01
4	0.55	2.91	25.3	1 287.52	0.02

Source : *EGT 2010, calculs des auteurs*

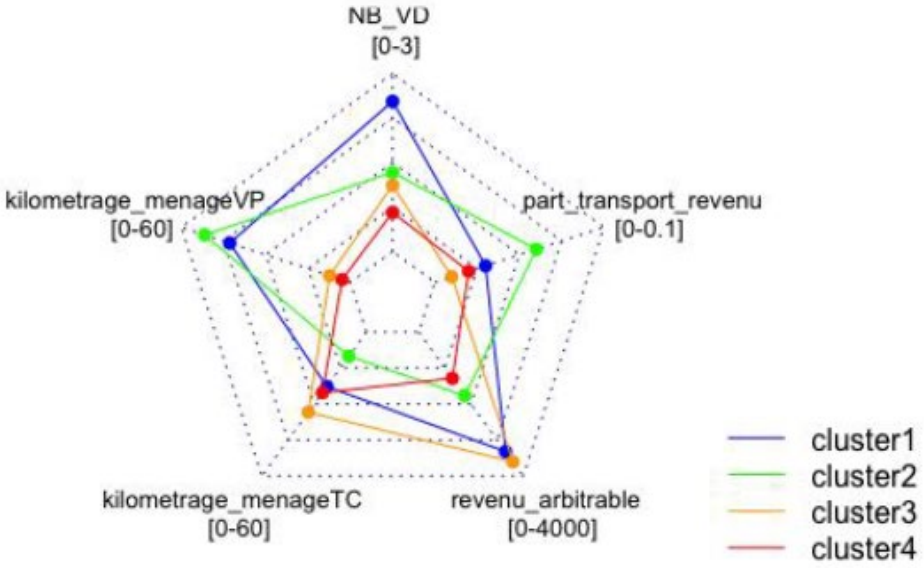
Le *tableau 4* est une version simplifiée : les cases vertes correspondent à une valeur élevée tandis que le cases roses correspondent à une valeur faible.

Tableau 4 : version simplifiée du tableau des moyennes des variables par cluster

cluster	observations	NB_VD	kilometrage_menageVP	kilometrage_menageTC	revenu_arbitrable	part_transport_revenu
1	11 353	+++	+++	-	+	+
2	4 314	+	+++	---	-	+++
3	6 419	-	---	+	+++	---
4	7 928	---	---	+	---	-

Source : *EGT 2010, calculs des auteurs*

Figure 4 : graphique radar représentant les « clusters » en fonction de cinq variables explicatives



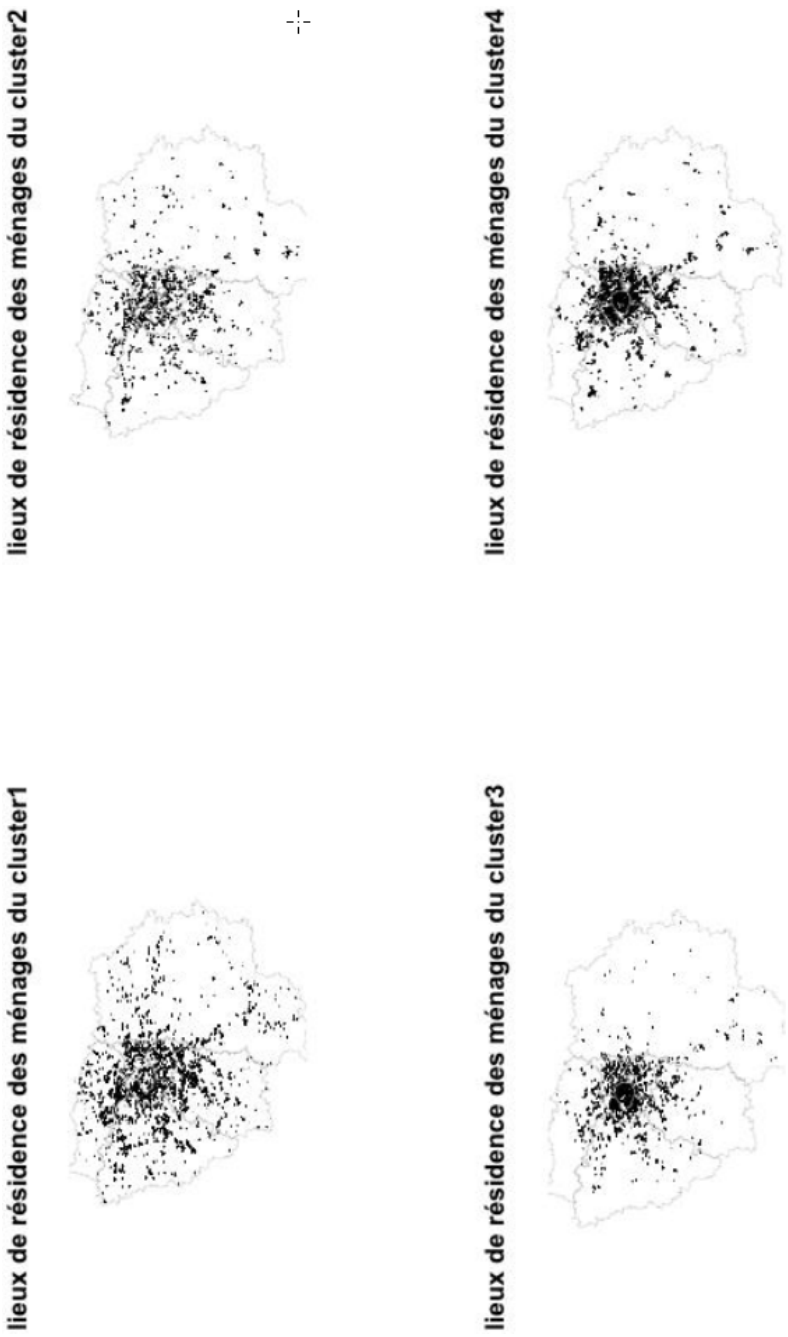
Source : *EGT 2010, calculs des auteurs*

Les *cartes* ci-après représentent les lieux de résidence des ménages en fonction du « cluster » auquel ils appartiennent. On y observe que les « clusters 3 et 4 », qui privilégient les déplacements en TC, résident surtout dans Paris intramuros et sa proche banlieue (petite couronne) contrairement aux « clusters 1 et 2 » qui privilégient les déplacements en VP et dont les lieux de résidence s'étalent davantage en grande couronne. Ceci est cohérent avec le fait que l'offre de transports en commun est plus développée à mesure que l'on se rapproche de Paris intramuros.

Ainsi, à l'instar du revenu, le lieu de résidence seul ne permet d'expliquer la mobilité, puisque pour des lieux de résidence similaires on retrouve à chaque fois deux types de ménages : l'un ayant un faible revenu et l'autre un revenu élevé.

Il s'agira dans la partie suivante de tenir compte de cette hétérogénéité en intégrant une variable catégorielle « cluster », indiquant le « cluster » auquel appartient le ménage d'un individu, sous forme de variable d'interaction dans l'estimation économétrique du choix modal.

Cartes : lieux de résidences des ménages en fonctions des « clusters »



***Source** : EGT 2010, calculs des auteurs*

II. Estimation économétrique du choix modal

Il s'agit d'estimer économétriquement la fonction d'utilité relative du choix modal des individus.

$$\Delta\Gamma^i(\alpha) = \Gamma^i_{TC} - \Gamma^i_{VP}(\alpha) = \beta_0 + \beta_1 DeltaC^i + \beta_2 DeltaT^i(\alpha) + \beta_3 \cdot X^i + \tau$$

Avec :

- *DeltaCi= CTCi−CVPi* donnant la différence de coût entre un déplacement en TC et ce même déplacement en VP ;
- *DeltaTi(α)= TTCi−TVP i(α)* donnant la différence de temps de trajet entre un déplacement en TC et ce même déplacement en VP ;
- *Xi* un vecteur composé des variables de contrôle détaillées dans la *partie 1, paragraphe III* :
  - revenu_uc ;
  - FEMME ;
  - ÂGE ;
  - MNP ;
  - NB_VD
- $\beta 1$ et $\beta 2$ les élasticités de la demande individuelle au prix et au temps des transports respectivement, à estimer ;
- α la variable binaire indiquant la présence ou non d'un péage.

Il convient également de tenir compte de l'hétérogénéité de la valeur du temps et de l'utilité marginale du revenu entre les différentes classes de ménages. Pour ce faire, la variable catégorielle « cluster » obtenue dans la partie précédente sera rajoutée sous forme de terme d'interaction avec les variables *DeltaCi et DeltaTi*.

Nous utiliserons ensuite une régression logistique sur la base des données de EGT 2010 qui décrit les choix individuels entre automobile et transport collectif dans un contexte sans péage ($\alpha=0$).

01) Calculs préliminaires

Pour le calcul de *DeltaTi*, ne disposant que de TVP (respectivement TTC) pour les individus ayant choisi d'effectuer le déplacement en véhicule particulier (respectivement en transport en commun), la première étape consiste à estimer le temps de trajet pour chaque déplacement dans le mode de transport alternatif.

Nous avons recours au moteur de recherche d'itinéraire *Open source routing machine d'OpenStreetMap* dont l'API est accessible via le package OSMR du logiciel R, et qui permet de calculer la durée des déplacements en VP entre deux points. Ainsi, en insérant les coordonnées d'origine et de destination des déplacements, on obtient la matrice des durées des déplacement VP pour les individus ayant choisi les TC.

Nous utilisons ensuite[4] les valeurs moyennes du temps perdu en TC par rapport au VP en fonction du moyen de transport en commun (bus, rail lourd, rail léger), calculé sur la base des observations obtenues ci-dessus, pour obtenir les durées des déplacement TC pour les individus ayant choisi les VP.

Pour le calcul de *DeltaCi*, il est nécessaire de calculer le coût de chaque déplacement en VP (*CVPi*) et en TC (*CTCi*).

Pour *CVPi*, nous nous basons sur le coût immédiat d'un déplacement, c'est-à-dire le coût en carburant, considérant que le coût total de possession du véhicule n'est pas celui qui entre en jeux lors du choix du mode de transport VP/TC face à la mise en place d'un péage. Ce coût est nuancé en fonction de la motorisation (essence/diesel/GPL), mais aussi de l'année de mise en service et de la cylindrée du véhicule (en utilisant les coefficients de pondération du *diagnostic environnemental de la mobilité 2006*, IFSTTAR, 2009).

Pour *CTCi*, le cout est calculé sur la base du tarif de l'abonnement carte Navigo/carte orange correspondant aux zones d'origine et de destination des déplacements de l'individu i.

En présence du péage ($\alpha=1$), il conviendra de calculer non pas une, mais deux (dés)utilités pour le déplacement en VP, et de choisir la plus basse. La première de ces deux options dont dispose l'automobiliste souhaitant continuer à se déplacer en VP après mise en place du péage consiste à traverser le péage, ce qui engendre un surcout correspondant au tarif du péage. La seconde option, conditionnée au fait que l'origine et la destination des déplacements se situent hors de Paris, consiste à contourner Paris pour éviter de devoir s'acquitter du tarif : l'automobiliste subit alors un surcout lié à l'augmentation du temps de son trajet.

Ainsi :

$$\Omega_{VP}^{i}(\alpha) = min \begin{pmatrix} \lambda \cdot T_{VP}^{i}(\alpha) + C_{VP}^{i} + \alpha \cdot p \text{ l'automobiliste traverse alorsle péage} \\ \lambda \cdot T_{VP}^{i}(\alpha) \cdot (1 + \alpha \cdot \mu) + C_{VP}^{i} \text{l'automobiliste contourne Paris} \end{pmatrix}$$

Avec λ la valeur unitaire du temps, α une variable binaire indiquant la présence ou non d'un péage, p le tarif du péage, et μ l'allongement du trajet si l'automobiliste contourne Paris plutôt que de la traverser.

Le paramètre μ est supposé égal à l'allongement du trajet entre les centroïdes des départements d'origine et de destination d'un déplacement.

02) Résultats du choix modal en l'absence de péage

Le *tableau 5* présente les résultats de l'estimation du choix modal en l'absence de péage. Il s'agit d'une régression logistique dont la variable expliquée est VP, variable binaire égale à 1 si le déplacement est effectué en VP et égale à 0 sinon.

Les coefficients sont significatifs, souvent à 1 %, et les signes cohérents. On observe que la propension à prendre sa voiture augmente quand la différence de coût entre les TC et la voiture diminue. De même, la propension à prendre la voiture augmente à mesure que le temps gagné en prenant la voiture plutôt que les TC augmente.

[4] Une alternative, payante, permettant d'obtenir à la fois la matrice des durées des déplacements VP, mais aussi TC est l'API de Google Maps, accessible via les packages mapsapi et gmapsdistance sur R.

Tableau 5 : résultats de l'estimation du choix modal en l'absence de péage

regression logit (avec clusters)	
	Dependent variable:
	VP
deltaC	0.194***
deltaT	0.012***
revenu_uc	-0.0002***
MNP	-0.255***
AGE	0.029***
FEMME	-0.539***
NB_VD	1.377***
cluster2	0.881***
cluster3	-0.517***
cluster4	0.134*
deltaT:cluster2	0.006*
deltaT:cluster3	0.029***
deltaT:cluster4	-0.006**
deltaC:cluster2	-0.137***
deltaC:cluster3	0.453***
deltaC:cluster4	0.629***
Constant	-0.804***
Observations	30,014
Log Likelihood	-13,670.520
Akaike Inf. Crit.	27,375.040
Note:	*p<0.1; **p<0.05; ***p<0.01

Source : *EGT 2010, calculs des auteurs*

En ce qui concerne l'appartenance de l'individu à l'un des quatre « clusters » précédemment identifiés, la variable « cluster » étant catégorielle, les coefficients de la variable « cluster » isolée ou en interaction avec DeltaT et DeltaC doivent donc être interprétés au regard du « cluster » omis, c'est-à-dire le « cluster 1 ».

Ces coefficients sont tous significatifs, ce qui veut dire que toutes choses égales par ailleurs, l'impact de la différence de coût (DC) et de la différence de temps (DT) sur le choix modal n'est pas le même pour les individus appartenant aux différents « clusters », ce qui montre la pertinence de ces regroupements.

Ainsi, le *tableau 6* regroupant les valeurs du temps de transport[5] (calculé comme le rapport de DeltaC/DeltaT pour chaque « cluster ») en fonction du « cluster » d'appartenance, ci-dessous, confirme l'hétérogénéité de la valeur du temps. Celle-ci est égale à 6.09 euros/heure en moyenne[6].

Plusieurs observations peuvent être faites :

- il convient de noter que les individus classés dans le « cluster 4 » ont une valeur du temps estimée proche de 0,5 euros/heure (0,44 euros/heure). En effet, il s'agit d'usagers à revenu moyen arbitrable bas, résident majoritairement dans Paris intramuros et ayant un parcours moyen en VP très réduit et plutôt orienté vers les TC. Ainsi ils sont intrinsèquement très peu sensibles aux gains de temps et très

[5] La valeur du temps, en économie des transports, correspond à la valeur du consentement à payer de chaque individu pour réduire le temps de transport. L'unité la plus généralement admise est l'euro par heure.
[6] France stratégie indique un montant moyen de valeur moyenne de 7,9 euros 2010/heure pour la France entière sans détail du motif. *Rocquigny 2013* : www.strategie.gouv.fr/sites/strategie.gouv.fr/files/archives/Valeur-du-temps.pdf.

majoritairement sensibles à la tarification du péage. Leur valeur estimée du temps de transport montre que ces derniers sont également caractérisés par une certaine insensibilité à la perte de temps en situation de congestion ;

- les « clusters 1 et 3 » ont une valeur du temps proche de 4 euros bien qu'ils représentent les deux catégories les plus aisées avec respectivement 3 300 et 3 600 euros de revenus arbitrable[7] ;
- pour ce qui est du « cluster 3 », cela s'explique par une très faible part du budget transport dans le revenu. Les ménages qui entrent dans cette typologie sont souvent localisés dans l'hypercentre afin de réduire leur budget temps de transport aux aménités les plus courantes (emploi, commerces, écoles et loisirs notamment)[8] ;
- le « cluster 1 » représente quant à lui l'ensemble des individus les plus mobiles, mais compte tenu de leur revenu arbitrable élevé, la part du coût de transport dans le revenu reste marginale, inférieure à 3 % ;
- pour finir, les individus qui composent le « cluster 2 » ont une valeur du temps estimée à près de 19 euros. Cette valeur beaucoup plus élevée que le reste des « clusters » s'explique par le poids du transport dans leur budget, 6 % du revenu en moyenne.

Notons également que le pseudo-R2 de McFadden est égal à 0,34 dans cette régression alors qu'il n'était que de 0,22 pour le modèle sans « clusters », lequel est disponible en annexe (augmentation de 55 %).

Tableau 6 : valeurs du temps de transport

Cluster	Valeur du temps de transport
cluster 1	3.7 €/h
cluster 2	18.9 €/h
cluster 3	3.8 €/h
cluster 4	0.44 €/h

***Source** : EGT 2010, calculs des auteurs*

Pour interpréter plus intuitivement l'effet des différentes variables explicatives sur le choix modal, nous pouvons nous intéresser aux effets marginaux de la régression précédente (*tableau 7*). On observe ainsi que la probabilité qu'une femme effectue son déplacement en VP est inférieur de 13,3 % à celle d'un homme, toutes choses égales par ailleurs. On observe également que la probabilité pour un individu d'effectuer son déplacement en VP augmente de 34 % par VP supplémentaire en possession de son ménage d'appartenance.

[7] À noter que la valeur du temps de transport est a priori une fonction non linéaire de la distance, puisque les ménages les plus aisés ont une valeur du temps beaucoup plus élevée que les ménages modestes sur longue distance (motif travail ou loisirs/vacances).
[8] Ainsi, une partie de leur valeur du temps de transport est intrinsèquement liée à leur choix de localisation et donc mesurable à partir de leur consentement à payer (loyer, mensualités de crédit bancaire) pour se localiser à proximité des zones d'emploi et d'activité.

Tableau 7 : effets marginaux

```
Marginal Effects:
                     dF/dx   Std. Err.        z     P>|z|
deltaC           4.8366e-02  1.8995e-03  25.4621 < 2.2e-16 ***
deltaT           2.9381e-03  4.3240e-04   6.7950 1.083e-11 ***
revenu_uc       -4.2215e-05  5.4558e-06  -7.7376 1.013e-14 ***
MNP             -6.3773e-02  3.3162e-03 -19.2309 < 2.2e-16 ***
AGE              7.2197e-03  2.8193e-04  25.6080 < 2.2e-16 ***
FEMME           -1.3375e-01  7.4294e-03 -18.0022 < 2.2e-16 ***
NB_VD            3.4407e-01  9.1855e-03  37.4581 < 2.2e-16 ***
cluster2         2.1332e-01  2.0834e-02  10.2391 < 2.2e-16 ***
cluster3        -1.2719e-01  2.0050e-02  -6.3434 2.247e-10 ***
cluster4         3.3530e-02  2.0376e-02   1.6456   0.09985 .
deltaT:cluster2  1.5508e-03  8.7680e-04   1.7687   0.07694 .
deltaT:cluster3  7.2141e-03  9.4713e-04   7.6168 2.600e-14 ***
deltaT:cluster4 -1.3882e-03  6.7635e-04  -2.0524   0.04013 *
deltaC:cluster2 -3.4222e-02  3.8428e-03  -8.9055 < 2.2e-16 ***
deltaC:cluster3  1.1313e-01  6.3941e-03  17.6935 < 2.2e-16 ***
deltaC:cluster4  1.5722e-01  7.7994e-03  20.1573 < 2.2e-16 ***
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
```

Source : *EGT 2010, calculs des auteurs*

03) Estimation du choix modal en présence du péage

Sur la base des paramètres estimés précédemment, nous pouvons à présent estimer le choix modal en présence d'un péage (α=1). L'effet du péage sur le choix modal VP/TC, c'est-à-dire la variation de choix modal et donc la diminution de trafic qu'engendrerait la mise en place d'un péage dans les différents scénarios de péages envisagés, est présenté dans le *tableau 8*.

Pour Paris intramuros les baisses de trafic varient entre 20 et 40 % selon le type de péage et le tarif. À l'échelle de l'Île-de-France la fourchette des baisses de trafic se situerait entre 6 et 13 %.

Notons qu'il n'est pas surprenant qu'à tarif égal, un péage de cordon entraine une diminution de trafic plus faible qu'un péage de zone, puisque ce dernier concerne non seulement les déplacements passant par Paris, mais aussi ceux effectués entièrement à l'intérieur de Paris.

Tableau 8 : choix modal en présence du péage

	Diminution du trafic à l'échelle de Paris	Diminution du trafic à l'échelle de l'Ile-de-France
Péage de zone (2.5€)	27.5%	8.5%
Péage de zone (5€)	41.5%	13%
Péage de cordon (2.5€)	19%	6%
Péage de cordon (5€)	32%	10%

Source : *EGT 2010, calculs des auteurs*

04) Prise en compte de l'impact du péage sur le trafic et effet rebond

Un phénomène dont il n'a pas été question jusqu'à maintenant est celui dit d'effet rebond : le péage entrainant une diminution du trafic VP et donc une diminution de la congestion routière, le temps des trajets effectués en VP est réduit. Certains automobilistes qui auraient préféré basculer vers les TC dans un premier temps pourraient alors, en fonction de leur valeur du temps et utilité marginale du revenu, décider de se déplacer à nouveau en VP si l'augmentation d'utilité engendrée par le gain de temps est suffisamment importante et persiste.

En l'absence d'un modèle de trafic, afin de tenir compte de cet effet rebond, nous commençons par estimer une fonction liant la vitesse des déplacements en VP au niveau de trafic (nombre de véhicules circulants dans la zone).

Les heures de départ et d'arrivée des déplacements étant recensées dans l'EGT, il suffit d'en tirer, pour chacune des 24 heures de la journée, le niveau de trafic ainsi que la vitesse moyenne de ces déplacements (*tableau 9)*. Nous pouvons alors effectuer la régression linéaire suivante :

Tableau 9 : relation entre la vitesse et le niveau de trafic

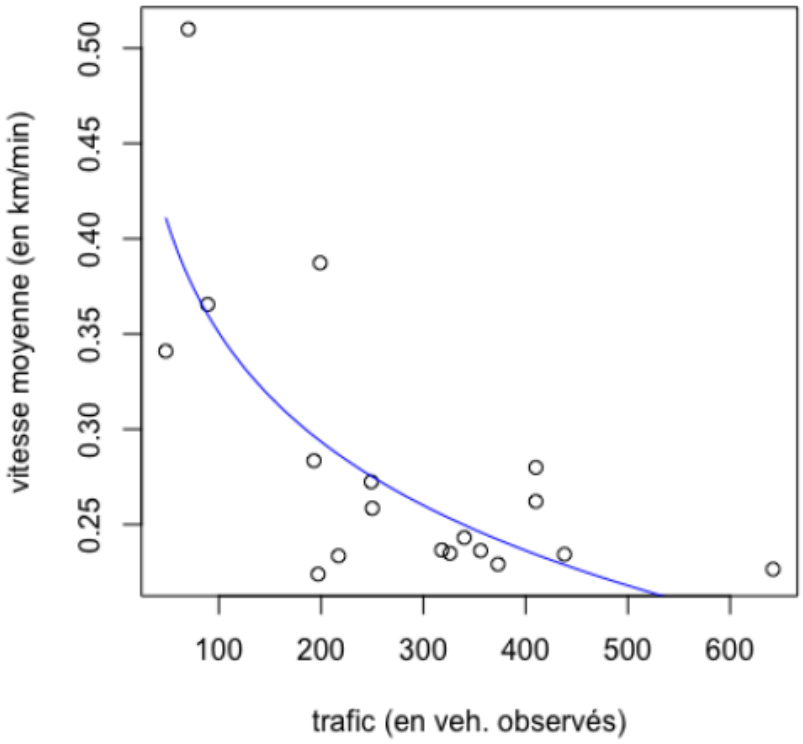
	Dependent variable:
	Vitesse
ln(Trafic)	-0.082^{***}
Constant	0.733^{***}
Observations	18
R^2	0.549
Adjusted R^2	0.520
Note:	$^{*}p<0.1$; $^{**}p<0.05$; $^{***}p<0.01$

Source : *EGT 2010, calculs des auteurs*

D'où l'équation suivante : $vitesse = 0.733 - 0.082 \ln(trafic)$

Une transformation logarithmique de la variable explicative (trafic) a été opérée pour satisfaire l'hypothèse de linéarité entre les variables explicative et expliquée.

Figure 5 : ajustement non linéaire de la vitesse moyenne en fonction du trafic observé



Source : *EGT 2010, calculs des auteurs. Unité abscisses : TMJA*

Tenir compte de cet effet rebond revient à revoir à la baisse la diminution du trafic estimée dans la partie précédente. La diminution du trafic à l'échelle de Paris résultant de la mise en place d'un péage urbain en tenant compte de l'effet rebond est revue légèrement à la baisse de 1 ou 2 points selon le scénario de péage (*tableau 10*).

Tableau 10 : diminution du trafic à l'échelle de Paris résultant de la mise en place d'un péage en tenant compte de l'effet rebond

Type de péage	Montant du péage	Baisse de trafic estimée à l'échelle de Paris		Gain de temps associé pour les déplacements en VP
		Avant prise en compte de l'effet rebond	Après la prise en compte de l'effet rebond	
Péage de zone	2,5 €	27,5%	26,0%	10%
	5,0 €	41,5%	39,0%	39%
Péage de cordon	2,5 €	19,0%	18,0%	18%
	5,0 €	32,0%	30,0%	30%

Source : *EGT 2010, calculs des auteurs*

Partie 3

Variation de surplus, équité et effets distributifs

Cette partie propose une évaluation des effets redistributifs des différents scénarios de péages urbains, qui peuvent fournir des indications sur le degré d'acceptabilité de ces scénarios.

Les résultats ci-dessous portent sur l'ensemble des déplacements VP et TC dont l'origine et/ou la destination se situent dans Paris, ainsi que les déplacements traversant Paris.

I. Variation moyenne des surplus individuels

Nous cherchons ici à introduire comme outil de mesure, la moyenne de la variation de surplus individuel par déplacement induite par la mise en place des différents péages (*tableau 11*). Cet indicateur peut être vu comme une indication sur le degré d'acceptabilité politique de chaque scénario.

Connaissant la valeur unitaire du temps ainsi que l'utilité marginale du revenu des individus, et ayant pu estimer le gain de temps pour les automobilistes après mise en place du péage, on peut calculer la variation du surplus tel qu'expliqué dans le modèle décrit précédemment.

Tableau 11 : moyenne de la variation des surplus individuel par déplacement

	Variation de surplus	Ecart-type	Pourcentage de gagnants	Coefficient de Gini
Peage zone 2.5e	-0.82	1.13	0	0.67
Peage zone 5e	-1.20	1.91	0.70	0.72
Peage cordon 2.5e	-0.59	1.59	6.92	0.70
Peage cordon 5e	-0.90	2.59	7.19	0.74

Source : *EGT 2010, calculs des auteurs*

Nous pouvons observer que la variation de surplus moyenne est négative, quel que soit le scénario de péage. En d'autres termes, le gain de temps ne suffit pas à couvrir la perte financière et de manière globale, les usagers sont perdants.

Ceci peut s'expliquer par la valeur du temps relativement faible, 6,09 euros/heure en moyenne. Celle-ci est par exemple deux fois plus faible que la valeur du temps de référence pour les déplacements franciliens contraints (domicile-travail/études/etc.) recommandée par France stratégie dans le rapport de *L'évaluation socio-économique des investissements publics* (2013) et qui est de 12,6 euros/heure. Ce rapport lui-même rappelle toutefois que les valeurs du temps de référence sont une version simplifiée et approximative, et recommande lorsque cela est possible une approche basée sur l'estimation de fonctions d'utilité des usagers en fonction du contexte (quels usagers sont concernés ?) et de l'objectif de l'étude (se prête-t-il davantage à l'utilisation du cout total de possession ou doit-il être plus nuancé ?).

De plus, à tarif égal, on observe que la variation de surplus moyenne d'un péage de cordon est plus faible que celle d'un péage de zone. Cependant, cet indicateur seul n'est pas suffisant pour apprécier l'effet du péage : l'écart-type, plus élevé pour un péage de cordon, semble indiquer que la perte d'utilité est distribuée de plus de manière inégale au sein des individus étudiés dans le cas de ces péages.

Ceci est confirmé par le coefficient de Gini, plus proche de 1 pour les péages de cordon. Néanmoins, le coefficient de Gini ne pouvant être calculé avec des variations de surplus à la fois négatives et positives au sein des individus étudiés, celui présenté ci-dessus est calculé en excluant les individus dont la variation de surplus est positive. D'où l'intérêt des approches explorées dans les paragraphes ci-dessous, qui pourront inclure toutes les variations de surplus.

Finalement, en ce qui concerne les déplacements gagnants, c'est-à-dire les déplacements pour lesquels la variation du surplus après mise en place du péage est positive, deux phénomènes expliquent leur présence : d'une part, à mesure que le tarif du péage augmente, la réduction du trafic tend à une fluidification du trafic et à accroître incidemment le gain de temps, ce qui au final permet de compenser plus ou moins fortement la perte financière. D'autre part, le péage de type cordon épargne les déplacements Paris intramuros. Ainsi, le pourcentage de gagnants est maximisé pour le péage de cordon de 5 euros, atteignant

7,19 % de l'ensemble d'individus dont les déplacements ont leur origine et/ou leur destination dans Paris, ainsi que les déplacements traversant Paris ; si on se limite à l'analyse des déplacements initialement effectués en VP, et donc concernés par le tarif du péage, les gagnants représenteraient à peu près 14 % des déplacements.

II. Équité et effets distributifs

Nous examinons ici l'ampleur des effets distributifs entre différentes classes de revenu. On se limitera à une approche essentiellement descriptive, visant à rapprocher le surplus des usagers de leur revenu moyen.

Tout d'abord, le *graphique 6* représente la relation entre la variation de surplus individuel et le revenu par unité de consommation. Ce dernier est divisé en quatre quartiles, le premier quartile correspondant aux revenus les plus bas.

On constate à nouveau que, quel que soit le scénario, la variation de surplus est toujours négative, correspondant à une perte allant de 0,5 euros/déplacement à 1,5 euros/déplacement.

De plus, quel que soit le quartile considéré, la perte la plus marquée correspond au péage de zone à 5 euros, suivi du péage de cordon à 5 euros du péage de zone à 2,5 euros, puis du péage de cordon de 2,5 euros. Ainsi, comme nous l'avions vu dans la partie précédente, à tarif égal, le péage de cordon est globalement moins pénalisant que le péage de zone.

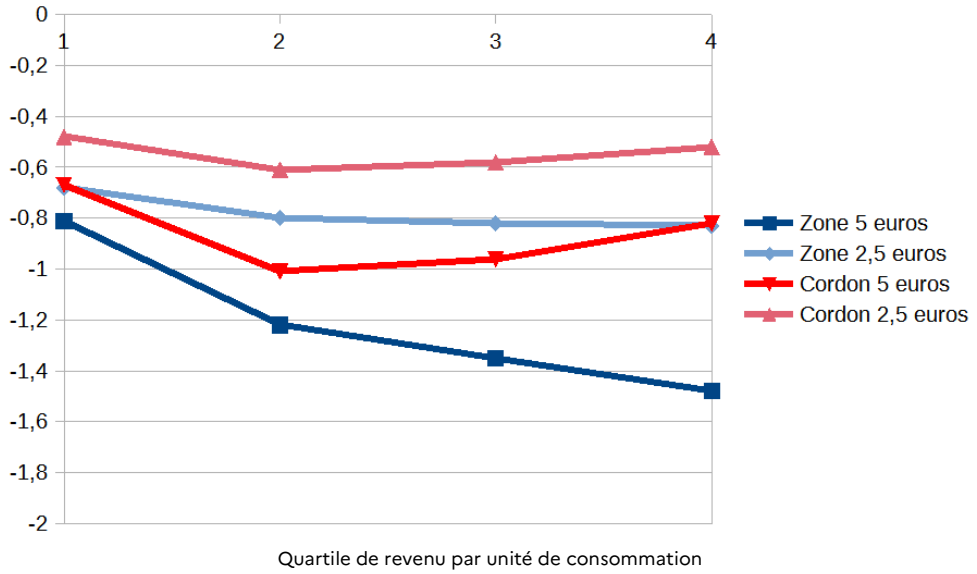
On constate également que quel que soit le péage considéré, les individus du premier quartile sont moins pénalisés que les autres si on raisonne uniquement en niveau : leur variation de surplus, bien que négative, est moins marquée que celles des autres quartiles.

Ceci est particulièrement net pour les péages à tarifs élevés : la perte moyenne des individus du premier quartile avec un péage de zone à 5 euros (respectivement péage de cordon à 5 euros) est deux fois plus faible que celle des ménages des quartiles suivants.

On observe également que la perte de surplus est une fonction croissante du revenu dans les péages de zone, alors que ce n'est pas le cas dans les péages de cordon où la perte diminue entre les quartiles 2 et 4. Cela peut s'expliquer par le fait que les déplacements réalisés dans Paris intramuros, épargnés par les péages de cordon, sont effectués majoritairement par des individus aux revenus relativement élevés.

Graphique 6 : moyenne de la variation de surplus individuel par déplacement selon le quartile de revenu

En euro par déplacement

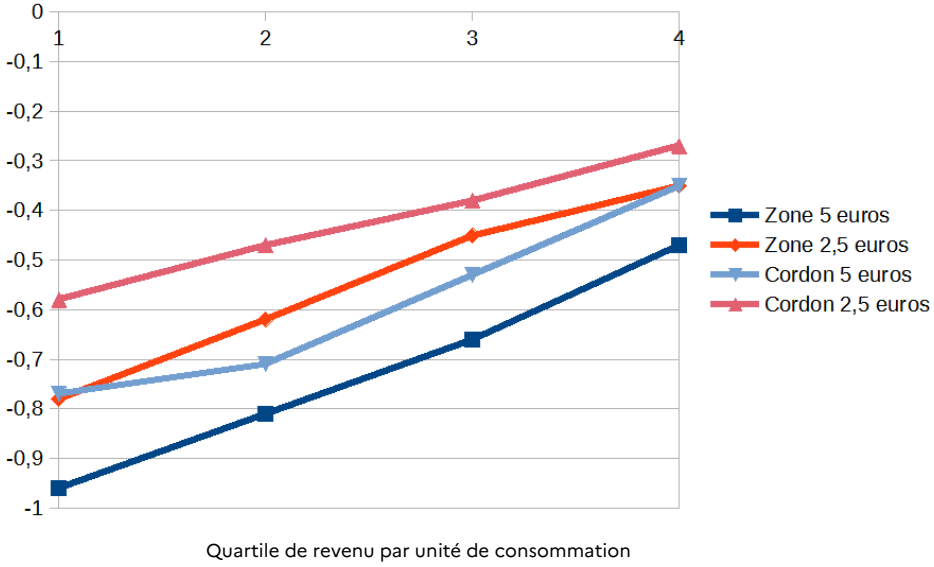


Source : *EGT 2010, calculs des auteurs*

Ces résultats sont cependant inversés dès lors qu'on raisonne en termes relatifs, et que l'on exprime les variations de surplus en pourcentage du revenu (*graphique 7*). On y observe que la perte moyenne liée à l'instauration du péage représente une part plus importante dans le revenu des premiers quartiles (plus modestes) que dans celui des quartiles suivants (plus riches). Il y a donc une nette régressivité des pertes de surplus issues de l'introduction du péage, quel qu'en soit le type.

Graphique 7 : part moyenne de la variation de surplus individuel dans le revenu par déplacement selon le quartile de revenu

Par déplacement dans le revenu

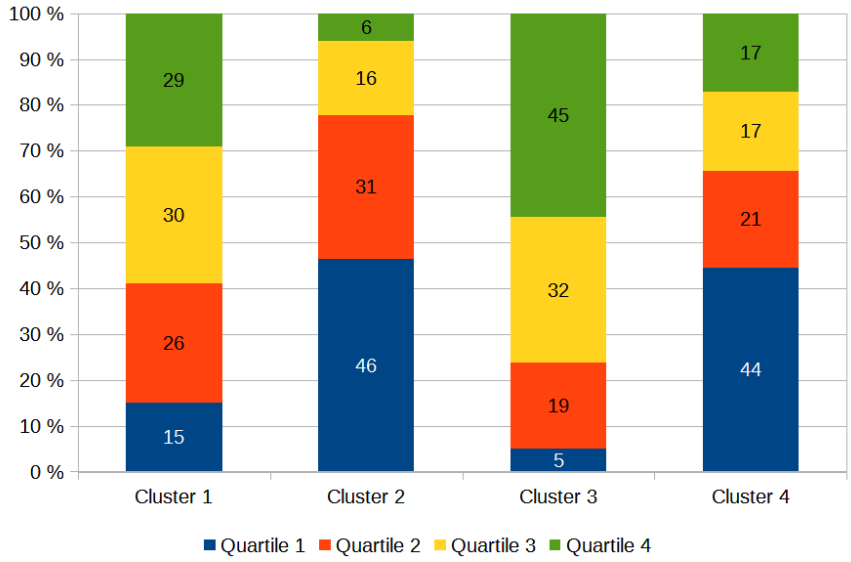


Source : *EGT 2010, calculs des auteurs*

La fonction de répartition donnant la proportion des « clusters » d'appartenance des individus par quartile de revenu par unité de consommation, nous permet d'être en mesure de dériver la proportion de gagnants/perdants selon le « cluster » d'appartenance (*graphique 8*).

Graphique 8 : proportion des « clusters » d'appartenance selon le quartile de revenu par UC

En %



Source : *EGT 2010, calculs des auteurs*

Il est ainsi aisé de constater que les « clusters 2 et 4 » se trouvent majoritairement dans les quartiles de revenus les plus bas. Et inversement pour les individus appartenant aux « clusters 1 et 3 », bien que pour le « cluster 1 » la répartition par quartile soit plus équilibrée.

Les conclusions tirées précédemment concernant les pertes/gains de surplus selon les quartiles de revenus les plus (respectivement moins) élevés valent majoritairement pour les « clusters 1 et 3 » (respectivement 2 et 4). En effets, les individus classifiés au sein des « clusters 1 et 3 » appartiennent majoritairement aux quartiles 3 et 4 (à 77 % pour le cluster 3 et à 59 % pour le cluster 1). Tandis que les « clusters 2 et 4 » sont majoritairement composés des quartiles 1 et 2 de revenus par UC (respectivement 77 % pour le « cluster 2 » et 61 % pour le 4). En outre, le « cluster 4 » composé de quartiles de revenus similaire au « cluster 2 », ne diffère que par sa propension supérieure à recourir aux TC et à sa plus faible part du revenu consacrée aux transport. Les individus qui composent « le cluster 4 » sont ainsi moins pénalisés en moyenne que ceux du « cluster 2 » dans la mise en œuvre d'un péage urbain (en raisonnant en part moyenne de variation de surplus individuel).

Pour finir, il semble évident que les individus les plus pénalisés seront les individus appartenant à la fois aux « clusters 2 et 4 » et au premier quartile de revenu. Ils représentent près de 45 % de la population de ces deux « clusters ».

Finalement, il est possible de proposer également une représentation cartographique permettant de visualiser de manière intuitive la répartition spatiale des pertes liées à la mise en place des scénarios de péages.

La méthode, inspirée des recommandations de France stratégie dans le rapport de *L'évaluation socio-économique des investissements publics* (2013), propose que pour chacune des communes *(i)* de notre échantillon, on calcule à la fois le nombre d'usagers *(ni)*, leur variation de surplus *(Si)* et leur revenu moyen *(Yi)*. L'indicateur dit d'inégalité, dérivé des

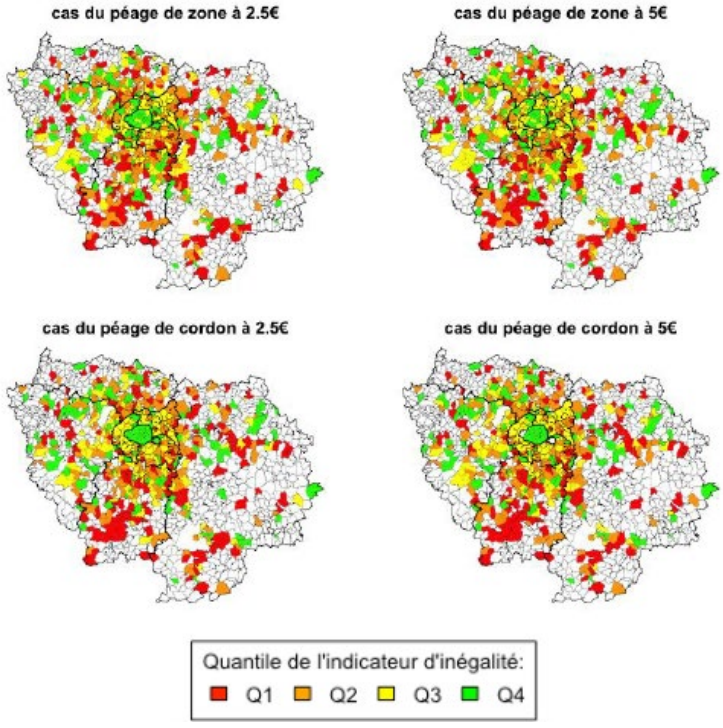
considérations développées par *Bonnafous et Masson* (2003), est ensuite calculé pour chaque commune *(i)* et est représenté sur une carte de la zone étudiée : il s'agit du ratio $ri = si/yi$.

Ainsi, les communes pour lesquelles le ratio est le plus élevé bénéficient davantage du projet que les autres, compte tenu des différences de revenu moyen inter-communes.

On notera que quel que soit le scénario, la répartition géographique des pertes reste plus ou moins identique : les communes parisiennes font toujours partie des moins durement impactées, surtout dans les scénarios de péages de cordon, tandis que la répartition est plus hétérogène au sein des départements constituant la petite et surtout la grande couronne.

Un motif semble néanmoins se dessiner : au sein de la petite couronne, alors que les communes des départements de Seine-Saint-Denis et des Hauts-de-Seine accusent des pertes modérées (couleur jaune prédominante), c'est moins le cas en Val-de-Marne (couleur orange prédominante). En ce qui concerne les départements de la grande couronne, les communes de l'Essonne sont les plus pénalisées, contrairement à celles des Yvelines. On constate ainsi que la distance séparant une commune de Paris n'explique pas seule la répartition géographique des pertes : mettre ces cartes en regard avec une représentation cartographique d'un indicateur combinant à la fois le profil des habitants, leur revenu et l'accessibilité aux réseaux de transport, pourrait permettre de comprendre plus finement la répartition géographique des pertes.

Cartes : répartition géographique des pertes liées à la mise en place d'un péage autour de Paris



Source : *EGT 2010, calculs des auteurs*[9]

[9] Les communes représentées en blanc sont les communes exclues de l'analyse économétrique, car situées à plus de 15 minutes en VP d'un arrêt de TC, ne permettant donc pas de mettre en concurrence les modes VP et TC. Pour mémoire (voir hypothèses supra), sont conservés uniquement les déplacements dont les carreaux d'origine et de destination se situent à portée des TC, c'est-à-dire dans la limite de 15 minutes de marche à pied dans Paris et en petite couronne (4 kilomètres/heure), et 15 minutes en voiture particulière en grande couronne (24 kilomètres/heure).

CONCLUSION

Ce rapport tente d'apporter des éléments de réponse à la question de l'impact socio-économique de la mise en place d'un péage urbain ayant pour but de réduire le trafic automobile en Île-de-France. Quatre scénarios y sont envisagés en fonction du type de péage placé autour de Paris, péage de cordon ou péage de zone, et du tarif de 2,5 euros/jour ou 5 euros/jour). Les données utilisées sont celles de l'enquête globale transport de 2010 (EGT 2010).

D'abord, nous nous consacrons à la catégorisation des ménages en « clusters », c'est-à-dire des classes ou groupes les plus homogènes possibles, sur la base de leur usage quotidien de l'infrastructure (kilométrage), mais également sur la base du poids budgétaire des transports dans le revenu arbitrable du ménage. Un tel regroupement, obtenu en utilisant l'algorithme de partitionnement des k-médoïdes et en cherchant à maximiser le coefficient de silhouette moyen, aboutit à la formation de quatre « clusters » distincts. Le partitionnement qui en résulte permet d'identifier les ménages à faibles revenus d'une part, et les ménages à hauts revenus d'autre part. Il convient également de tenir compte des autres caractéristiques puisqu'au sein de chacune de ces deux catégories de revenus se distinguent des ménages adeptes des transports en commun, mais aussi d'autres ménages utilisant davantage leur(s) véhicule(s) particulier(s).

Ensuite, sur la base d'un modèle théorique de choix modal (véhicule particulier/transports en commun), nous estimons économétriquement les élasticités de la demande individuelle au prix et au temps des transports, en incluant les « clusters » identifiés précédemment sous la forme des variables d'interaction. Il en ressort que la valeur du temps de transport de ces différents « clusters » est très hétérogène, allant de 0,44 euros/heure à 18,90 euros/heure avec une moyenne de 6,90 euros/heure. Sur la base de ces estimations, et en tenant compte de l'effet rebond, c'est-à-dire le fait que la diminution du trafic initiale peut encourager certains usagers à préférer à nouveau les véhicules particuliers, nous aboutissons à une estimation de la diminution du trafic parisien allant de 18 % (péage de cordon à 2,50 euros) à 30 % (cas du péage de zone à 5 euros).

Nous nous sommes finalement intéressés aux indicateurs suivants : la moyenne de la variation de surplus des automobilistes induite par le péage, ainsi que la relation entre la variation de surplus et le revenu. Le premier est négatif quel que soit le scénario. Les usagers sont donc globalement perdants, le gain de temps ne permettant pas de couvrir entièrement la perte financière. Cette perte varie entre 0,59 euros (péage de cordon à 2,50 euros) et 1,20 euros (péage de zone à 5 euros), et à tarif égal, elle est en moyenne plus faible dans le cas d'un péage de cordon, mais y est aussi plus inégalement distribuée que dans le cas d'un péage de zone. Le second indicateur caractérise l'effet distributif entre les classes de revenu (redistribution verticale). Si l'on considère la perte en termes absolu (en euro), alors les quatre scénarios de péages épargnent relativement les individus aux revenus les plus bas. En revanche, si l'on s'intéresse à la perte en termes relatif (en pourcentage du revenu), alors il y a régressivité.

Il est toutefois nécessaire de mentionner que ce travail n'analyse pas l'ensemble des effets d'un péage urbain et ne dresse pas un bilan socio-économique complet de ce dispositif. Il convient notamment de souligner les points suivants.

Tout d'abord, par rapport à d'autres solutions de gestion du trafic, un péage permet d'engranger des recettes. Or, la façon dont ces recettes seront utilisées peut modifier le bilan redistributif final du dispositif : par exemple, les utiliser pour développer l'offre de transport en commun dans les zones où les revenus sont bas aurait un impact distributif certain. L'analyse de scénarios d'utilisation des recettes mériterait donc d'être menée. Il y a également un enjeu en matière de communication et de transparence sur l'usage de ces recettes, qui pourrait être décisif en matière d'acceptabilité.

De plus, nous analysons ici uniquement les variations de surplus liées à la perte monétaire et au gain de temps. Les effets d'un péage ne sauraient se limiter à ces deux aspects bien qu'ils soient cruciaux. Ainsi, la prise en compte des effets du péage sur la réduction de certaines externalités liées au transport (nuisances sonores, pollution locale, émissions de gaz à effet de serre…) pourrait conduire à nuancer les résultats, notamment ceux relatifs à la variation de surplus global.

Finalement, l'utilisation de données plus récentes (enquête EGT2020 à venir[10]) pourrait mettre en lumière une possible modification des comportements de mobilité et des choix résidentiels, pouvant influencer les résultats obtenus dans ce rapport. Ces derniers pourraient être également affinés par la prise en compte ex-post d'éventuelles hypothèses liées à des changements de comportement sur le long terme découlant de la crise sanitaire de la Covid-19. À cet effet, cela pourrait être par exemple la prise en compte des effets liés au déploiement généralisé du télétravail.

[10] La nouvelle enquête globale transport (EGT H2020), en cours de réalisation, portera sur la période 2018-2022 avec pour objectif de passer d'une photographie de la mobilité des franciliens tous les 10 ans à un recueil en continu sur le principe du recensement de la population.

BIBLIOGRAPHIE

- Ademe. *État de l'art sur les péages urbains*. Objectifs recherchés, dispositifs mis en œuvre et impact sur la qualité de l'air, 2014.
- Bektas, Alperen, et Rene Schumann. *How to optimize Gower distance weights for the k-medoids clustering algorithm to obtain mobility profiles of the swiss population*. 2019 6th swiss conference on Data Science (SDS), IEEE, 2019, p. 51-56. DOI.org (Crossref), doi:10.1109/SDS.2019.000-8.
- Bonnafous, Alain, et Sophie Masson. *Évaluation des politiques de transports et équité spatiale*. Revue d'économie régionale et urbaine, vol. octobre, n◦ 4, 2003, p. 547. DOI.org (Crossref), doi:10.3917/reru.034.0547.
- Boyer, Marcel, et al. *Partage des coûts et tarification des infrastructures*. Centre interuniversitaire de recherche en analyse des organisations, 2006.
- France Stratégie. *L'évaluation socio-économique des investissements publics, 2013*.
- Glachant, Matthieu, et Benjamin Bureau. *Un péage urbain à Paris ? Une évaluation des effets distributifs de quatre scénarios*. Recherche - transports - sécurité, vol. 23, n◦ 93, décembre 2006, p. 263-78. DOI.org (Crossref), doi:10.3166/rts.93.263-278.
- Gostner, Carole. *Péages urbains : quels enseignements tirer des expériences étrangères ?* Document de travail de la DG Trésor, N° 2018/1, Avril 2018.
- Huertas, Jorge A., et al. *Level of traffic stress-based classification: a clustering approach for Bogotá, Colombia* ». Transportation research part D: transport and environment, vol. 85, août 2020, p. 102420. DOI.org (Crossref), doi:10.1016/j.trd.2020.102420.
- Insee. *Inégalités de revenus et niveau de vie en 2010*. Consulté le 9 septembre 2020.
- Raux, Charles, et al. *The efficiency of congestion charging: some lessons from cost–benefit analyses*. Research in transportation economics, vol. 36, n◦ 1, septembre 2012, p. 85-92. DOI.org (Crossref), doi:10.1016/j.retrec.2012.03.006.

ANNEXE

Estimation économétrique de la sensibilité des individus au prix et au temps des transports (régression sans « clusters »).

Tableau : regression logit « sans clusters »

	Dependent variable:
	VP
deltaC	0.195^{***}
deltaT	0.016^{***}
revenu_uc	-0.0003^{***}
MNP	-0.266^{***}
AGE	0.024^{***}
FEMME	-0.573^{***}
NB_VD	1.601^{***}
Constant	-0.909^{***}
Observations	30,014
Log Likelihood	-16,106.730
Akaike Inf. Crit.	32,229.460
Note:	*p<0.1; **p<0.05; ***p<0.01

Source : *EGT 2010, calculs des auteurs*

MINISTÈRE
DE LA TRANSITION
ÉCOLOGIQUE
Liberté
Égalité
Fraternité

**Commissariat général
au développement durable**

Service de l'économie verte et solidaire
Sous-direction de l'économie et de l'évaluation
Tour Séquoia – 92055 La Défense cedex
Courriel : diffusion.cgdd@developpement-durable.gouv.fr

www.ecologie.gouv.fr