



**HAL**  
open science

# Des permis à circuler échangeables pour une mobilité urbaine durable : Une application à la ville de Montpellier (France)

Jimmy Martinez

► **To cite this version:**

Jimmy Martinez. Des permis à circuler échangeables pour une mobilité urbaine durable : Une application à la ville de Montpellier (France). Economies et finances. Université Montpellier, 2020. Français. NNT : 2020MONTD034 . tel-03425212

**HAL Id: tel-03425212**

**<https://theses.hal.science/tel-03425212>**

Submitted on 10 Nov 2021

**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, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

# THÈSE POUR OBTENIR LE GRADE DE DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ DE MONTPELLIER

En Sciences Économiques (Section CNU 05)

École doctorale : École Doctorale Économie-Gestion (EDEG, ED 231)

Unité de recherche : Montpellier Recherche en Économie (MRE, EA 7491)

## Des permis à circuler échangeables pour une mobilité urbaine durable

Une application à la ville de Montpellier (France)

Présentée par Jimmy MARTINEZ

Le 7 décembre 2020

Sous la direction du Professeur François MIRABEL  
et le co-encadrement de Mathias REYMOND

Devant le jury composé de

Thierry BLAYAC, Professeur, Université de Montpellier

Yves CROZET, Professeur émérite, Institut d'études politiques de Lyon

Grégoire MARLOT, Président de société, Gestionnaire d'infrastructure CDG Express

François MIRABEL, Professeur, Université de Montpellier

Mathias REYMOND, Maître de conférences, Université de Montpellier

Stéphanie SOUCHE – LE CORVEC, Professeure, Université Lumière Lyon 2

Président du jury

Rapporteur

Examineur

Directeur

Co-encadrant

Rapporteuse



UNIVERSITÉ  
DE MONTPELLIER

*L'université n'entend donner aucune approbation ni improbation aux opinions émises dans la thèse : ces opinions doivent être considérées comme propres à leur auteur.*

*Elle n'est plus là où elle était, mais elle est maintenant partout où je suis.*

Saint Augustin, *Les Confessions*.

Maman, cette thèse t'est dédiée.

# Remerciements

Ces remerciements sont destinés à ceux qui ont contribué à la rédaction de ce chapitre de mon parcours universitaire. Puisse cette thèse être l'épilogue de cette fabuleuse période estudiantine ... mais aussi le prologue de nouvelles aventures.

Je remercie l'ensemble des membres du jury de me faire l'honneur d'apprécier ce travail. Merci aux Professeurs Stéphanie Souche - Le Corvec et Yves Crozet d'avoir accepté d'être les rapporteurs de cette thèse. Merci au Professeur Thierry Blayac et à Grégoire Marlot pour l'examen qu'ils en feront.

Je tiens à remercier chaleureusement mon directeur de thèse, Professeur François Mirabel, et mon co-encadrant de thèse, Mathias Reymond. Merci pour l'ensemble de vos conseils avisés, votre confiance et votre soutien. Le fruit de nos échanges a considérablement impulsé mes premiers pas de jeune chercheur.

Ma reconnaissance va à tous les membres du comité de suivi individuel de cette thèse. Votre aide constante et précieuse a guidé les grandes lignes de ce travail. Merci aux membres du CRISS de l'UPHF, ainsi qu'à l'ensemble des chercheurs rencontrés lors de séminaires et conférences. Vos idées inspirantes ont enrichi mes réflexions.

J'ai eu beaucoup de plaisir à travailler avec l'ensemble des membres du laboratoire Montpellier Recherche en Économie. Votre accueil, votre bienveillance et nos moments de convivialité ont su rythmer cette période de doctorat. Je remercie

tout particulièrement Professeur Benoît Mulkey, Marlène Guillon et les porteurs du projet POTE M, Professeur Jean-Christophe Poudou et Thomas Cortade.

J'exprime toute ma gratitude au Labex Entreprendre pour le financement de cette thèse. Merci à l'École Doctorale Économie-Gestion pour l'accompagnement administratif de ce doctorat et pour son soutien lors de l'organisation du huitième *Doctoral Meeting of Montpellier*. Merci à l'ensemble du personnel administratif de la Faculté d'Économie pour leur sympathie et leur disponibilité de tout instant.

J'adresse un grand merci à la CCI de l'Hérault et à l'ensemble des personnes qui ont pu m'aider à diffuser l'enquête-mobilité, au cœur des réflexions de cette thèse.

L'accomplissement de ce parcours, depuis les bancs du lycée, n'aurait jamais été possible sans l'aide du Général Henri Poncet, de Laurent Boissonade et de la Fondation Un Avenir Ensemble de la grande chancellerie de la Légion d'honneur. Chers parrains, merci d'avoir cru en mes capacités et de m'avoir toujours accompagné. Je rends hommage à Pascale Coget, ancienne directrice de la Fondation.

Je remercie l'ensemble des doctorants avec qui j'ai pu partager des débats, des pauses bien méritées et des parties de baby-foot endiablées. Chers Mohamed, Ismaël, Imane, Pauline, Roman et Yang, si cette thèse était un recueil des âneries que nous avons pu raconter, elle ne serait que le premier volume d'une trilogie.

J'ai également eu l'immense chance d'être entouré d'un amour indéfectible de ma famille et d'amis sur qui l'on peut compter à chaque instant. Merci à vous tous. Si j'aspire effectivement à devenir docteur, je ne pourrais toujours pas vous soigner !

Mes derniers remerciements s'adressent à Claire. Tes encouragements, ton énergie, tes blagues approximatives et ton optimisme ont bercé cette thèse de la plus douce des manières.

# Table des matières

<b>Préambule</b>	<b>I</b>
Remerciements . . . . .	I
Table des matières . . . . .	III
Liste des figures . . . . .	IX
Liste des tableaux . . . . .	XI
Liste des annexes . . . . .	XIII
<b>Introduction générale</b>	<b>1</b>
<b>1 Éclairages théoriques, digitalisation et modélisation économique des permis à circuler échangeables</b>	<b>11</b>
Résumé . . . . .	12
Introduction . . . . .	14
1 Définition du caractère incitatif des échanges domestiques de permis à circuler . . . . .	17
1.1 Leviers d'action sur l'offre et la demande de mobilité urbaine .	17
1.2 Influencer la demande de mobilité urbaine par la quantité plu- tôt que par le prix : conceptualisation du permis à consommer	21
1.3 État de l'art des échanges de permis . . . . .	25

1.3.1	Panorama des premiers permis régulateurs des ressources et des émissions de polluants . . . . .	25
1.3.2	Revue de la littérature des permis dans le domaine des transports et de la mobilité . . . . .	28
2	Réflexions relatives à la mise en place des permis à circuler échangeables (PCE) et du marché d'échange . . . . .	36
2.1	Méthode d'allocation des PCE et identification des receveurs .	37
2.1.1	Mise en perspective d'une nécessité d'allocation initiale gratuite et uniforme, basée sur l'objectif quantitatif collectif ciblé . . . . .	37
2.1.2	Identification des receveurs de PCE, pour une allocation proportionnelle à la taille et à la composition du foyer fiscal . . . . .	39
2.2	Caractérisation des structures de gestion du système de PCE et du marché d'échange . . . . .	41
2.3	Détermination du rôle des nouvelles technologies dans le système de PCE . . . . .	47
3	Modélisation économique des effets d'un système de PCE sur le choix modal . . . . .	52
3.1	Cadre du modèle . . . . .	52
3.2	Expression des fonctions d'utilité associées à l'usage d'un mode de déplacement . . . . .	55
3.3	Valeur du temps de basculement avant et après la mise en place du marché des PCE : analyse des répartitions modales .	57
3.3.1	Répartition modale avant la mise en place du marché des PCE . . . . .	58

3.3.2	Répartition modale après la mise en place du marché des PCE . . . . .	62
3.4	Comparaison des répartitions modales : analyse du report modal	64
3.4.1	Variation de la valeur du temps de basculement et impact sur le prix de marché des PCE . . . . .	65
3.4.2	Synthèse graphique des situations de report modal . . . . .	67
	Conclusion . . . . .	70
<b>2</b>	<b>Ludification des permis à circuler échangeables et analyse empirique des choix hypothétiques de déplacement dans la ville de Montpellier (France)</b>	<b>74</b>
	Résumé . . . . .	75
	Introduction . . . . .	77
1	Périmètre, objectifs et structure de l'enquête-mobilité . . . . .	79
1.1	Montpellier, sa métropole, son aire urbaine . . . . .	79
1.2	Objectifs généraux de l'enquête-mobilité . . . . .	82
1.3	Contexte et structure de l'enquête-mobilité . . . . .	83
2	Design du jeu sérieux sur les PCE . . . . .	85
2.1	Enjeux, contextualisation et vérification de la bonne compréhension du système de PCE . . . . .	85
2.2	Mesure des dispositions marginales à payer et à recevoir des PCE . . . . .	88
2.2.1	Préférences révélées, préférences déclarées ? Choix de la méthode de déclaration des dispositions . . . . .	89
2.2.2	Mesure des dispositions marginales à payer (DmP) pour l'achat d'un PCE . . . . .	93

2.2.3	Mesure des dispositions marginales à recevoir (DmR) pour la vente d'un PCE . . . . .	97
2.3	Affinement de la mesure des DmP et des DmR . . . . .	99
3	Révélation et analyse des DmP et des DmR de l'échantillon . . . . .	101
3.1	Phase 1 : révélation de la DmP . . . . .	101
3.2	Phase 2 : affinement de la DmP par variation du prix hypo- thétique des PCE . . . . .	102
3.3	Phase 3 : révélation de la DmR . . . . .	104
3.4	Phase 4 : affinement de la DmR par variation du prix hypo- thétique des PCE . . . . .	105
4	Transfert modal, report et annulation de déplacement : une première évaluation de l'impact des PCE . . . . .	107
4.1	Courbe d'offre et de demande des PCE . . . . .	107
4.2	Caractérisation du nombre de voyages évités en mode "lourd" . . . . .	110
4.3	Effets hypothétiques des PCE sur le choix modal . . . . .	116
4.4	Effets hypothétiques des PCE sur le choix d'heure de départ et de destination . . . . .	119
5	Projection des résultats sur l'aire urbaine de Montpellier . . . . .	121
5.1	Périmètre de redressement de l'échantillon . . . . .	121
5.1.1	Variables de redressement . . . . .	121
5.1.2	Délimitation géographique de la population . . . . .	122
5.2	Mise en application du redressement de l'échantillon . . . . .	123
5.2.1	Croisement sexe $\otimes$ CSP $\otimes$ âge . . . . .	123
5.2.2	Représentativité d'un individu de l'échantillon dans la population . . . . .	123
5.2.3	Avant de généraliser nos résultats... . . . . .	125
5.3	Observations à destination des décideurs publics locaux . . . . .	126

5.3.1	Impact des PCE sur la réduction du trafic routier . . .	126
5.3.2	Incitation des PCE à adopter des comportements de mobilité urbaine plus vertueux . . . . .	132
6	Analyses factorielles discriminantes des individus écartés de l'usage du mode "lourd" lors de la mise en place hypothétique des PCE . . .	135
6.1	Déterminants de la mise à l'écart du marché des PCE par "conviction" . . . . .	138
6.2	Déterminants de l'exclusion du marché des PCE par une DmP insuffisante . . . . .	144
6.3	Quelles implications pour la définition des politiques publiques ?	149
	Conclusion . . . . .	154
<b>3</b>	<b>Analyse économétrique de l'acceptabilité des permis à circuler échan- geables dans la ville de Montpellier (France)</b>	<b>157</b>
	Résumé . . . . .	158
	Introduction . . . . .	159
1	Tendances principales sur l'acceptabilité des instruments de politique publique de mobilité urbaine . . . . .	162
1.1	Acceptabilité des mesures de diminution de l'usage des véhi- cules polluants par la restriction, l'incitation et la sensibilisation	163
1.2	Acceptabilité des mesures "pollueur-payeur" . . . . .	165
1.3	Acceptabilité des mesures alternatives favorisant l'usage des transports collectifs . . . . .	166
2	Approche descriptive de l'acceptabilité des PCE . . . . .	167
2.1	Congestion, pollution, droit à la mobilité et effets-prix indi- rects : l'impact de l'usage des PCE selon les individus . . . . .	167

2.2	PCE vs. Péage urbain : une réelle opposition ? Acceptabilité comparée des deux instruments . . . . .	170
3	Analyse économétrique de l'acceptabilité des PCE . . . . .	175
3.1	Sélection des variables explicatives . . . . .	176
3.2	Modélisation économétrique . . . . .	181
3.3	Effets marginaux et élasticités sur la probabilité d'acceptabilité des PCE . . . . .	189
4	Quelles implications pour la définition des politiques publiques ? . . .	192
4.1	Dynamique de la probabilité d'acceptabilité des PCE . . . . .	192
4.2	Implications pour la définition des politiques publiques . . . . .	194
	Conclusion . . . . .	196
	<b>Conclusion générale - Trente recommandations à destination des décideurs publics</b>	<b>198</b>
	<b>Annexes</b>	<b>209</b>
	<b>Bibliographie</b>	<b>273</b>
	<b>Résumé de la thèse</b>	<b>287</b>

# Liste des figures

1	Classification des permis à circuler selon Fan & Jiang (2013) . . . . .	30
2	Fonction de répartition modale dans un régime de congestion simple - Situation sans marché des PCE . . . . .	60
3	Fonction de répartition modale en hypercongestion - Situation sans marché des PCE . . . . .	61
4	Fonction de répartition modale en régime de congestion simple - Si- tuation avec marché des PCE et report modal en faveur du bus . . . .	68
5	Fonction de répartition modale en régime d'hypercongestion - Situa- tion avec marché des PCE et report modal en faveur du bus . . . . .	69
6	Arbre de décision du système d'enchères ascendantes et descendantes pour la révélation des DmP . . . . .	96
7	Arbre de décision du système d'enchères ascendantes et descendantes pour la révélation des DmR . . . . .	98
8	Courbes d'offre et de demande de PCE sur le marché hypothétique .	108
9	Courbes d'offre et de demande de PCE sur le marché hypothétique - Effet sur le nombre de voyages évités . . . . .	115
10	Impact des PCE sur l'usage des modes de déplacement . . . . .	117
11	Effets hypothétiques des PCE sur la venue des individus habitant hors de la ville de Montpellier . . . . .	120

12	Synthèse des simulations 1 à 11 - Prix d'équilibre du marché des PCE et déplacements évités en mode "lourd" - Généralisation des résultats	129
13	Croyance des individus relatives aux différents impacts potentiels des PCE . . . . .	168
14	Évolution de la probabilité d'acceptabilité des PCE . . . . .	193

# Liste des tableaux

1	Prix, offre et demande de PCE au voisinage de l'équilibre du marché hypothétique . . . . .	109
2	Nombre de voyages en fonction du besoin de PCE . . . . .	113
3	Résultats des simulations 1 à 6 - Marché hypothétique des PCE - Généralisation des résultats . . . . .	127
4	Résultats des simulations 7 à 11 - Marché hypothétique des PCE - Généralisation des résultats . . . . .	128
5	Variation hebdomadaire moyenne du nombre de déplacements par individu se déplaçant dans la ville de Montpellier en mode "lourd" - Marché hypothétique des PCE - Généralisation des résultats . . . . .	131
6	Statistiques descriptives et test de Mann-Whitney - Individus écartés du marché des PCE par "conviction" . . . . .	140
7	Corrélation entre les variables et le facteur discriminant - AFD - Individus écartés du marché des PCE par "conviction" . . . . .	141
8	Fonction linéaire de classement - AFD - Individus écartés du marché des PCE par "conviction" . . . . .	144
9	Statistiques descriptives et test de Mann-Whitney - Individus exclus du marché des PCE en raison d'une DmP inférieure au prix de marché	146

10	Corrélation entre les variables et le facteur discriminant - AFD - Individus exclus du marché des PCE par une DmP inférieure au prix de marché . . . . .	147
11	Fonction linéaire de classement - AFD - Individus exclus du marché des PCE par une DmP inférieure au prix de marché . . . . .	149
12	Synthèse des liens statistiques obtenus par AFD - Déterminants des deux groupes écartés du marché des PCE . . . . .	150
13	Résultats des référendums sur la mise en place hypothétique d'un système de PCE et d'un péage urbain dans la ville de Montpellier . .	171
14	Préférence des individus entre la mise en place d'un système de PCE et d'un péage urbain . . . . .	173
15	Caractéristiques socio-démographiques – Acceptabilité des PCE . . .	179
16	Statistiques descriptives sur la perception des effets des PCE et des événements de mobilité . . . . .	181
17	Résultats économétriques - Acceptabilité des PCE . . . . .	184
18	Effets marginaux et élasticités sur la probabilité d'acceptabilité des PCE au point moyen de l'échantillon . . . . .	190

# Liste des annexes

A	Enquête en ligne (1 <sup>ère</sup> partie) - Caractéristiques socio-démographiques, profil de mobilité, perception des événements et des politiques publiques de mobilité urbaine . . . . .	210
B	Enquête en ligne (2 <sup>nde</sup> partie) - Ludification des PCE, acceptabilité et croyances sur leurs effets . . . . .	221
C	Présentation de l'échantillon de l'enquête en ligne . . . . .	235
D	Dispositions marginales à payer - Ludification des PCE . . . . .	242
E	Dispositions marginales à recevoir - Ludification des PCE . . . . .	244
F	Effets des PCE sur le trafic routier - Ludification des PCE . . . . .	246
G	Population de 15 ans et plus par sexe, âge et catégorie socioprofessionnelle dans l'aire urbaine de Montpellier (INSEE (2020) - Recensement de la population de 2016) . . . . .	248
H	Poids des individus - Généralisation des résultats de la ludification . .	250
I	Simulations des courbes d'offre et de demande - Généralisation des résultats de la ludification . . . . .	253
J	Effets des PCE sur le choix modal et de destination - Généralisation des résultats de la ludification . . . . .	260
K	Acceptabilité de différents instruments de mobilité . . . . .	264
L	Statistiques descriptives - Acceptabilité des PCE . . . . .	270

# Introduction générale

L'opinion est unanime : la mobilité urbaine génère des nuisances collectives et des gaspillages démesurés de l'espace urbain et des ressources naturelles. À la lumière d'Orfeuil (1996) [75] et du Ministère de l'Environnement, de l'Énergie et de la Mer (2017) [89], la mobilité est définie comme étant l'action de faire se déplacer personnes et marchandises dans la ville, d'un lieu de départ à un lieu d'arrivée, où le but du déplacement est autre que le déplacement lui-même. Pour ce faire, l'individu a le choix, parfois contraint, d'utiliser un ou plusieurs modes de déplacement, individuels ou collectifs. Dans ce cadre, les institutions de l'État ont pour rôle d'améliorer, de pérenniser, mais aussi de réglementer l'exercice de libre circulation des individus.

Cabrera-Arana et al. (2015) [15] ont synthétisé les différents concepts de la mobilité dans tous les domaines auxquels elle se réfère. Selon leurs travaux, la mobilité peut être "*terrestre, aérienne, aquatique ou virtuelle, en utilisant le mode piéton, automobile, ferroviaire, aérien et bien d'autres*". C'est aussi, de manière plus contemporaine, "*un déplacement opportun, sûr, efficace et non-polluant de personnes et d'objets dans des réseaux multimodaux et intégrés, en utilisant son énergie corporelle ou, de manière efficiente, l'énergie provenant d'autres sources, à des coûts supportés par les individus et la société, sans menacer aujourd'hui et demain le droit de chacun de pouvoir se déplacer*". Deux nouveaux éléments surgissent alors dans ce concept de mobilité : l'efficacité des consommables et la virtualité. Nous y reviendrons tout au long de la thèse.

Ce terme de mobilité est plus vaste que le concept de transport. En effet, le transport est un service effectué par des acteurs particuliers que sont les transporteurs. Ainsi, une mobilité peut s'effectuer sans l'aide d'un service de transport (e.g. marche à pied, vélo particulier et voiture personnelle).

Notre cadre d'analyse dans un milieu urbain implique des déplacements de courte distance. La plupart de ces déplacements sont pendulaires et quotidiens. Dans ce contexte, la voiture particulière est la source d'externalités négatives telles que la pollution, la congestion, le bruit, la dégradation des infrastructures, les accidents de la circulation et les insuffisances respiratoires. Toutes ces externalités se présentent comme étant des défaillances de marché qu'il convient de résoudre d'un point de vue collectif. Ce sujet global est un enjeu majeur du XXI<sup>e</sup> siècle. À titre d'exemple, la Conférence de Paris, ou COP21, a réuni 195 pays qui se sont engagés à diminuer leurs émissions de gaz à effet de serre (GES). Le secteur des transports est d'ailleurs celui qui émet le plus de ces gaz en France. 136,8 millions de tonnes équivalent CO<sub>2</sub> ont été émises par ce secteur en 2018, représentant 31% des émissions de GES de la nation (SDES (2020) [90]).

L'activité économique mondiale des dernières décennies et la concurrence dans le secteur des transports n'ont eu de cesse de s'intensifier. En même temps, la population et les revenus ont continué à croître. Tous ces éléments ont engendré une augmentation globale du nombre de déplacements des ménages, un accès plus aisé à l'achat d'une voiture et, partant, une augmentation de l'usage domestique des voitures. Ces événements impliquent actuellement une double raréfaction (Crozet (2019) [23]). La première est la rareté grandissante de l'espace à l'échelle de la collectivité, où les individus occupent de plus en plus de place dans les villes, notamment sur les routes. La seconde est la baisse du temps disponible quotidien de chaque individu, en raison de l'accroissement des activités que permet la hausse globale des revenus.

Malgré le fait que le bien-être collectif et l'intérêt individuel varient souvent en sens contraire lorsqu'il s'agit de l'usage de la voiture, ce mode minimise les efforts physiques et cognitifs (Dziekan & Vermuelen (2009) [35]) que chaque individu doit procurer lorsqu'il souhaite se déplacer pour aller effectuer des activités. Ce mode de déplacement améliore par la même occasion le confort des usagers et procure une dimension sociale positive. Par l'ensemble de ces constats, les voitures disposent d'un "*droit de cité*" (Crozet (2019) [23]). Depuis de nombreuses décennies, la voiture a été, et reste encore, un symbole de la liberté et de l'indépendance (Flonneau (1999) [43]). On remarque néanmoins un délaissement progressif de ce mode, notamment par le décalage temporel du passage du permis de conduire chez les jeunes (DRIEA (2010) [30]), l'apparition de nouveaux modes de transport (e.g. gyroroue et trottinette électrique), mais aussi le développement de services alternatifs (e.g. covoiturage et mise en libre-service de véhicules et d'autres modes alternatifs).

À travers l'abandon de la voiture, l'usage des modes alternatifs, les actions citoyennes et les voix de jeunes porte-paroles, les nouvelles générations auraient-elles compris que l'avenir du climat était aussi entre leurs mains ? Il est important de souligner que le concept de climat n'est pas seulement lié à la hausse globale des températures de la planète, où la responsabilité de l'Homme n'est plus à prouver. Le climat économique, social ou encore politique sont aussi parties prenantes des enjeux de la mobilité, comme en témoigne le mouvement des Gilets Jaunes en place depuis la fin de l'année 2018. L'augmentation du prix du carburant et son impact sur les mobilités ont été à l'origine d'une crise sociale qui a affaibli l'économie française.

Il n'en est pas moins sûr que la durabilité de la mobilité est la condition *sine qua non* de l'accomplissement des défis économiques et d'amélioration de la qualité de vie, sans entacher le bien-être des générations suivantes. La mobilité urbaine actuelle doit marquer une rupture par rapport à la période industrielle qui la précède. Cette dernière a donné lieu à une production et à une utilisation intensive des modes

dits "lourds" pour la mobilité des personnes, mais aussi celle des marchandises. La voiture, le poids-lourd, l'avion, ou encore le bateau à moteur, font partie de ces modes. Le progrès actuel des nouvelles technologies et la naissance de communautés d'individus "ultra-connectés" laissent toutefois présager de nouvelles manières de penser la mobilité et, plus généralement, nos modes de consommation.

Le progrès technique a permis de faire évoluer tous les outils du numérique, notamment les nouvelles technologies de l'information et de la communication (NTIC). Son application est vaste dans le domaine de la mobilité. En ce qui concerne les modes de déplacement, ces évolutions permettent d'intégrer des instruments de pointe dans les véhicules et d'améliorer la consommation des ressources (e.g. régulateurs et limiteurs de vitesse, *Start & Stop* et système GPS). Elles permettent également de créer de nouveaux modes de déplacement (e.g. hoverboard et gyroroue) ou de réinventer des modes déjà existants (e.g. voiture électrique, voiture autonome, vélo à assistance électrique et trottinette électrique). Plus encore, les téléphones portables et les ordinateurs sont de plus en plus évolués et performants. Le développement d'applications numériques est ainsi multiplié et accéléré. De nombreuses applications de déplacement en temps-réel et d'achat en ligne de titres de transport voient le jour. Les plateformes d'échange-mobilité émergent (e.g. covoiturage et location d'un véhicule personnel).

Efficiencence et virtualité sont donc les deux éléments centraux de notre sujet. Ces notions actualisent la définition de la mobilité. Elles amènent elles-mêmes une nouvelle notion précisant l'usage du progrès technique : l'intelligence. Selon l'Académie Française, l'intelligence est la "*faculté de comprendre, de concevoir, de connaître, et notamment (la) faculté de discerner ou d'établir des rapports entre des faits, des idées ou des formes pour parvenir à la connaissance*". En synthétisant les différentes définitions de l'intelligence, trois éléments caractérisent ce concept : l'apprentissage, la compréhension et l'adaptation. Différents sens peuvent être appliqués à ces trois

éléments, ainsi qu'à l'intelligence elle-même. Ces différences fournissent de la matière à débattre aux seins de différents corps de métiers intellectuels (e.g. psychologues, sociologues et philosophes). Nous nous limitons ici à évoquer deux axes majeurs de l'intelligence concordant avec les usages de la mobilité urbaine présente et future :

- Le premier axe concerne l'intelligence artificielle, celle des "machines". Cet axe ouvre de nouvelles voies vers une optimisation globale du système-mobilité. Grâce aux solutions techniques, algorithmiques et automatiques, le biais humain est progressivement écarté. La conséquence est alors une hausse de la productivité mais également plus de prédictivité, d'apprentissage automatique et d'adaptation. Bien que cette intelligence permette une baisse des coûts de transaction, celle-ci est confrontée à de nombreux freins, notamment celui de la confiance et de la crainte de délégation partielle ou totale des leviers de la mobilité à des machines.
- Le second axe est celui de l'intelligence humaine développée par la confrontation d'idées, la transmission d'informations, la contribution et l'avis des usagers eux-mêmes sur les déplacements. Ces usagers sont les acteurs de leur propre mobilité. Ils doivent être force de proposition et faire partie des protagonistes. Leur rôle est important dans la construction d'un système de mobilité meilleur face aux défis contemporains et futurs.

L'interdépendance de ces deux formes d'intelligence engendre un accroissement qualitatif et quantitatif des données. Ces données se différencient notamment par leur cycle de vie. Les données correspondant aux infrastructures urbaines (e.g. indicateurs géographiques et topographie de la voirie) et aux systèmes de transport (e.g. coordonnées géographiques des arrêts de transport, du réseau global et des stations de vélos en libre-service) ont des cycles de vie longs. Ces données restent immuables dans une période de temps relativement longue. Les données en temps-réel présentant l'offre et la demande de transport à un instant donné se démultiplient

(e.g. prochain horaire de passage d'un métro, nombre de vélos disponibles dans une vélostation et conditions de circulation sur la voirie). Vite obsolètes, ces données disparaissent rapidement. Notons que l'utilisateur produit lui-même des données brutes devant être traitées par les solutions algorithmiques. La validation du titre de transport en est un exemple.

On assiste alors au renversement de l'image de la mobilité qui était fondée sur trois grandes entités : le planificateur bienveillant (par abus de langage : l'État), les offreurs d'un service de mobilité, d'un mode ou d'une infrastructure, et la demande de mobilité. Il apparaît que l'action de chacun des piliers sur un autre est insuffisante pour résorber les effets néfastes de la mobilité sur l'environnement et les individus. Plus encore, les frontières entre ces entités deviennent de plus en plus poreuses : la demande de mobilité peut devenir l'offre de mobilité par l'apparition de nouvelles formes de déplacement. Le covoiturage en est l'exemple le plus simple : le conducteur propose lui-même son service de transport aux autres individus.

Il convient alors de proposer un service numérique prenant en compte l'intensité croissante des interactions entre tous les acteurs de la mobilité. Pour ce faire, le numérique est proposé comme un appui. Il permet de créer une plateforme entre l'offre de mobilité et sa demande associée. Parallèlement, ces nouvelles technologies doivent consolider les outils et le savoir-faire acquis depuis des décennies dans le domaine des transports. L'évolution des outils, des usages et des acteurs (Rouget et al. (2016) [87]) ne doit pas ainsi effacer cet héritage. Au-delà même de l'oubli, l'intelligence pourrait nous soumettre à de nouvelles boucles d'inventions. Ces dernières pourraient rendre obsolètes d'anciens instruments économiques de choix de déplacement. Dans une certaine mesure, elles pourraient aussi rendre caduques les affirmations de cette thèse.

Dans ce contexte général, la diversité des instruments mis en place et répondant aux objectifs de réduction des défaillances de l'espace urbain, imputables à la mobilité, ne suffisent plus à améliorer le bien-être de chacun et peuvent provoquer le soulèvement des citoyens. D'autres instruments de politique publique de mobilité, seulement théorisés, pourraient émerger dans les villes. Ils permettraient d'engager un processus de mobilité urbaine durable. La raison principale de cette émergence est la levée des barrières technologiques. Certains de ces instruments tentent de contourner l'usage de la taxation pour inciter à des choix de déplacement plus vertueux. Par ces constats fondamentaux, une question générale de recherche se dégage. Comment réduire la place de la voiture dans les villes sans taxer les automobilistes ?

L'objectif de cette thèse est de valoriser les permis à circuler échangeables domestiques. Si ce dispositif n'est qu'au stade de l'élaboration théorique, il offre déjà de très prometteuses perspectives dans nos villes. Ces permis reposent sur la logique suivante : une quantité non-monnaire, que l'on appelle parfois quota, est allouée à l'individu. Celle-ci lui permet d'effectuer un certain nombre de déplacements en automobile, ou un certain nombre de véhicules-kilomètres. Cette quantité est limitée. Elle est associée à un objectif collectif de non-dépassement d'un seuil permettant de réduire les effets externes nuisibles à la collectivité.

Cet instrument de politique publique contourne certains inconvénients du péage urbain et de la taxation des ressources. Ces éléments rendent la mesure plus acceptable socialement. Le budget des ménages n'est pas ponctionné pour assurer leur droit à la mobilité minimale, exception faite lors de l'acquisition de nouveaux permis pour des ménages ayant déjà consommé les permis qui leur avaient été alloués initialement pour se déplacer. Dès lors que les permis sont échangeables sur un marché, ceux-ci incitent les individus — au lieu de les contraindre — à adopter des comportements de mobilité urbaine qui concordent avec l'objectif de soutenabilité de la mobilité.

Ces quotas font écho aux marchés des droits à polluer pour lesquels nous disposons d'expériences pratiques. Nous sommes donc en mesure d'identifier la structure générale, le fonctionnement global et les avantages de tels marchés. Ces expériences nous permettent également d'anticiper les erreurs commises et les difficultés rencontrées dans ces marchés. L'actualité brûlante évoque une version hybride de ces permis. Une proposition de loi vise à instaurer des quotas-carbone individuels non-échangeables contingentant les déplacements en avion pour les voyages de loisirs<sup>1</sup>.

L'étude des permis à circuler échangeables peut s'appréhender de trois manières (Dogterom et al. (2017) [33]). Nous pouvons :

- Mener une réflexion sur la conception du système de permis à circuler échangeables, la mise en œuvre de cet instrument et la distribution des permis à chacun des citoyens.
- Utiliser une approche multi-agents afin de modéliser les flux routiers concernés, de près ou de loin, par un système de permis à circuler échangeables.
- Réaliser des études empiriques sur le comportement des individus confrontés à des systèmes hypothétiques de permis à circuler échangeables.

À la lumière de ces approches, cette thèse comporte trois chapitres dans lesquels un état de l'art de cette mesure, ainsi que de nouvelles contributions relatives à l'avancée du développement pratique de cet instrument sont exposés.

Dans le premier chapitre de cette thèse, nous passons en revue les différentes propositions de la littérature au sujet de cette mesure. Nous déterminons ensuite les questions de cadrage d'un tel système. Nous montrons que l'allocation des permis à circuler échangeables doit être gratuite, uniforme et à l'échelle du foyer fiscal. Elle doit être basée sur un objectif quantitatif fixé en amont, selon le degré de localisation de la nuisance. Une phase d'apprentissage du marché est ensuite nécessaire afin d'éviter de répéter les erreurs d'anticipation constatées dans les marchés des

---

1. [http://www.assemblee-nationale.fr/dyn/15/textes/l15b3164\\_proposition-loi](http://www.assemblee-nationale.fr/dyn/15/textes/l15b3164_proposition-loi)

droits à polluer. L'avantage majeur du marché des permis à circuler échangeables est le nombre considérable d'agents. Ce nombre rend les échanges dans le marché mutuellement profitables et conditionne la dynamique des échanges.

Nous abordons aussi le rôle des nouvelles technologies dans ce système. Maintenant que les limites technologiques ne sont plus un frein à l'instauration des permis, nous montrons que la mise en place d'un tel système dans nos villes est envisageable. Nous signalons que la virtualité des permis est une condition nécessaire de stimulation, de contrôle, de fluidification et de modulation des déplacements. Ces nouvelles technologies permettent de diminuer les coûts de transaction du marché. Enfin, nous proposons une modélisation économique rendant compte de l'importance du montant de l'allocation initiale des permis sur la variation des choix modaux.

Dans le deuxième chapitre, nous analysons le comportement hypothétique des individus sur un marché fictif de permis à circuler échangeables. Ce marché régule les déplacements dans la ville de Montpellier. Nous avons créé une enquête-mobilité en ligne dans laquelle nous avons fait figurer un jeu d'enchères. Cette enquête a été proposée aux habitants de Montpellier et de son aire urbaine. Le principal objectif de ce jeu est de trouver les consentements individuels à payer des permis si les individus n'en possèdent plus pour pouvoir se déplacer en mode "lourd". Il s'agit également de trouver les consentements à recevoir afin que d'autres individus cèdent des permis s'ils en détiennent trop. Le croisement de ces consentements nous permet d'élaborer les courbes d'offre et de demande de permis des individus de notre enquête. Avec toutes les précautions d'usage, nous observons des effets similaires au péage urbain sur les choix de déplacement, sans la contrainte financière qu'un péage urbain imposerait. En effet, le prix de marché hypothétique de ces permis est inférieur au montant de la plupart des péages urbains déjà mis en place. Ce prix de marché dépend toutefois de l'enchère initiale de l'enquête.

Il apparaît que ce marché indispose une frange d'individus qui ne peut pas acheter les permis nécessaires pour continuer à se déplacer usuellement. En effet, un individu peut se détacher lui-même du marché par "conviction" afin de signaler un mécontentement à l'égard de la mesure. L'individu peut être aussi exclu du marché car son consentement à payer des permis est insuffisant vis-à-vis du prix d'équilibre du marché. Nous faisons appel aux analyses factorielles discriminantes afin de dégager les caractéristiques individuelles qui favorisent cette mise à l'écart volontaire ou cette exclusion du marché. Nous proposons alors des mesures complémentaires et/ou compensatoires afin d'améliorer le fonctionnement et l'acceptabilité des permis.

Dans le troisième chapitre, nous proposons une application économétrique caractérisant les déterminants de l'acceptabilité des permis à circuler échangeables. La base de données de cette application est issue de notre enquête-mobilité. Nous signifions que l'acceptabilité d'une mesure est d'autant plus élevée que celle-ci n'est pas restrictive. Nos résultats indiquent que l'acceptabilité des permis est plus forte que celle des péages urbains. Nous montrons également que l'acceptabilité des permis est bien plus influencée par la croyance des individus concernant les effets hypothétiques de l'instrument sur la mobilité urbaine que par leurs caractéristiques socio-démographiques. Une croyance a d'autant plus d'impact sur cette acceptabilité que celle-ci concerne une nuisance directement observable et qui impacte le coût généralisé de déplacement de l'individu. Ce constat est le même pour une nuisance non-observable directement, mais où la majorité des individus s'accordent à dire qu'un instrument de politique publique peut lutter contre la prolifération de la nuisance. Des campagnes de communication au sujet des effets bénéfiques individuels des permis peuvent alors améliorer l'acceptabilité de la mesure.

La conclusion générale de cette thèse fait l'objet de trente propositions à destination des pouvoirs publics, pour la mise en place d'un système de permis à circuler échangeables.

# Chapitre 1

Éclairages théoriques, digitalisation  
et modélisation économique des  
permis à circuler échangeables

## Résumé

Ce chapitre a pour vocation de mettre en lumière les aspects théoriques d'un instrument de gestion directe de la mobilité urbaine apparu à la fin des années 1990 et méconnu de la population : les permis à circuler échangeables (PCE). Il s'agit d'une quantité non-monnaire prélevée à l'utilisateur pour qu'il puisse se déplacer. Cette quantité peut l'autoriser à utiliser un réseau (e.g. l'ensemble des routes d'une ville, un pont ou une voie rapide) en un temps, un mode et un espace prédéfini. Elle peut aussi l'autoriser à collecter une ressource (e.g. le carburant). C'est alors un rationnement de la mobilité. Cette dernière engendre des nuisances collectives qui peuvent être maîtrisées par un objectif quantitatif soutenable. Cet objectif est une limite à ne pas dépasser collectivement (e.g. un nombre de déplacements, de véhicules-kilomètres ou d'émissions de CO<sub>2</sub>).

Ces PCE contournent les méfaits de la taxation et des péages urbains. Ils incitent à des comportements vertueux de mobilité, sans pour autant ponctionner le budget des ménages et entraver leur droit à la mobilité minimale. Ces caractéristiques rendent cet instrument de politique publique socialement plus acceptable et plus désirable que le péage urbain. Les PCE s'inspirent d'une littérature plus ancienne des années 1960 sur les droits des firmes à polluer.

Après avoir passé en revue les propositions de la littérature, nous posons les principales questions de cadrage de ce système n'ayant pas encore vu le jour dans nos sociétés urbaines. Une nuisance collective diffuse (e.g. la pollution atmosphérique) n'entraîne pas la création du même type de PCE qu'une nuisance localisée dans un espace urbain (e.g. la congestion). L'échange de PCE est mutuellement bénéfique pour tous les individus par les avantages – monétaires ou non – qu'il procure, à la condition d'une dotation gratuite et uniforme des PCE au sein des foyers fiscaux du périmètre d'étude considéré. Les coûts de transaction des PCE sont supérieurs à

ceux engendrés par les instruments "classiques" de politique publique de mobilité. L'intervention des pouvoirs publics est alors nécessaire à la création et au bon fonctionnement du système et du marché associé. Par les expériences passées à l'échelle des firmes, notamment américaines et européennes, nous essayons ensuite de tirer des leçons sur les conditions de fonctionnement du marché des PCE. Une phase d'apprentissage du marché est nécessaire afin de résorber les erreurs d'anticipation sur les usages que les individus feront des PCE. Les lois de l'offre et de la demande de PCE prendront ensuite le pas dans une phase de maturité du marché.

Nous montrons par ailleurs que le marché des PCE possède l'avantage d'un grand nombre d'agents économiques. Ces agents accordent de plus en plus d'importance à l'accès à la mobilité plutôt qu'à la possession du mode de mobilité. Cet accès est facilité par le foisonnement des plateformes virtuelles d'échange de mobilité. La virtualité du PCE est alors la condition de stimulation, de contrôle, de fluidification et de modulation des mobilités quotidiennes. Le rôle des nouvelles technologies est donc multiple. Celles-ci induisent notamment une baisse des coûts de transaction du système de PCE. La plateforme de marché proposant ces actifs immatériels doit faire face à de nombreux défis innovants. Elle se confronte également à des problématiques de gestion et d'utilisation des données.

Enfin, nous élaborons un modèle économique rendant compte de l'impact d'un système de PCE journaliers sur les choix modaux des individus. Nous relevons l'importance de l'allocation initiale des PCE sur le report modal. Afin de poursuivre un objectif de mobilité urbaine durable, l'allocation initiale et globale de PCE ne doit pas excéder le nombre d'automobilistes se déplaçant dans la période qui précède la mise en place de la mesure.

**Mots-clés** : mobilité urbaine durable, permis à polluer, permis à circuler échangeables, domestication, marché d'échange, nouvelles technologies.

## **Introduction**

Les dispositifs numériques toujours plus sophistiqués font émerger de nouvelles façons d’interagir avec le monde qui nous entoure. Le télétravail, ainsi que les achats et les démarches en ligne sont quelques exemples contemporains. La mobilité urbaine reste malgré tout nécessaire au quotidien de chacun, qu’elle soit pour aller travailler, étudier, effectuer certaines démarches administratives, acheter ou encore se distraire.

Par le déplacement des individus, par l’immobilité des modes de déplacement occupant toujours plus l’espace public et par la construction d’infrastructures pouvant gêner la vue mais aussi et surtout la vie des riverains, la mobilité engendre des nuisances collectives instantanées et dans le temps (Verhoef et al. (1997) [99]). Ces nuisances impactent deux ensembles d’agents économiques. Le premier ensemble est celui qui se déplace, au même moment et/ou au même endroit que celui qui émet l’externalité. La congestion, le bruit, les accidents de la route, les comportements dangereux et la gêne sur la voie publique en sont des exemples. Le second ensemble est la société dans sa globalité, elle-même impactée par les nuisances en tant que phénomènes diffus. La pollution atmosphérique en est l’exemple le plus célèbre. D’autres nuisances peuvent être évoquées, comme la dégradation des infrastructures et des paysages, ainsi que les effets de coupure (Mirabel & Reymond (2013) [65]).

De nombreux instruments de politique publique ont vu le jour afin de réguler cette mobilité. Plusieurs exemples seront exposés dans ce chapitre. Certains contiennent des effets contrastés, d’autres sont inéquitables et la plupart ne sont pas acceptés par la population. Les collectivités ont mis en place par le passé des mesures rapides. Ces dernières cherchaient à satisfaire le plus grand nombre. Ces mesures étaient parfois prises en corrélation temporelle avec les échéances électorales, mais s’avéraient finalement peu efficaces. L’implication d’une participation

citoyenne doit être priorisée, dans l'espoir d'une acceptabilité accrue des mesures prises.

Ce premier chapitre est motivé par trois constats. Le premier, sur l'usage de la technologie, nous indique que le développement des instruments numériques (e.g. ordinateurs, smartphone et connexion Internet) permet aux usagers de devenir eux-mêmes des acteurs de la mobilité. Mieux informés, ils sont déjà, via des réseaux non-institutionnels, "producteurs" de déplacement (avec le covoiturage, par exemple). Le second, technique, nous montre que certains outils – pour l'instant plutôt couchés sur du papier qu'appliqués dans les villes – peuvent désormais être mis en œuvre. L'avènement des réseaux intelligents offre enfin la possibilité de réduire des coûts de transaction jusqu'alors trop élevés. Enfin, le dernier constat est l'apparition d'un mouvement social français qui a débuté à la fin de l'année 2018 : celui des "Gilets Jaunes". Ce mouvement de mécontentement général est issu d'une certaine "combustion sociale" où l'augmentation du prix du carburant fut le combustible. Cette mesure classique de désincitation à l'usage de la voiture fut particulièrement mal reçue par la population en raison de son impact sur le budget des ménages.

Ces constats nous motivent alors à effectuer une étude théorique relative aux permis à circuler échangeables (PCE), pour ensuite développer des perspectives pratiques de cette mesure. Cet instrument de politique publique de mobilité, dont le périmètre géographique peut être restreint (une ville, un quartier, une infrastructure) ou étendu (un pays, une union de pays) peut jouer un rôle-clé dans l'horizon d'une mobilité urbaine soutenable.

La problématique de recherche de ce sujet est la suivante : dans une optique de mobilité urbaine plus soutenable, le fait d'associer un comportement de mobilité à un prix à payer introduit certains obstacles tels que (1) l'iniquité du prix pour l'accès à un bien collectif; (2) la méfiance à l'égard de l'affectation des recettes;

et (3) une certaine élasticité-prix faible de la demande de mobilité urbaine à court et moyen terme (Verhoef et al. (1997) [99]; Raux & Marlot (2005) [84]; Musso et al. (2006) [68]; Raux (2007) [79]). Il est désormais technologiquement possible de mettre en place un système de PCE dépassant ces obstacles, rendant l'instrument plus acceptable socialement. Comment les PCE peuvent-ils pérenniser la mobilité urbaine ? Parallèlement, quelle est la singularité des nouvelles technologies dans le fonctionnement des PCE ?

La première section de ce chapitre passe en revue les différentes propositions de permis à consommer figurant dans la littérature scientifique, au-delà du champ de la mobilité. Nous définissons le champ d'action qu'ont les autorités pour moduler la mobilité. La domestication et la possibilité d'échange de ces permis vont alors nous guider vers le concept de PCE. La deuxième section du chapitre est consacrée à l'élaboration des principales questions de cadrage du système de PCE. Ce travail s'effectue en vue d'une éventuelle application dans les villes. Les axes principaux de cette section sont les caractéristiques nécessaires de ces permis, l'allocation, l'identification des receveurs, la définition du marché d'échange et la dynamique du prix du permis. Les évolutions technologiques et leurs conséquences sur les comportements de déplacement des individus nous conduisent à nous interroger, dans cette même section, sur le rôle que doivent occuper les nouvelles technologies dans la mise en pratique des PCE. Enfin, une dernière section est consacrée à une modélisation économique des PCE. Ce modèle relève l'importance de l'allocation initiale des PCE sur les choix modaux.

# 1 Définition du caractère incitatif des échanges domestiques de permis à circuler

## 1.1 Leviers d'action sur l'offre et la demande de mobilité urbaine

Il existe un certain besoin de déplacement des biens et des personnes dans les villes. Ce besoin, pour soi-même ou pour autrui, forme la demande de mobilité urbaine. Avant un déplacement, les individus doivent faire des choix. Ils portent notamment sur le mode de déplacement, l'heure de départ, la destination et l'itinéraire. Ces choix étant interdépendants, la sélection d'une combinaison de ces choix est alors doublement contrainte. En effet, le panier de choix est conditionné par des contraintes propres à l'individu et son ménage (e.g. budget-mobilité, emploi du temps, capacités motrices, possession d'un mode de déplacement, volonté de s'informer, flexibilité et contraintes familiales) mais aussi par des contraintes urbaines et environnementales (e.g. conditions de trafic et météorologiques, possibilité de se garer en voiture, existence d'un service de transport collectif ou d'une piste cyclable, et mise à disposition de modes de déplacement).

Le choix du déplacement pourra faire appel aux capacités individuelles de déplacement et/ou à un service de mobilité. Différents services sont proposés à l'individu. De manière non-exhaustive, nous pouvons évoquer les services de transports collectifs, la mise en location de vélos ou de véhicules, et les services de livraison. Ces multiples services appartiennent à l'offre de mobilité. Ils peuvent être également proposés par la demande de mobilité elle-même. Le covoiturage en est l'exemple le plus contemporain. La demande de mobilité urbaine est alors contrainte à effectuer

son déplacement par l'offre mise à sa disposition ou par les modes de déplacement qu'elle possède.

Certains éléments peuvent cependant faire basculer les choix de déplacement et permettent à la demande latente de s'exprimer. Nous pouvons par exemple mentionner la mise en œuvre de nouveaux services, la construction de nouvelles infrastructures, ou encore l'implémentation de mesures publiques relatives à la mobilité et à l'aménagement des habitats et des espaces socioéconomiques. Tous ces éléments sont des leviers d'actions sur la mobilité urbaine. Dans des perspectives de soutenabilité de la mobilité, ils doivent être clairement identifiés.

Ces leviers sont évidemment nombreux. Verhoef et al. ((1996) [98]; (1997) [99]) nous proposent une grille de lecture de ces leviers. Selon les auteurs, un levier sera d'autant plus efficient que le régulateur identifiera précisément le coût marginal externe du déplacement, pour adapter la politique de mobilité à ce coût externe. Dans le cas où l'identification du coût externe est parfaite, l'instrument sera considéré efficient et les auteurs parlent alors d'une "*first-best policy*". Dans la réalité, ce type de levier est souvent impossible à mettre en pratique et l'optimum de premier rang ne peut être atteint. D'autres instruments, moins efficients mais plus simples à mettre en place, existent. Trois familles d'instruments sont proposées.

D'une part, **les autorités ont la possibilité de mettre en place des instruments influençant directement la demande de mobilité urbaine ("*Direct demand management policies*")**. La taxation, les péages, les permis, les restrictions d'usage et les messages informatifs ont la volonté commune d'informer l'utilisateur sur son comportement de mobilité. Cette information peut être simplement un message descriptif et/ou normatif. L'objectif de ce type de message est d'inciter les individus à adopter des comportements de mobilité plus vertueux (e.g. campagnes publicitaires et message sur les polluants émis lors d'un déplacement sur un titre

de transport). Il apparaît toutefois que, pour la plupart des instruments de cette famille, l'information traduit la volonté des autorités de faire "payer" aux usagers les effets externes de leurs comportements de mobilité et de la surconsommation des usages. L'objectif est alors d'augmenter le coût généralisé du déplacement, afin de diminuer la demande de mobilité sur le mode et le réseau concerné. De tels leviers peuvent impacter le budget des ménages. Ils se distinguent en deux groupes :

- L'information reflète une valeur monétaire correspondant à un prix à payer. Ce prix équivaut à la valeur de l'usage d'une infrastructure, l'accès à une zone et un réseau, ou l'achat de consommables (e.g. péage urbain, péage autoroutier, taxe intérieure de consommation sur les produits énergétiques (TICPE) et achat d'un droit horaire de stationnement).
- L'information reflète une valeur non-monétaire correspondant à une quantité à prélever ou à ne pas dépasser. Cette quantité rationne alors les usages de la mobilité. Elle peut prendre la forme d'une limitation de vitesse afin d'agir sur la courbe débit-vitesse d'un flux routier, d'autorisations à circuler (e.g. selon la parité de la plaque d'immatriculation ou selon une vignette de pollution), de quotas autorisant à consommer une ressource ou de quotas de circulation.

D'autre part, **la demande de mobilité urbaine peut être impactée par les propositions des services de transports alternatifs, les politiques socioéconomiques, mais aussi la construction et la destruction d'infrastructures ("*Indirect demand management policies*")**. Dans ce cas, c'est l'offre de mobilité qui influence les choix de déplacement de la demande, sans qu'il y ait nécessairement eu une quelconque action des autorités publiques. Plusieurs initiatives peuvent être citées : le développement d'un réseau de transport collectif, la construction de pistes cyclables, la mise en place de voies dédiées au covoiturage, les propositions des nouvelles formes de mobilité et de communication, ou encore la réorganisation des lieux et des temps de travail ou de loisir. Le numérique peut alors avoir un rôle

dans la réorganisation spatiale et temporelle des journées d'un individu, en favorisant notamment les activités à distance. Ces mesures ne peuvent pas se substituer aux instruments de gestion directe de la demande. Plus encore, nous considérons que la réussite des instruments de gestion directe de la demande de mobilité peut être conditionnée par la mise en place d'instruments de gestion indirecte de la demande de mobilité.

Enfin, **les autorités peuvent réglementer et réguler directement les activités des acteurs en amont de la chaîne de mobilité, avec une répercussion indirecte sur la demande de mobilité associée ("Supply-side-oriented policies")**. Nous pouvons distinguer trois catégories d'acteurs impactés directement par ces mesures : l'industrie pétrolière, de la construction et de l'automobile. Cette offre directe ou indirecte de mobilité peut en effet être soumise à des restrictions réglementaires. Nous pouvons évoquer les normes de construction des infrastructures routières et des automobiles, l'incitation à la production de véhicules énergétiquement plus efficaces, les règles imposées au raffinement du pétrole et les quotas d'automobiles polluantes autorisées à être produites. La demande de mobilité est alors contrainte indirectement dans ses choix, notamment modaux et de destination, par cette offre de mobilité contrainte elle-même.

Un accroissement de la mobilité douce n'est pas garanti par toutes ces propositions. Par exemple, ajouter des infrastructures routières dans une ville procure à long terme l'effet inverse que celui du désengorgement des voies (Downs (1962) [34]) : l'offre routière crée sa propre demande. De même, proposer des véhicules plus efficaces énergétiquement ne permettra pas d'endiguer la congestion : par exemple, une unité spatiale de voiture "polluante" est une même unité spatiale de voiture électrique. Ces exemples montrent que l'identification des externalités que l'on choisit de traiter est la condition *sine qua non* du choix des politiques publiques à mettre en œuvre et, partant, la condition de réussite de la maîtrise de la mobilité.

## **1.2 Influencer la demande de mobilité urbaine par la quantité plutôt que par le prix : conceptualisation du permis à consommer**

*Cette thèse est vouée à étudier les choix de déplacement des individus soumis à une nouvelle contrainte. Il s'agit du rationnement de l'automobilité. Nous considérerons alors à présent, par abus de langage, la demande de mobilité urbaine comme étant la demande de déplacement d'un individu pour lui-même ou pour son ménage.*

La gestion directe de la demande de mobilité urbaine peut faire référence à des mesures coercitives par l'intermédiaire d'un prix ou d'une quantité. Le prix engendre un prélèvement monétaire lorsque l'individu accepte les termes du contrat implicite qui le lie à un détenteur des infrastructures ou d'un réseau, à un service de mobilité, ou à un fournisseur de ressources consommables lui permettant de se déplacer.

Le prélèvement monétaire pour l'usage du véhicule particulier fait généralement référence aux taxes. Ces dernières s'appliquent aussi bien aux ressources polluantes et/ou non-renouvelables qu'aux modes en eux-mêmes. Nous faisons également référence aux péages, qu'ils soient environnementaux ou de nature à financer une infrastructure. Selon Raux (2007) [79], ce prélèvement censé être neutre, incitatif et redistribué est faiblement accepté par la population. Une des origines de cette faible acceptabilité est la méfiance relative à la redistribution de la recette engendrée par la mesure au profit de l'exploitation et du financement des infrastructures de transport, mais aussi du développement des transports alternatifs. En même temps, les ménages les plus aisés sont relativement moins sanctionnés par ce prélèvement puisqu'ils sont moins contraints par leur revenu que par leur temps disponible. Notons enfin que l'élasticité-prix de la demande est faible à court et moyen terme (Verhoef

et al. (1997) [99]; Raux & Marlot (2005) [84]), rendant le signal-prix moins puissant pour des politiques de gestion quotidienne de la mobilité urbaine.

Il semble que le prélèvement quantitatif permette de contourner ces obstacles. Il peut se définir comme étant le prélèvement d'une quantité non-monnaire pouvant avoir un équivalent monétaire si la quantité est commercialisable. Nous pouvons considérer cette quantité comme étant des permis, des quotas, des crédits, ou encore des jetons que l'individu doit céder pour exercer ses déplacements à un temps donné, sur le réseau routier considéré et avec le mode de déplacement concerné. L'exercice de la mobilité est effectué sous une contrainte collective de non-dépassement d'un objectif quantifiable, maîtrisable et certain (e.g. émissions d'un polluant, nombre de véhicules sur un périmètre espace-temps donné ou consommation d'énergies fossiles).

Cette quantité peut être allouée directement à l'utilisateur sous la forme de permis à consommer l'espace, à user des ressources polluantes, ou encore à émettre des particules socialement indésirables. Ces permis sont ainsi la traduction d'un objectif collectif de soutenabilité de la mobilité quantifié à l'échelle de l'individu. Verhoef et al. (1996) [98] évoquent cet instrument comme étant une "*first-best policy*" socialement réalisable, à la condition que la différenciation des usagers soit adéquate et les coûts de transactions soient maîtrisés.

Par cette quantité allouée à l'utilisateur, le budget des ménages n'est pas ponctionné pour que les individus assurent leur droit à la mobilité minimale. Cette quantité allouée est supposée gratuite, jusqu'à une certaine limite, pour contourner les méfaits du prélèvement monétaire. Par conséquent, le permis à consommer individuel possède une meilleure acceptabilité de la population par rapport à celle de la taxation, ainsi qu'une meilleure équité (e.g. Verhoef et al. (1996) [98]; Mayeres & Proost (2002) [61]; Wadud et al. (2008) [103]; Dogterom et al. (2018) [32]). De surcroît, si ce permis est échangeable sur un marché, cela peut inciter les individus à ne pas

consommer de permis pour en retirer une éventuelle contrepartie monétaire ou toute autre sorte d'avantage.

Les usagers contribuant à l'effort environnemental sont alors récompensés financièrement, alors qu'un péage pénalise les autres individus et engendre une recette directement collectée par les autorités publiques (OCDE (2001) [76]). En même temps, dans le fameux principe de "pollueur-payeur", le signal-prix demeure dans les pratiques d'usage des permis. L'individu doit acheter des permis s'il souhaite en avoir davantage pour se déplacer. Le signal-prix traduit alors, pour l'individu et dans le périmètre des permis, une surconsommation de l'espace, une surconsommation des ressources, ou une surémission de polluants. Le permis à consommer permet, *in fine*, l'internalisation d'une ou plusieurs externalités qu'il conviendra d'identifier, sans un flux financier entre les individus et les autorités lorsque celui-ci est échangeable dans un marché (Brands et al. (2020) [10]).

Trois difficultés générales sont à signaler. La première est d'ordre lexical et a été évoquée dans la préface de l'ouvrage de Charles Raux (2011) [81] par Alain Bonnaufous. Les permis individuels sont, somme toute, une forme de rationnement. Ce terme renvoie à une époque sombre de l'histoire mondiale du XX<sup>ème</sup> siècle avec les tickets de rationnement. La lisibilité, la clarté et le détachement de cette analogie sont les premières conditions de réussite du système de permis individuels, avant même d'évoquer son mode de fonctionnement.

La deuxième difficulté est la suivante : le coût de réduction de la pollution de chacun des usagers ou des firmes n'est plus fixé par une taxe. Néanmoins, selon Raux (2007) [79], trois éléments plaident en faveur des permis face à la taxe :

- Dans un scénario pessimiste d'augmentation importante des émissions de polluants, les permis "*minimisent le coût des erreurs d'appréciation par comparaison avec la taxe*".

- Le signal quantitatif s'avère plus efficace que le signal-prix sur des comportements de déplacement quotidiens.
- Avoir des usagers hétérogènes (notamment par leur valeur du temps) peut rendre les échanges de permis mutuellement profitables. C'est le principe même du marché des permis. Autrement dit, dans la préface de l'ouvrage de Raux (2011) [81] écrite par Alain Bonnafous, *"Pour un niveau prédéterminé d'émission, il y a ainsi un avantage collectif dans le fait que les émetteurs dont les coûts de dépollution sont très élevés peuvent, par l'achat de permis, choisir de financer chez un autre une réduction d'émission équivalente mais moins coûteuse."*

La troisième difficulté porte sur les coûts de transaction et d'apprentissage supérieurs à ceux supportés lors de la mise en place d'une taxe (Fan & Jiang (2013) [37]). D'après la version forte du théorème de Coase (1960) [18], comme les coûts ne sont pas négligeables, le marché ne peut pas générer lui-même les signaux qui modifieront les permis de façon à internaliser l'externalité. L'existence de ces coûts influencent les résultats des instruments de régulation (Tietenberg (1980) [97]) et peuvent faire dévier l'équilibre recherché (Nie (2012) [71]). L'allocation n'étant pas Pareto-optimale, l'intervention de l'État est nécessaire. Nous montrons plus loin que les nouvelles technologies peuvent aussi faire diminuer les coûts et améliorer la structure de ceux-ci. Il apparaît toutefois que, bien que la taxe ait un coût d'implémentation plus faible et engendre des pertes moindres sur le budget des autorités, les gains procurés par les permis échangeables supplantent les avantages de la taxation et du péage (Raux & Marlot (2005) [84]).

## **1.3 État de l'art des échanges de permis**

### **1.3.1 Panorama des premiers permis régulateurs des ressources et des émissions de polluants**

Les permis, parfois commercialisables et échangeables, font l'objet d'une littérature abondante et relativement récente. Celle-ci débute avec les travaux de Coase (1960) [18] sur le traitement des externalités, la définition des responsables des nuisances, l'identification des coûts sociaux et les droits de propriété. Les premières applications des permis ont émergé dans le but de répondre aux problématiques de gestion de la pollution et des ressources naturelles : les émissions dans l'atmosphère avec Crocker (1966) [22] et l'eau avec Dales (1968) [25] [26]. Montgomery (1972) [66] a ensuite proposé une première formalisation de cet instrument. Il a mis en évidence l'existence d'un équilibre du marché des permis. Il a également montré qu'il est possible d'implémenter cette politique par des dépenses efficaces. Tietenberg (1980) [97] est l'un des premiers auteurs à présenter une grille de lecture du design de ces permis, pour la régulation de la pollution de l'air.

La première application majeure des permis à polluer figura aux États-Unis d'Amérique, sous les directives de l'Acid Rain Program de 1990, dans le tome IV du Clean Air Act. Ce dernier est un ensemble de lois nationales environnementales actualisées depuis 1963. L'apparition de pluies acides dans le pays a eu des conséquences désastreuses sur la faune et la flore du pays. Cet événement a motivé la création de quotas autorisant l'émission d'une certaine quantité de dioxyde de soufre. Un marché de quotas transférables entre firmes fut ainsi créé. Toutefois, les échanges de quotas ont eu du mal à s'effectuer. Les firmes ont plutôt effectué des efforts solitaires de réduction des émissions, impliquant un prix de marché relativement bas par rapport aux anticipations de la dynamique du marché lors de sa

conception (Joskow et al. (1998) [54]; Schamlensee et al. (1998) [88]; Menz & Seip (2004) [63]; Berta (2010) [9]).

En Europe cette fois-ci, le marché européen du carbone a pour objectif de maîtriser les émissions de gaz à effet de serre. L'existence d'intermédiaires financiers a augmenté la spéculation et le nombre global de transactions sur ce marché créé en 2005. Une certaine volatilité du prix du carbone a été constatée, rendant l'équilibre concurrentiel du marché impossible à anticiper. Deux éléments témoignent du dysfonctionnement de ce marché : le caractère isolé du marché européen ainsi qu'une allocation trop importante de permis en phase initiale du marché. Le prix du carbone a dégringolé après l'annonce de cet excédent d'offre de permis sur le marché, seulement un an après sa mise en place (Convery & Redmond (2007) [20]; Berta (2010) [9]). Au-delà de la gestion des ressources polluantes, la régulation de biens communs peut aussi faire appel à l'usage des permis. C'est notamment le cas dans la gestion de la pêche par l'intermédiaire de quotas de pêche (Newell et al. (2005) [70]; Costello et al. (2008) [21]).

Cela dit, dans les exemples présentés, les acteurs principaux du marché des permis sont des firmes. Le nombre d'acteurs économiques y est relativement faible. Le fait d'avoir peu d'acteurs sur le marché diminue les coûts administratifs, d'information et de transaction sur le marché des permis. La mise en place du système est alors plus aisée, et les barrières d'acceptabilité sont plus faciles à franchir (Grayling et al. (2006) [47]; Michaelis & Zerle (2006) [64]). Toutefois, cette application à la partie "*upstream*" de la chaîne de production et d'acquisition aura forcément des répercussions en termes de prix sur la partie "*downstream*", notamment les ménages (Raux (2008) [80]). Par ailleurs, avec la limite de pollution qui serait imposée aux firmes par les permis, l'effort collectif de dépollution de la production des firmes ne sera pas maximal mais seulement transférable d'une firme à l'autre moyennant un

mécanisme d'échange. Un mécanisme de normes réglementaires aura ainsi plus de sens pour les firmes.

Fleming (1996) [42] est l'un des premiers à proposer des permis transférables domestiques, c'est-à-dire à l'échelle des ménages. Ces permis ont pour vocation de réduire la quantité de carbone vouée à la consommation d'énergie au Royaume-Uni. La consommation des ménages est doublement impliquée, puisque ceux-ci ont besoin d'énergie dans leur habitation mais aussi pour se déplacer. Dans le cadre d'un objectif annuel de réduction de la consommation de carbone, des quotas correspondant chacun à un kilogramme de dioxyde de carbone ( $CO_2$ ) seraient distribués aux ménages. Ces quotas seraient mis aux enchères pour les firmes. La consommation de carburant et d'électricité nécessiterait le prélèvement de quotas, par une règle proportionnelle entre la consommation de ces ressources et les émissions de  $CO_2$  associées.

Un marché de quotas est ainsi imaginé afin que des échanges soient effectués entre des offreurs et des demandeurs de quotas. Les offreurs de quotas seraient les individus ou les firmes n'ayant pas besoin de la totalité de leurs quotas pour consommer de l'énergie. Les demandeurs de quotas seraient les individus ou les firmes ayant besoin de plus de quotas que le nombre de quotas alloués initialement. Il convient néanmoins de dissocier le marché des particuliers de celui des firmes. Par leur taille, les firmes ont une capacité d'achat plus forte que les ménages (Watters & Tight (2007) [107]). D'autres études ont par ailleurs été effectuées sur ces quotas domestiques de carbone (e.g. Fawcett (2004) [39]; Starkey & Anderson (2005) [93]; Watters (2005) [106]; Watters et al. (2006) [108]; Capstick & Lewis (2010) [16]; Wadud (2011) [102]).

### **1.3.2 Revue de la littérature des permis dans le domaine des transports et de la mobilité**

Plusieurs exemples de permis peuvent être cités dans le domaine des transports, avant d'aborder de manière précise les permis domestiques dans le domaine de la mobilité. Il existe des permis non-échangeables, notamment des autorisations d'acquisition d'un mode de déplacement ou des laissez-passer dans une zone réglementée.

À Singapour, territoire densément peuplé dans un périmètre restreint et soumis à des phénomènes récurrents de congestion, l'achat d'un véhicule est conditionné par l'acquisition d'une licence (Phang (1993) [77]; Koh & Lee (1994) [59]; Chin & Smith (1997) [17]). Actuellement, le nombre de licences mises aux enchères dépend du nombre de véhicules retirés du parc automobile de la cité-État. La demande de licence étant supérieure à l'offre, le prix global d'acquisition d'un véhicule standard (comprenant l'achat du véhicule et de la licence) est équivalent au prix d'achat d'un véhicule haut de gamme en France.

Rothengatter (1990) [86] suggéra quant à lui la mise en place de certificats autorisant la vente de véhicules. Ces véhicules sont préalablement classés en fonction de leurs émissions de polluants. Avant la mise en vente des véhicules produits, le constructeur devrait s'acquitter d'un montant du certificat d'autant plus élevé que le véhicule polluera dans l'espace public.

Parmi les permis transférables, nous pouvons évoquer l'attribution des slots aériens dans les aéroports pour la régulation du trafic aérien entrant et sortant. Ces slots peuvent être vendus ou échangés entre les compagnies aériennes (Morrisson et al. (1989) [67]; De Wit & Burghouwt (2008) [29]; Fukui (2010) [44]).

L'acquisition d'une licence de taxi en France, ou autorisation de droit de stationnement, fonctionnait également en partie selon un principe de transférabilité. Le nombre de licences de taxi étant restreint au niveau national, tout nouveau chauffeur

de taxi voulant exercer ce métier était confronté à deux solutions. Celui-ci pouvait s'inscrire sur une liste d'attente en mairie ou acheter une licence à un chauffeur de taxi qui souhaitait mettre un terme à son exercice, au prix que ce dernier avait fixé. La valeur de ces licences ayant explosé au fil du temps, une régulation des nouvelles licences a été imposée. Depuis le mois d'octobre 2014, les nouvelles licences ont une durée de validité finie et sont devenues inaccessibles<sup>1</sup>.

Nous voyons dès lors que, dans le secteur des transports, la trop grande rareté des permis engendre un prix déraisonnable de ceux-ci. Ce constat est encore plus marqué lorsque le nombre d'acteurs est réduit. Cette rareté transforme même le permis en droit de propriété. Pourtant, le permis n'est pas un droit de propriété, mais "*une restriction des droits là où ils étaient illimités*" (Godard & Henry (1998) [45]).

La domestication des permis dans la mobilité est arrivée peu de temps après les travaux de Fleming (1996) [42]. L'avantage d'une domestication des permis réside dans un nombre d'acteurs potentiellement important, rendant alors les échanges dans un marché des permis mutuellement profitables. Des permis domestiques appliqués à la mobilité urbaine s'apparentent alors à des quotas de circulation dans un espace et dans une période de temps définis. Nous utiliserons dès lors le terme de permis à circuler et, lorsque celui-ci est échangeable, de permis à circuler échangeable (PCE).

Plusieurs types de permis domestiques ont été proposés dans le domaine de la mobilité urbaine. Certains sont seulement acquérables, d'autres sont échangeables. Fan & Jiang (2013) [37] ont proposé une classification de ces permis selon plusieurs caractéristiques. Nous retrouvons cette classification en figure 1.

---

1. [https://www.legifrance.gouv.fr/jorf/article\\_jo/JORFARTI000029527187](https://www.legifrance.gouv.fr/jorf/article_jo/JORFARTI000029527187)

## 1. Définition du caractère incitatif des échanges domestiques de permis à circuler

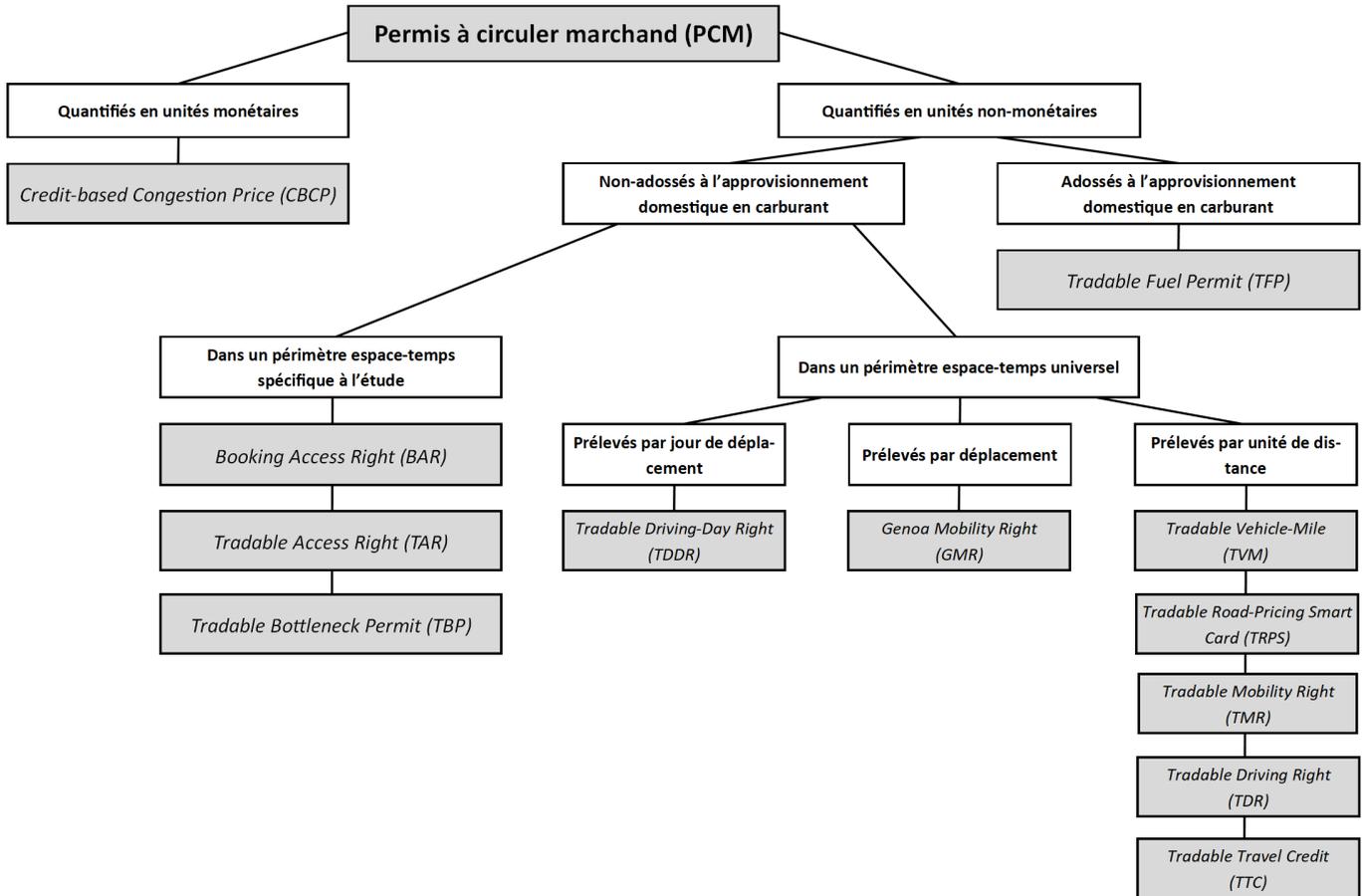


Figure 1 – Classification des permis à circuler selon Fan & Jiang (2013)

On entend par permis à circuler marchand (PCM), ou "*Tradable Mobility Permit*" (TMP), un permis pouvant s'acquérir sur un marché, sans être nécessairement transférable une fois acquis (Goddard (1997) [46]; Verhoef et al. (1997) [99]; Wong (1997) [109]). La première distinction de classification de l'ensemble de ces permis repose sur l'unité de quantification de ces permis, monétaire ou non.

L'exemple de permis exprimé en unités monétaires proposé dans cette classification est le "*Credit-Based Congestion Price*" (CBCP) de Kockelman & Kalmanje (2005) [58]. Le système CBCP repose sur des crédits mensuels exprimés en unités monétaires. De manière hypothétique, ces crédits sont distribués uniformément aux détenteurs d'un permis de conduire afin qu'ils puissent effectuer des déplacements en voiture à Austin, aux États-Unis d'Amérique. Dans ce système, dès lors que les in-

dividus ont consommé l'ensemble de leurs crédits, les déplacements supplémentaires doivent se faire en s'acquittant d'un paiement. Une fois les recettes mensuelles de ce péage collectées, celles-ci sont redistribuées sous forme de crédits, de manière uniforme, à tous les titulaires du permis de conduire.

Le système est ainsi neutre au sens du revenu et redistributif. Si l'individu n'a pas consommé l'ensemble de ses crédits pour le mois en cours, celui-ci peut les échanger contre de l'argent. Le principal résultat de cette étude expérimentale est le fait que les jeunes, les individus ayant un faible revenu et les individus ne disposant pas de voiture sont plus à même d'économiser des CBCP. Le principal problème de cet instrument repose sur l'opportunité qu'ont les individus détenteurs d'un permis de conduire, mais qui n'ont pas de voiture, de gagner de l'argent sans avoir contribué à l'effort environnemental.

Les autres permis présentés dans l'article ne sont pas exprimés en unités monétaires. Parmi ceux-ci, la circulation des individus peut être rationnée par des permis adossés à l'approvisionnement domestique en carburant. Ce sont les "*Tradable Fuel Permits*" (TFP). Plusieurs auteurs ont contribué à l'étude de ces permis (e.g. Verhoef et al. (1997) [99]; Dobes (1999) [31]; Keppens & Vereeck (2003) [56]). Ces permis donnent le droit à l'achat d'une certaine quantité d'essence. Le nombre total de permis est calculé selon l'objectif quantitatif d'émissions de polluants que l'autorité vise.

Les avantages du TFP sont nombreux. D'une part, ce permis incite les individus à consommer moins d'essence, ceci ayant un impact sur le choix modal, de destination, de localisation, mais aussi sur les comportements de conduite. D'autre part, ce système est facile à mettre en place si l'on envisage la détention d'une carte à puce qui servira de support de prélèvement des permis par les détaillants en station-service. En cas d'oubli de la carte à puce, l'approvisionnement en carburant reste

possible en s'acquittant d'une taxe. Les individus non-résidents peuvent également payer cette taxe pour s'approvisionner. Cette taxe, suffisamment haute pour désinciter les individus à contourner le système de TFP, constitue alors un plafond naturel à la valeur d'un TFP (Verhoef et al. (1997) [99]). Par ailleurs, dans des perspectives de long-terme, ce type de permis peut déterminer la trajectoire et le développement de véhicules plus efficaces énergétiquement.

Cela dit, un tel système de permis peut inciter les individus à s'approvisionner en carburant dans un pays frontalier (Verhoef et al. (1997) [99]). Ce système peut également inciter les individus à recourir à un marché illégal. Par ailleurs, l'objectif d'une telle mesure ne doit pas être seulement une baisse de la congestion. Cette dernière n'est pas garantie si les véhicules thermiques sont tous remplacés par des véhicules électriques ne nécessitant pas de TFP.

Les TFP ne seront alors applicables qu'à grande échelle, pour des objectifs de réduction de nuisances qui ne sont ni localisées, ni dépendantes du temps. Enfin, un point de vigilance doit être relevé, celui des allocataires de ces permis. Une allocation par véhicule incite les individus à se procurer d'autres voitures, souvent plus anciennes et plus polluantes. Une allocation par titulaires du permis de conduire semble plus appropriée, même si les individus ne possédant pas de véhicule peuvent retirer des bénéfices de ce système sans contribuer à l'effort environnemental.

Le troisième niveau de classification des PCM distingue les propositions de permis en fonction du périmètre espace-temps, spécifique ou non à l'étude. La définition d'un périmètre pour les permis permet alors d'essayer de traiter les nuisances collectives localisées dans le temps et dans l'espace, telles que la congestion ou le bruit<sup>2</sup>.

---

2. De manière indirecte, la régulation du nombre de places de stationnement à disposition des automobilistes peut être une variable d'ajustement de la maîtrise de l'usage de l'automobile dans un espace prédéfini et un temps donné. Néanmoins, une restriction trop forte du nombre de places de stationnement peut générer des déplacements supplémentaires, notamment pour trouver une place ailleurs. Nous ne traiterons pas des permis pouvant être mis en place sur le stationnement des véhicules.

Trois propositions de permis où le périmètre espace-temps est spécifique à l'étude sont mises en exergue. Dans ce contexte, les permis s'apparentent à des autorisations d'accès à un réseau spécifique à l'étude. Le "*Booking Access Right*" (BAR) de Wong (1997) [109] repose sur un système de réservation en avance d'un créneau de passage sur l'autoroute considérée, afin de réguler la densité du trafic sur les voies. Bien que celui-ci ne soit pas commercialisable, ce permis en a inspiré d'autres, tel que le "*Tradable Access Right*" (TAR) de Buitelaar et al. (2007) [13]. Il s'inspire du modèle des slots aériens. Enfin, le "*Tradable Booking Permit*" (TBP) d'Akamatsu & Wada (2017) [2] propose d'appliquer des autorisations de circuler sur les goulots d'étranglement, avec une mise aux enchères de ces autorisations.

Deux problèmes majeurs se posent. D'une part, il existe pour ces trois instruments autant de types de permis que d'infrastructures considérées. Ceci peut rendre complexe la gestion individuelle d'un déplacement interurbain. D'autre part, l'attribution d'un créneau horaire laisse supposer que l'individu est capable de déterminer avec précision son heure de passage sur le réseau. Cette supposition est loin d'être exacte (Verhoef et al. (1997) [99]; Yang & Wang (2011) [115]). Enfin, *quid* des individus arrivant plus tôt que l'heure d'autorisation de passage ? La construction de grandes aires d'attentes routières est inconcevable.

En opposition à ces permis, des études ont exposé des permis plus universels, pouvant être utilisés sur l'ensemble d'un réseau, par exemple la voirie d'une ville. Le décompte de ces permis s'effectue par l'intermédiaire de trois unités quantitatives : le jour de déplacement, le déplacement lui-même et la distance parcourue lors du déplacement. Un permis journalier de déplacement a été proposé par Goddard (1997) [46] : le "*Tradable Driving Day Right*" (TDDR). Une automobile a le droit de pénétrer dans la ville trois jours par semaine, ces jours étant choisis par l'automobiliste lui-même. Cela dit, un tel permis ne permettra pas, ou permettra peu, d'observer une baisse de la congestion et des véhicules-kilomètres parcourus. En

effet, une partie des nuisances observées avant la mise en place de ce type de permis sera uniquement déplacée dans le temps. L'individu peut revoir son emploi du temps et reporter l'ensemble de ses déplacements hebdomadaires sur les trois jours d'autorisation de circuler. Les nuisances ne sont donc pas supprimées. Il n'y a pas non plus d'incitation à diminuer les distances parcourues, ni à éviter les déplacements en heure de pointe (Verhoef et al. (1997) [99]).

Les permis peuvent être aussi prélevés selon le trajet effectué. C'est l'exemple du "*Genoa Mobility Right*" (GMR) de Fiorello et al. (2010) [41]. L'objectif global de ce permis est de réguler les flux routiers entre différentes zones de la ville de Gênes en Italie. Le nombre de permis prélevés est fonction du trajet d'une zone à une autre, selon 3 critères de différenciation : la catégorie environnementale du véhicule, l'heure du déplacement mais aussi le niveau de service en transport collectif de la zone de départ à la zone de destination. Même si ce permis semble prometteur, il est très complexe à mettre en place.

Enfin, l'élaboration d'un système de prélèvement de permis selon la distance parcourue a fait l'objet de plusieurs études : le "*Tradable Vehicle-Mile*" (TVM) et le "*Tradable Road-Pricing Smart (Card)*" (TRPS) de Verhoef et al. (1997) [99]; le "*Tradable Mobility Right*" (TMR) de Viegas (2001) [100]; le "*Tradable Driving Right*" (TDR) de Raux (2008) [80] et le "*Tradable Travel Credit*" (TTC) de Yang & Wang (2011) [115]. Selon Verhoef et al. (1997) [99], les coûts marginaux externes à l'usage de la voirie dépendent surtout de la distance parcourue par l'automobile. L'objectif commun de ces permis est alors de prélever des permis en fonction de la distance parcourue par les automobilistes, évitant alors la problématique de l'éventuel report des activités dans le temps. Ces permis diffèrent par leur mode d'allocation. À titre d'exemple, l'allocation des TMR est en fonction des contributions fiscales des individus tandis que le TDR est gratuit pour tous les résidents de la ville.

Prélever les permis en fonction de la distance parcourue confronte l'individu à son usage (Verhoef et al. (1997) [99]). La distance est en effet une des unités quantitatives exprimant le déplacement. Deux difficultés sont toutefois à signaler. D'une part, un tel système entraîne des coûts d'implémentations importants. Il en est de même pour les coûts de suivi des distances parcourues. Les dispositifs déjà existants, notamment les stations de péage, peuvent venir en appui du système et réduire ainsi les coûts. D'autre part, ce système ne comporte aucune incitation à basculer vers des véhicules énergétiquement plus efficaces.

Une définition globale du permis à circuler peut enfin être donnée, en guise de conclusion à cette section. Ces permis sont le fragment individuel d'un objectif quantitatif collectif de régulation de la mobilité. Nous venons de le voir, la littérature a permis de mettre en place un certain cadre d'analyse globale de ces permis. Face à la taxation, l'avantage majeur de ces permis réside dans l'incitation qu'ont les individus à conserver des permis afin d'en retirer une contrepartie financière ou d'autre nature. L'échange est la clé de voûte et de stimulation de la demande de mobilité, souvent trop figée par l'optimisation non-séquentielle du déplacement habituel (Farag & Lyons (2014) [38]).

Ce caractère incitatif implique la modification des comportements de déplacement. Il est toutefois conditionné par l'existence d'un marché d'échange de permis. Relativement à un marché classique de permis entre firmes, ce type de marché concerne un très grand nombre d'agents économiques. Tous ces éléments nous motivent à élaborer les questions de cadrage du marché et du système en général. Il s'agit plus particulièrement d'évoquer l'identification des agents économiques dans le marché, l'allocation, l'échange des permis, la définition des objectifs de mobilité et la dynamique du prix du PCE. La section suivante traite ces questions.

## 2 Réflexions relatives à la mise en place des permis à circuler échangeables et du marché d'échange

D'après le théorème de marchandage de Coase (1960) [18], plusieurs conditions sont nécessaires pour qu'il y ait des échanges entre les individus dans un marché :

- Tous les individus concernés doivent participer à la négociation.
- Les individus peuvent réaliser des transferts monétaires entre eux.
- Les individus négocient sans frais.
- Il y a une hétérogénéité des individus, notamment en termes de coûts.
- Toute l'information est disponible et connue par tous les individus.
- Le marchandage existe tant qu'il est possible d'améliorer la situation collective.

On constate que ces conditions sont très restrictives et irréalisables en tant que telles dans un système de PCE. Prenons l'exemple de la première condition du théorème. Le marché des PCE sera incomplet dans la mesure où les générations futures, impactées par les choix présents, ne prendront aucunement part aux échanges d'aujourd'hui. Par ailleurs, l'existence de coûts de transactions (Stavins (1995) [94]), supérieurs à ceux des instruments usuels de gestion de la mobilité, justifie la nécessité d'ancrer le fonctionnement des PCE dans un cadre simple et compréhensible par tous. Ces coûts de transaction justifient également l'intervention des pouvoirs publics, à la condition que les coûts associés à cette intervention soient inférieurs aux coûts de transaction dans le cas où les pouvoirs publics n'interviendraient pas.

Plusieurs questions doivent se poser lors de l'élaboration du projet de mise en place des PCE. Nous les abordons dans cette section. Pour cela, intéressons-nous à la création et au fonctionnement du marché des PCE, ainsi qu'à la manière d'allouer des PCE. Identifions les receveurs des PCE et le rôle des structures essentielles.

## 2.1 Méthode d'allocation des PCE et identification des rece- veurs

### 2.1.1 Mise en perspective d'une nécessité d'allocation initiale gratuite et uniforme, basée sur l'objectif quantitatif collectif ciblé

La mise en place des PCE pose la question de leur méthode d'attribution ou d'acquisition. Gardons à l'esprit que les individus doivent pouvoir exercer leur droit à la mobilité minimale. Deux méthodes sont possibles et dépendent de la décision de l'autorité en charge de cette mobilité réglementée. L'autorité peut mettre en place une allocation initiale encadrée et gratuite de ces PCE. À l'inverse, elle peut choisir de faire payer les permis sans aucune allocation individuelle initiale. Cette seconde option fait oublier l'essence-même des PCE qui est de contourner les méfaits de la taxation. Même si cette option permet la révélation des préférences de chacun des usagers, Raux (2007) [79] montre qu'une allocation payante des PCE revient à instaurer une mise aux enchères. Les gagnants seront ceux qui ont une propension marginale à se déplacer qui est élevée, celle-ci étant potentiellement liée à de hauts revenus.

La première méthode, celle d'une allocation gratuite, garantit le droit à la mobilité minimale. La quantité de PCE doit être suffisante, avec une règle de prélèvement souple. Une universalité de la gratuité du permis s'apparente alors à un "*droit de propriété*" (sic) d'un bien collectif (Sternier & Muller (2004) [95]) ou à une "*rente urbaine*" rendue à l'individu (Raux (2007) [79]). Rappelons que l'achat de PCE reste nécessaire lorsque l'individu se déplace dans des proportions qui dépassent les objectifs fixés par les autorités, rapportées à l'échelle de l'individu.

L'allocation initiale, gratuite et individuelle de PCE peut alors prendre deux formes. La première est une allocation où les permis sont distribués uniformément

aux usagers. La seconde est une allocation de type "*grandfathering*", basée sur les mobilités passées de chaque usager pris individuellement. Le mode de calcul de cette allocation est plus complexe et plus coûteux. Elle favorise les hauts revenus par la corrélation existante entre usage du véhicule et revenu (Musso et al. (2006) [68]). Elle introduit également des barrières pour les nouveaux entrants dans la circulation. Ces barrières diminuent la contestabilité nécessaire du marché (Baumol (1982) [6]). De plus, le fait d'énoncer que les PCE seront alloués selon les émissions individuelles passées incite à décaler temporellement les efforts environnementaux, afin d'obtenir davantage de permis (Raux (2011) [81]).

Le rôle des pouvoirs publics est aussi de fixer l'objectif quantitatif collectif associé aux nuisances ciblées, afin de le traduire et de le ventiler sous forme de PCE. Si la variable choisie est relative aux émissions de gaz à effet de serre ou à tout autre polluant à ne pas dépasser, rien ne garantit par exemple la décongestion des voies en période de pointe, pour plusieurs raisons que nous avons déjà évoquées. Un tel PCE pourra toutefois répondre aux objectifs quantitatifs d'une nuisance diffuse, par exemple la pollution atmosphérique.

Si l'application réside en revanche sur l'usage du véhicule, un prélèvement différencié de PCE selon le mode, le temps et l'espace peut concorder avec l'objectif de maîtrise des nuisances localisées en un espace et/ou un intervalle de temps donné. Le prélèvement de PCE peut être plus faible en heure creuse, afin d'aplanir le taux d'occupation de la chaussée en heure de pointe. Le PCE agira alors sur le choix d'heure de départ des individus. Le prélèvement de PCE peut être également plus élevé lorsque le mode de déplacement est plus polluant<sup>3 4</sup>, le taux d'occupation du

---

3. Le PCE peut alors encourager le recours à de nouveaux véhicules plus efficaces (Raux (2007) [79]) par un autre instrument que le système de bonus-malus.

4. Une vignette, telle que la vignette Crit'Air, pourra être un facteur discriminant sur le nombre de PCE à prélever lors d'un déplacement.

véhicule faible, ou la distance parcourue élevée. Le PCE agira alors sur le choix d'itinéraire, modal et de destination.

Le fait d'introduire ce nouveau levier contraindra l'individu à reconsidérer chacun de ses déplacements habituels, afin d'optimiser sa dépense en PCE. Notons aussi un effet potentiel de long terme de relocalisation des activités. La restriction des déplacements dont la destination peut faire l'objet d'un choix pourra nuire aux zones d'activités intra-urbaines. Enfin, la question de l'usage des sols pourra se poser, notamment dans des collectivités étendues où l'usage de l'automobile peut s'avérer nécessaire afin de rejoindre les lieux de travail. La réussite d'un tel système nécessite une bonne connexion entre la périphérie et le réseau urbain et périurbain de mobilité alternative.

### **2.1.2 Identification des receveurs de PCE, pour une allocation proportionnelle à la taille et à la composition du foyer fiscal**

Questionnons-nous. Quels individus détiendront ces PCE ? Doit-on considérer seulement les propriétaires d'une voiture, d'une moto ou d'un scooter ? Doit-on seulement tenir compte des personnes titulaires du permis de conduire, au lieu de tenir compte de toutes les personnes majeures ? Doit-on allouer les PCE à l'échelle du foyer fiscal ? Dans quel périmètre géographique doit-on prendre en considération les individus ? Si ces questions semblent légitimes, de nombreux paramètres sont à prendre en considération.

D'une part, élargir le périmètre géographique de localisation des individus qui bénéficieront d'une allocation initiale de PCE augmente le nombre d'agents économiques dans le marché, et ainsi l'efficacité du marché (Verhoef et al. (1997) [99]). La définition et le degré de localisation des nuisances collectives principalement ciblées par la mise en place des PCE conditionnent aussi ce périmètre géographique. Le

mille-feuille administratif français, bien que souvent critiqué, peut avoir son avantage. Il peut faciliter la détermination du périmètre géographique de localisation des individus qui détiendront une allocation initiale de PCE (e.g. ville, collectivité territoriale, métropole, communauté de communes, département ou région). Toutefois, la charge administrative et législative augmentera d'autant plus que la surface de la zone considérée sera grande.

D'autre part, il est nécessaire de considérer le ménage dans son ensemble pour l'allocation des PCE, moyennant une règle de proportion selon le nombre d'individus. En effet, le fait d'avoir des enfants accroît le besoin en déplacement. Les ménages avec enfants seront désavantagés si aucun PCE supplémentaire ne leur est attribué. En revanche, allouer autant de PCE aux adultes qu'aux enfants désavantagera les ménages sans enfants. Deux réponses ont été proposées (Wadud et al. (2008) [103]). La première est celle d'une allocation différenciée en fonction de l'âge des individus, posant alors le problème de l'iniquité intergénérationnelle. La seconde est l'introduction d'un facteur de pondération sur l'allocation des PCE à destination des ménages avec enfants. Par exemple, le fait d'avoir un enfant permettrait d'obtenir une allocation supplémentaire de PCE, inférieure à l'allocation initiale de PCE qui serait donnée à un nouvel adulte<sup>5</sup>.

L'échelle du foyer fiscal semble alors être une bonne cible d'attribution des PCE, dans un périmètre géographique prédéfini. Néanmoins, il existe des ménages pour lesquels le besoin de PCE pour se déplacer est nul, si bien que la mise en place de ce système est nettement bénéfique pour ce type de ménage. La caractérisation du besoin de déplacement est nécessaire mais difficile à déterminer. En effet, la présence d'effets pervers et de biais complique l'équation : c'est le cas de la surévaluation du besoin par l'individu. Nous pourrions aussi imaginer une allocation des PCE sur le véhicule plutôt que sur l'individu, mais cela présente deux inconvénients majeurs.

---

5. Le facteur de pondération peut aussi être différent selon l'âge de l'enfant.

Le premier est l'incitation à acquérir d'autres véhicules pour avoir davantage de PCE. Ces véhicules sont généralement anciens et polluants. Le second est l'iniquité de cette allocation. Certains ménages ont déjà fait le choix d'adopter des comportements de mobilité sans véhicule particulier. Ils ne seront pas récompensés de leurs comportements vertueux. L'allocation à l'échelle du foyer fiscal paraît alors être le meilleur compromis.

Enfin, il conviendra de statuer sur le traitement des usagers occasionnels qui ne sont pas éligibles à l'allocation de PCE (e.g. individus en vacances ou en déplacement professionnel). Une allocation initiale de PCE à ces individus sera économiquement inefficace. Ils contribueront marginalement à l'objectif de mobilité urbaine durable de la ville dans laquelle ils se rendent peu. Nous proposons que ces individus acquièrent des PCE au prix de marché des PCE, sans aucune allocation initiale. La recette des achats de PCE de ces individus sera redistribuée aux usagers locaux, contrairement à celle des péages urbains.

## **2.2 Caractérisation des structures de gestion du système de PCE et du marché d'échange**

Nous aurions pu imaginer un système de PCE dans lequel les individus n'auraient qu'à s'échanger les permis entre eux, sans intermédiaire ou sans contrôle des pouvoirs publics. Néanmoins, ce type d'échange *C to C* (*Consumer to Consumer*) a pour principal inconvénient la difficulté à trouver un acheteur ou un vendeur sans passer par une plateforme d'échange. Bien que les canaux de communications actuels permettent de créer des plateformes de vente de particulier à particulier, la décentralisation des échanges de PCE ne peut qu'augmenter les coûts implicites de recherche et de négociation (Brands et al. (2020) [10]), donc de transaction. Un inter-

médiaire privé, non-neutre, augmentera aussi les coûts de transaction d'un système sans précédent.

La création et le design d'un marché unique des PCE est la composante-clé du système (Dogterom et al. (2017) [33]), notamment en raison de la nullité des surcoûts (et non des coûts) évoqués dans le système *C to C*. L'information est transparente, centralisée sur un seul marché. Le prix du PCE est le même pour tous les individus et est facilement accessible (Brands et al. (2020) [10]). Ce marché doit être contrôlé par les pouvoirs publics, ceux-ci étant plus à même de réguler la mobilité et de faire face au risque d'une balance déficitaire du marché.

La définition des stratégies de régulation de la mobilité et des objectifs à atteindre est la première phase de conception du marché des PCE (Fan & Jiang (2013) [37]). Cette phase regroupe une liste de tâches à réaliser, telles que :

- L'identification des objectifs quantitatifs.
- La définition spatio-tempo-modale du périmètre des permis.
- La maîtrise du prix.
- Le choix du type de PCE.
- L'identification des potentiels détenteurs des permis.
- Le calcul du nombre de permis à allouer, dépendant des objectifs quantitatifs.
- La mise en place du cadre législatif nécessaire.
- L'intégration de cette politique à d'autres déjà existantes et/ou non-substituables.
- L'établissement de la règle de prélèvement des permis.
- La mise en place de standards nécessaires.
- La réflexion sur l'usage des dispositifs matériels déjà existants.

Cette liste, non-exhaustive, doit intégrer un certain nombre d'acteurs. Le premier acteur est évident : les pouvoirs publics. Dans le cadre d'une politique urbaine, le

décideur naturel sera l'autorité organisatrice de transport urbain (AOTU). Il sera d'usage de solliciter un comité d'experts sur les questions de mobilité.

Cela dit, l'usager lui-aussi devient acteur des mobilités. Il est en mesure de proposer lui-même son service de mobilité. Dans la mesure où cette politique introduit une certaine contrainte à la mobilité de la population, il apparaît indispensable d'inviter ces usagers à prendre part à la création du système. Cela permettra notamment de réduire l'asymétrie de l'information. La solution citoyenne est l'un des piliers de l'intelligence des villes. C'est la "*Multitude*" (Colin et Verdier (2012) [19]). Cet investissement citoyen consiste à rendre efficiente la maîtrise du territoire et de ses ressources, pour maintenant et plus tard (Fenton (2016) [40]).

Toutes ces caractéristiques dépassent la notion de transport urbain et des politiques associées. L'autorité fait face à une vision des transports urbains beaucoup plus large qu'auparavant. La notion de transport urbain recule devant l'émergence d'un système beaucoup plus global qu'est la mobilité urbaine. L'AOTU devient plus globalement une Autorité Organisatrice des Mobilités (AOM) depuis la loi de modernisation de l'action publique territoriale et d'affirmation des métropoles (loi MAPTAM) du 27 janvier 2014<sup>6</sup>.

L'AOM ou son délégataire créera un guichet unique pour mettre en place et assurer le fonctionnement du système de PCE. Cette structure doit être divisée en deux sous-structures (Fan & Jiang (2013) [37]). La première est une plateforme technique à la recherche des applications matérielles et logicielles ayant pour but la gestion du système de PCE. Elle doit intégrer plusieurs corps de métiers, notamment des ingénieurs, des développeurs et des informaticiens. Cette sous-structure mettra en place les applications et s'assurera de leur fonctionnement. La seconde sous-structure est une structure au service de l'usager. Elle lui permettra de s'informer sur le fonctionnement du système, d'acheter des permis supplémentaires, de céder

---

6. <https://www.legifrance.gouv.fr/loda/id/JORFTEXT000028526298/2020-10-06/>

des permis dont il n'a pas besoin, et d'obtenir une assistance technique en cas de défaillance.

Plus généralement, le rôle de ce guichet unique sera de (Fan & Jiang (2013) [37]) :

- Donner les informations nécessaires aux voyageurs.
- Proposer le support et la plateforme d'échange des permis.
- Allouer les permis initiaux.
- Vendre des permis en trop.
- Assurer le "service après-vente".
- Suivre et contrôler le système.
- Sanctionner les usagers ne respectant pas les procédures.

L'achat de permis additionnels sera conditionné par leur disponibilité dans le marché. En d'autres termes, il devra exister une offre de PCE, c'est-à-dire des individus étant prêts à céder des PCE de leur allocation, au prix de marché. Les expériences précédentes ont montré une certaine inactivité du marché des droits à polluer lorsque l'allocation initiale était suffisante pour tous. Cela a impliqué une demande de permis faible et un prix tendant vers zéro.

À l'inverse, une allocation insuffisante de PCE, impliquant alors la rareté du bien, augmentera de façon significative le prix du PCE. Cet événement rendra l'achat de PCE inaccessible pour les individus dont l'utilité marginale du revenu est relativement forte. En même temps, la rareté du bien encourage à la conservation des PCE pour les individus éprouvant de l'aversion à la perte (Kahneman & Tversky (1979) [55]). Ils préféreront vendre leurs PCE plutôt que les dépenser, et diminueront progressivement le nombre de voyages en mode "lourd".

La maîtrise du prix est fondamentale sur l'activité du marché, et ainsi sur la dynamique de la mobilité. Toutefois, le prix ne doit pas rester figé et doit s'ajuster le long du sentier de l'équilibre du marché. En supposant une allocation individuelle

uniforme, l'allocation globale de PCE joue un rôle crucial dans la dynamique du prix. Tout comme des firmes polluantes qui seraient contraintes d'utiliser des permis à polluer, une allocation concurrentielle des PCE implique une égalisation des coûts marginaux externes des individus au prix d'équilibre (Baumol & Oates (1998) [7]). Cette égalisation permet d'atteindre plus efficacement un objectif quantitatif, relativement à la taxe. Il semble toutefois difficile de déterminer précisément cette allocation initiale en raison de l'absence d'expériences concrètes sur la mise en place des permis domestiques de mobilité. Théoriquement, Bulteau (Bulteau (2012) [14]) démontre que l'allocation globale des PCE "*est obtenue lorsque la somme des utilités marginales des individus est égale à la somme des dommages marginaux*".

Brands et al. (2020) [10] proposent une dynamique sécurisée du prix, applicable à l'aide d'un algorithme. La quantité de PCE globale et désirée par les autorités peut être maîtrisée. Cela réduit les erreurs d'anticipation du niveau de PCE alloués sur le marché. Cette dynamique garantit la volatilité souhaitable du prix le long du sentier d'équilibre, pour un risque de déficit maîtrisé. Soit  $Q$ , l'objectif quantitatif à ne pas dépasser à une période donnée,  $Z_t$  le nombre de permis possédés par les individus à l'instant  $t$ ,  $U_t$  le nombre de permis consommés par les individus entre la phase initiale d'allocation et l'instant  $t$ . Le prix du PCE à l'instant  $t$ ,  $P_t$ , varie selon un pas  $\delta$ , en fonction du nombre de permis sur le marché. Il vient :

$$\left\{ \begin{array}{l} Z_t > Q - U_t \Rightarrow P_t = P_{t-1} + \delta \\ Z_t = Q - U_t \Rightarrow P_t = P_{t-1} \\ Z_t < Q - U_t \Rightarrow P_t = P_{t-1} - \delta \end{array} \right.$$

La dynamique du prix est alors la suivante : le prix du PCE augmentera de  $\delta$  unité(s) monétaire(s) dès lors qu'à l'instant  $t$  il y a davantage de permis possédés par les individus que de permis nécessaires pour atteindre l'objectif quantitatif. Cette augmentation du prix va dans le sens d'une incitation à vendre des PCE

afin qu'ils ne soient pas consommés et, de fait, que l'objectif quantitatif ne soit pas dépassé. À l'inverse, le prix du PCE diminuera de  $\delta$  unité(s) monétaire(s) s'il n'y a pas assez de PCE dans le marché pour atteindre l'objectif quantitatif, afin d'inciter les individus à en acheter davantage. Le prix du PCE est alors conditionné par la quantité de permis sur le marché à un instant donné, par rapport au chemin restant pour atteindre l'objectif quantitatif. Si le chemin restant est trop court, alors le prix du PCE va augmenter afin de ne pas parvenir trop rapidement à l'objectif quantitatif. Le but est d'éviter une situation dans laquelle il n'y aurait plus de PCE sur le marché pour pouvoir se déplacer jusqu'à la fin de la période considérée.

Cette dynamique du marché des PCE n'est pas véritablement stimulée par le comportement des individus eux-mêmes sur le marché. Elle est plutôt stimulée par le contrôle du nombre souhaité de PCE par les autorités à un instant donné. Une telle approche est néanmoins nécessaire à la création du marché. Cette étape peut être la phase d'apprentissage du marché et des individus (Erev & Barron (2005) [36]). Elle permet de déterminer puis d'ajuster l'allocation initiale au plus proche de l'équilibre général.

Une seconde phase, celle de maturité du marché, pourra être envisagée avec toutes les précautions qui s'imposent. Le prix du PCE sera alors guidé par les lois de l'offre et la demande de PCE sur le marché, à allocation initiale et globale fixée. Certains trouveront cette approche naïve, mais elle est nécessaire pour parvenir à l'efficience du marché. Il y a tout de même l'idée d'un corridor du prix des PCE dans cette étude : si le prix est inférieur à un prix-plancher, alors des PCE seront rachetés par les autorités de sorte à redynamiser le marché. Cette réserve de permis pourra être ensuite vendue lors de périodes où la demande de PCE est forte et où le prix-plafond des PCE est dépassé. Les nouvelles technologies pourront apporter cette fluidification nécessaire entre les échanges des individus. Le recours à un marché unique permettra d'éviter tout marché-tiers incontrôlable par les autorités.

Ces nouvelles technologies permettront en même temps de minimiser les coûts de transaction. Ces coûts furent dans le passé trop élevés pour espérer voir un jour naître un tel système dans une ville. Elles permettront aussi l'accès rapide et simplifié à une multitude de données. Ces données pourront ensuite faire l'objet d'une proposition de services annexes à la mobilité, sous la contrainte du respect du règlement général de la protection des données. Les nouvelles technologies permettront d'appuyer cette démarche de mobilité soutenable par les PCE.

### **2.3 Détermination du rôle des nouvelles technologies dans le système de PCE**

*"Le monde devient ainsi hyperfluide, mais le futur devient plus imprévisible. Les innovations sont démultipliées et continues, mais souvent inachevées. Le possible se réalise, le virtuel s'actualise" (Colin & Verdier (2012) [19]).*

L'individu s'intéresse de plus en plus à l'accès à une ressource et/ou à un service plutôt qu'à sa possession. Exit le DVD, bienvenue Netflix, Amazon Prime, HBO Max ou encore Disney+. Exit le CD, bienvenue Deezer, Spotify ou encore Napster. Sur la mobilité, les nouvelles technologies attribuent alors un rôle d'acteur à tous les individus pouvant proposer un service de mobilité. Le "co\*X\*age", où \*X\* est le nom d'un mode de déplacement, a le vent en poupe (e.g. covoiturage, copiétonnage et coavionnage). La mobilité devient toujours plus servicielle, tout en laissant la possibilité que celle-ci soit individuelle, ou du moins peu collective. Deux aspects de la mobilité sont ainsi mis en exergue : la dimension individuelle et maîtrisable du mode de déplacement, et la logique de pair-à-pair où l'individu souhaite redevenir maître de ses actions et collaborer avec une communauté d'utilisateurs dans laquelle il se reconnaît. Ces deux aspects font nécessairement appel à des structures, souvent

immatérielles. Ils nécessitent des plateformes d'échanges d'informations, mais aussi d'échange d'actifs matériels ou immatériels.

Les plateformes "*captent et stockent la valeur pour la mettre à disposition du marché*" (Colin & Verdier (2012) [19]). Elles présentent plusieurs avantages dans le cadre de la mobilité urbaine : les coûts sont mutualisés, l'offre globale de mobilité est présentée sur un seul support, et les nouvelles technologies de l'information et de la communication (NTIC) fluidifient et simplifient la relation directe entre la demande et l'offre de mobilité. La science de la donnée et son analyse économique sont alors essentielles. Les nouvelles données se démultiplient. Leur durée de vie est de plus en plus courte. L'intensité des échanges dans les plateformes guide alors l'effervescence de la donnée et du marché.

La donnée est fournie par l'individu, parfois à ses dépens. Cette dernière considération n'est pas le sujet de la thèse. Dans une perspective positive pour les PCE, les données récoltées sur la consommation de PCE pourront faire l'objet d'un contrat social entre l'individu et l'offre du réseau ou de la ressource. Le rôle de l'individu dans ce contexte sera alors de co-concevoir le service de mobilité qu'il utilise. L'utilisateur produira les données qui permettront l'émergence de nouveaux services et de nouveaux outils adaptés aux préoccupations les plus rapprochées de la réalité de terrain. Une expérimentation à petite échelle du système de PCE permettra justement d'intégrer l'individu au projet. Les résultats attendus sont une bonne acceptabilité des PCE dès la création du système et une réduction de l'asymétrie de l'information. Dans cette perspective, une amélioration des coûts de transaction dans le marché des PCE sera à prévoir. Des facteurs-clés doivent être considérés pour une adoption unanime des nouvelles technologies par le système de PCE : simplicité, communication et opportunités de personnalisation. Ces différents facteurs inciteront les individus à pérenniser leurs nouvelles habitudes vertueuses de mobilité.

Les NTIC proposent des applications qui permettent une mise en relation directe de l'offre et de la demande de mobilité, dans n'importe quel lieu et à n'importe quel moment. Toujours à l'échelle de l'individu, des dispositifs tels que les smartphones permettent de minimiser les transactions à effectuer pour entrer dans le marché des PCE. Les NTIC constitueraient aujourd'hui les nouveaux organes du corps humain, selon un célèbre adage provocateur. L'usage massif des nouvelles technologies appuie considérablement cet adage. Les nouvelles technologies doivent donc exercer un rôle dans le marché des PCE afin que ce dernier soit dynamique, incitatif et régulateur de la mobilité urbaine.

La clé principale d'accès au marché des PCE sera alors la plateforme immatérielle, pour des PCE virtuels. Cependant, il faudra s'assurer que tous les individus concernés par les PCE auront accès à la plateforme d'attribution, d'achat et de vente des PCE. La frontière générationnelle est évidente, tout comme l'existence d'individus touchés par l'illectronisme. Les individus n'ont pas tous une maîtrise, même sommaire, des nouvelles technologies. Certains en ignorent parfois leur existence. Ces individus risquent de se conforter dans leurs habitudes de déplacements, négligeant ainsi les problématiques de la mobilité de demain. Le système de PCE devra être numériquement adaptatif, à l'image du système de déclaration des impôts en France. Les individus devront être suffisamment formés et aidés. Afin de faciliter leur assimilation par les individus, les innovations numériques devront être normalisées et universelles.

Le concept d'interopérabilité est aussi lui-même primordial. Considérons la spécificité des itinéraires revus et voués à être multimodaux. Le fait de passer d'un mode de déplacement à un autre sans avoir à changer de dispositif d'oblitération du titre de transport facilite l'usage des modes considérés. À ce titre, la télébilletterie est aussi au cœur de la mobilité urbaine. L'enjeu est de dématérialiser les titres de transport pour plus d'interopérabilité et moins de coûts pour l'exploitant. L'objectif

d'une mobilité soutenable et multimodale pourra faire changer le système de gouvernance des transports. En effet, la réalisation de l'objectif réside ailleurs que dans les rigidités de l'offre. En contrepartie, l'offre de mobilité doit proposer un service d'information innovant et rapide, un marché immatériel supporté par des plateformes facilement accessibles, et une fluidité des trajets multimodaux. Ces éléments doivent donc être au cœur du rôle des nouvelles technologies dans le système de PCE.

Dans une perspective générale, la révolution numérique digitalise toujours plus les interactions. Elle rend alors possible l'implémentation de certains outils de mobilité pour l'instant théoriques (Starkey & Anderson (2005) [93]; Grayling et al. (2006) [47]). L'avènement des nouvelles technologies offre enfin la possibilité de réduire les coûts de transactions jusqu'alors trop élevés des grands systèmes technologiques de mobilité. Les dispositifs numériques, tel que le smartphone, imposent *"une obligation de facilité, d'immédiateté, de rapidité, et fait de chacun de nous un consommateur infidèle, impatient et gourmand"* (Jacquet & Leclercq (2016) [53]). Les mêmes obligations régissent le système de PCE pour qu'il puisse suivre le chemin de la réussite.

Dans le système de PCE, les nouvelles technologies auront plusieurs rôles :

- Être le moyen d'accès à cette mobilité réglementée.
- Être le "fluidificateur" des échanges, en proposant plus d'automatismes pour moins de coûts de transaction.
- Incarner le moyen d'identification du mode, de l'heure et de la distance de déplacement, du taux d'occupation du mode si nécessaire et de la tarification associée. Ces éléments dépendent évidemment du type de PCE à instaurer.
- Être le support et la plateforme de marché. Une réflexion doit être menée sur le type de support à utiliser, ainsi que sur la monnaie d'échange. Certaines idées laissent songeur (e.g. carte bancaire, puces RFID, QR code, lecture d'une plaque d'immatriculation, biométrie, empreintes digitales et cryptomonnaies (Bagloee et al. (2019) [4])). Cette réflexion est justifiée par la

nécessité de vérifier que l'identité de l'individu coïncide avec le nom du détenteur du support de prélèvement. L'objectif est d'éviter tout marché-tiers. L'avenir peut nous réserver des surprises en termes de supports et de monnaies. La contrainte à garder à l'esprit sera celle du respect de l'usage des données personnelles.

- Actualiser en temps-réel le prélèvement de PCE différencié selon la période et le mode de déplacement, en fonction des objectifs quantitatifs visés.
- Actualiser le prix du PCE instantanément en fonction des échanges dans le marché.
- Être le moyen de propagation de l'information et d'éventuelles normes descriptives et injonctives pouvant avoir un rôle incitatif sur le comportement de déplacement (Raux et al. (2015) [82]).
- Assurer l'interopérabilité de toutes les mobilités multimodales.

La création d'un système de PCE est alors soumise à une multitude de paramètres à prendre en compte. Nous pouvons évoquer par exemple le type de nuisance ciblée et du PCE associé, la structure et la conscience environnementale des villes, le nombre d'individus concernés par une allocation initiale à définir, et la définition et le contrôle strict du marché à mettre en place. La nouvelle technologie se propose d'être à la fois le support de fonctionnement, la plateforme de marché, le modulateur et le fluidificateur des échanges et des déplacements.

Après avoir présenté un ensemble de considérations relatives à la mise en place d'un système de PCE, nous proposons d'élaborer une modélisation économique d'un système de PCE journaliers. Ce modèle va rendre compte de l'effet d'un système de PCE journaliers sur les choix de déplacement.

### 3 Modélisation économique des effets d'un système de PCE sur le choix modal

De nombreux modèles sur les permis à circuler échangeables ont été proposés dans la littérature. L'ingénierie des trafics nous apporte des modèles d'analyse des flux de trafic. Ils étudient l'impact des PCE sur ces flux, au travers de simulations et programmations mathématiques (e.g. Akamatsu (2007) [1]; Yang & Wang (2011) [115]; Wu et al. (2012) [110]; Nie & Yin (2013) [72]; Tian et al. (2013) [96]; Wada & Akamatsu (2013) [101]; Xiao et al. (2013) [111]; Ye & Yang (2013) [116]; Bao et al. (2014) [5]; Zhu et al. (2015) [117]; Akamatsu & Wada (2017) [2]; Wang et al. (2018) [105]). Ces modèles foisonnent et sont souvent complexes par leurs multiples équations dépendantes ainsi que par l'introduction d'une certaine dynamique des flux. D'autres modèles microéconomiques étudient les choix de déplacement individuels et font recours aux fonctions d'utilité des agents économiques pour caractériser l'équilibre du marché des PCE, l'effet sur les choix de déplacement, et même la faisabilité et l'efficacité de l'instrument (e.g. Bulteau (2012) [14]; Xu & Grant-Muller (2016) [112]; Xu & Grant-Muller (2017) [113]; Xu et al. (2018) [114]). Dans cette section, nous proposons de modéliser la variation des choix modaux des individus suite à la mise en place des PCE.

#### 3.1 Cadre du modèle

Un usager doit effectuer un trajet entre son domicile et son travail. Les deux endroits sont séparés par une voie automobile et une voie exclusivement réservée aux transports collectifs sur site propre. Nous supposons que cet usager a le choix entre un mode "lourd", l'automobile (a), et un mode "doux" collectif, le bus (b). La voie automobile présente épisodiquement des problématiques de congestion urbaine.

Une masse de  $N$  usagers dans la même zone doit effectuer ce déplacement. Ces usagers sont différenciés selon leur valeur du temps  $\theta \in [\underline{\theta}, \bar{\theta}]$ . Ces valeurs du temps sont distribuées selon une loi de probabilité quelconque associée à la fonction de répartition  $F(\theta)$ , avec  $F(\underline{\theta}) = 0$  et  $F(\bar{\theta}) = N$ .

La valeur du temps, exprimée en unités monétaires par unité de temps (par exemple, en euros par heure), est le montant que l'individu consent à payer pour gagner une unité de temps sur le parcours qu'il doit effectuer. La littérature a montré qu'il existe une corrélation positive entre l'usage du véhicule et le revenu (Musso et al. (2006) [68]). Elle a également signifié que la valeur du temps dépend négativement de l'utilité marginale du revenu (Quinet (1998) [78]). Par conséquent, nous stipulons que la valeur du temps est croissante avec le revenu de l'individu. Cette hypothèse est énoncée à des fins de simplification de l'interprétation de nos résultats. Tout comme le revenu, nous supposons alors que la distribution des valeurs du temps est caractérisée par une faible proportion de fortes valeurs<sup>7</sup>.

On suppose que les hypothèses suivantes se vérifient, en moyenne, dans le monde réel :

- En posant  $v_j$  la préférence intrinsèque de l'individu à choisir le mode  $j$  ( $j = a$  pour l'automobile,  $j = b$  pour le bus), toutes choses égales par ailleurs, les individus préfèrent intrinsèquement se déplacer en automobile ( $v_a = \bar{v}$ ) plutôt qu'en bus ( $v_b = \underline{v}$ ). Les individus préfèrent se déplacer que de ne pas bouger ( $v_0$ ). Ces utilités brutes sont alors :  $(v_a = \bar{v}) > (v_b = \underline{v}) > v_0$ .
- Le coût du déplacement  $p_j$  (sans internaliser le coût du temps, ni celui des externalités de congestion) est plus élevé en utilisant l'automobile que le bus :  $p_a > p_b$ . En effet, de manière générale, pendant que l'individu s'acquittera seulement d'un titre de transport pour se déplacer en bus, l'automobiliste

---

7. Une application de notre modèle pourrait faire correspondre la distribution des valeurs du temps à celle d'une loi de probabilité log-normale.

devra supporter des frais de déplacement plus important (e.g. frais de carburant, d'assurance, d'amortissement et d'usure de son véhicule).

- Le temps de parcours  $t_j$  est plus faible lorsque l'individu se déplace en automobile plutôt qu'en bus, dans des conditions normales de déplacement et de stationnement pour l'automobile :  $t_b > t_a$ . Quelques raisons peuvent être évoquées. D'une part, le trajet en bus suppose la montée et la descente aux arrêts de bus les plus proches du lieu de domicile et de travail. Ces arrêts ne sont pas systématiquement proches de ces lieux. Les distances à parcourir pour se rendre aux arrêts allongent le temps de parcours domicile-travail par rapport à un trajet en automobile. D'autre part, il existe un temps d'attente à l'arrivée du bus alors que l'accès à l'automobile est immédiat. Enfin, le bus est sujet à des arrêts fréquents, impliquant alors plusieurs périodes de temps de ralentissement, d'arrêt et d'accélération lente (comparativement à l'accélération d'une voiture).

On pose :

- $s_a$ , la capacité de la voirie automobile (en véhicules par heure).
- $s_b$ , la capacité de la voie exclusivement dédiée au passage des bus (en bus par heure).
- $\varepsilon$ , le prix de marché des PCE.
- $\bar{q}$ , la proportion de PCE que détient l'individu par rapport au nombre de PCE nécessaires pour le déplacement en automobile. Si  $\bar{q} = 1 = 100\%$ , alors l'individu détient exactement le nombre de PCE nécessaires pour pouvoir se déplacer en automobile. Si  $\bar{q} < 1$ , alors l'individu ne dispose pas suffisamment de PCE pour pouvoir se déplacer en automobile. Il devra alors acquérir une proportion  $(1 - \bar{q})$  de PCE sur le marché des PCE. Si  $\bar{q} > 1$ , alors l'individu revendra sur le marché une proportion  $(1 - \bar{q})$  de PCE s'il se déplace en

automobile. En revanche, si l'individu se déplace exclusivement en bus, il revendra la proportion  $\bar{q}$  de PCE qu'il détient.

### 3.2 Expression des fonctions d'utilité associées à l'usage d'un mode de déplacement

Nous souhaitons exprimer le choix modal d'un individu en comparant les utilités procurées par l'usage de l'automobile et du bus. Si son choix est rationnel, l'individu choisira le mode de déplacement lui procurant la plus grande utilité.

La fonction d'utilité  $V_j(\theta)$ , selon le mode  $j$ , est modélisée par la différence entre la préférence intrinsèque  $v_j$  d'usage du mode  $j$  et le coût généralisé de déplacement avec ce mode. Nous supposons que le coût généralisé de déplacement (CGD) est linéaire, afin de proposer une base théorique simple de modélisation. Ce travail pourra ensuite faire l'objet de multiples extensions. Le CGD dépend classiquement du coût exogène du déplacement  $p_j$  et du temps de déplacement où l'on prend linéairement en compte les externalités de congestion ( $t_j + \frac{q_j^*}{s_j}$ , avec  $q_j^*$  le niveau de congestion que l'individu anticipe sur la voie dédiée au mode  $j$ ). Les individus étant contraints à se déplacer pour aller travailler, il vient  $q_a^* + q_b^* = N$ . Le temps de déplacement est monétisé par la valeur du temps  $\theta$ . La valeur du temps est différente pour chacun des individus. Cela implique que le CGD d'un même déplacement est différent pour tous les individus.

Le coût généralisé de déplacement pour un mode  $j$  est alors :

$$CGD_j = p_j + \theta \left( t_j + \frac{q_j^*}{s_j} \right)$$

Nous introduisons en même temps dans la fonction d'utilité une nouvelle composante : la consommation de PCE nécessaire pour que l'individu puisse se déplacer en automobile. Nous choisissons un PCE de type journalier, autorisant le retour de l'in-

dividu à son domicile sans consommation supplémentaire de PCE. L'automobiliste devra consommer une proportion  $\bar{q}$  de PCE pour se déplacer. Un PCE est valorisé au prix  $\varepsilon$ . À des fins de simplification, nous supposons que tout PCE non-consommé à la fin de la journée est revendu au prix de marché des PCE, afin de ne pas prendre en compte le choix de garder ses PCE pour plus tard<sup>8</sup>. La fructification des PCE dans le temps s'avère ainsi impossible.

Trois cas de figure sont possibles, pour un individu souhaitant se déplacer en automobile :

- L'individu ne détient pas assez de PCE pour se déplacer en automobile :  $\bar{q} < 1$ . Il doit alors acheter une proportion  $(1 - \bar{q})$  de PCE pour pouvoir se déplacer. Au prix de marché des PCE  $\varepsilon$ , cette consommation de PCE entraîne un coût – une désutilité – de  $\varepsilon(1 - \bar{q})$  unités monétaires par unité de PCE.
- L'individu détient la quantité exacte de PCE pour se déplacer en automobile :  $\bar{q} = 1$ . Il n'a pas besoin d'acheter de PCE pour se déplacer. Il ne peut pas non plus en revendre (i.e.  $1 - \bar{q} = 0$ ).
- L'individu détient plus de PCE que nécessaire pour se déplacer en automobile :  $\bar{q} > 1$ . Il lui reste alors une proportion  $(1 - \bar{q})$  de PCE non-utilisée. Au prix de marché du PCE  $\varepsilon$ , cette proportion lui procure une recette – une utilité – de  $\varepsilon(\bar{q} - 1) = -\varepsilon(1 - \bar{q})$  unités monétaires par unité de PCE.

La fonction d'utilité  $V_a(\theta)$  associée à l'usage d'une automobile revêt alors la forme suivante :

$$V_a(\theta) = \bar{v} - p_a - \theta(t_a + \frac{q_a^*}{s_a}) - \varepsilon(1 - \bar{q})$$

---

8. Une extension de notre travail pourra intégrer ce choix en utilisant un modèle dynamique. Ce modèle devra prendre en compte l'impossibilité d'effectuer des arbitrages intertemporels sur de longues périodes.

L'utilisation des transports collectifs ne nécessite pas la consommation de PCE. Pour les usagers du bus, le système de PCE procure une recette – une utilité – à hauteur de  $\varepsilon\bar{q}$  unités monétaires par unité de PCE, suite à la revente de la proportion  $\bar{q}$  de PCE non-consommée.

La fonction d'utilité  $V_b(\theta)$  associée à l'usage du bus est alors :

$$V_b(\theta) = \underline{v} - p_b - \theta(t_b + \frac{q_b^*}{s_b}) + \varepsilon\bar{q}$$

### 3.3 Valeur du temps de basculement avant et après la mise en place du marché des PCE : analyse des répartitions modales

La mise en place d'un système de PCE pourra entraîner une variation du coût du temps. Elle fera ainsi varier l'utilité des deux modes, en raison d'une anticipation sur les niveaux de trafic des deux modes que les PCE induiront. Ce système pourra également faire varier l'utilité associée l'usage de l'automobile, en raison de la possible nécessité d'acheter des PCE sur le marché pour pouvoir se déplacer si l'individu n'en dispose pas suffisamment. La possibilité d'obtenir une recette lors de la vente de PCE améliorera l'utilité des usagers du bus, toutes choses égales par ailleurs. Ces variations impliqueront un basculement des préférences d'une partie des individus à l'égard du choix modal.

Un usager indifférent dans la situation de *statu quo* ne sera plus indifférent dans son choix modal si le système de PCE est voué à améliorer la répartition modale, pour une mobilité urbaine durable. Cet individu sera le premier à basculer de l'indifférence du choix modal vers un choix modal favorable au bus. Ainsi, tous les individus qui ont une valeur du temps qui gravite autour de celle de l'utilisateur indifférent seront les premiers à reconsidérer leurs choix modaux. La variation de la

valeur du temps de basculement (ou de l'utilisateur indifférent) après la mise en place des politiques relatives aux PCE nous permettra de distinguer les variations de la répartition modale.

L'utilisateur indifférent à l'usage des deux modes est représenté par sa valeur du temps  $\tilde{\theta}$ . Cette valeur est obtenue par l'égalité entre les utilités de déplacement  $V_a(\tilde{\theta})$  et  $V_b(\tilde{\theta})$  :

$$V_a(\tilde{\theta}) = V_b(\tilde{\theta}) \Leftrightarrow \tilde{\theta} = \frac{(\underline{v} - p_b) - (\bar{v} - p_a) + \varepsilon}{t_b + \frac{q_b^*}{s_b} - t_a - \frac{q_a^*}{s_a}}$$

La part modale de chacun des deux modes considérés sera non-nulle si la valeur du temps de l'utilisateur indifférent  $\tilde{\theta}$  est comprise entre  $\underline{\theta}$  et  $\bar{\theta}$ .

### 3.3.1 Répartition modale avant la mise en place du marché des PCE

Caractérisons l'utilisateur indifférent dans la situation de *statu quo*, c'est-à-dire dans la période précédant la mise en place des PCE. La valeur du temps  $\tilde{\theta}_0$  est telle que  $V_a(\tilde{\theta}_0) = V_b(\tilde{\theta}_0)$  et  $\varepsilon = 0$  :

$$\tilde{\theta}_0 = \frac{(\underline{v} - p_b) - (\bar{v} - p_a)}{t_b + \frac{q_b^0}{s_b} - t_a - \frac{q_a^0}{s_a}}$$

$q_a^0$  et  $q_b^0$  sont les niveaux de congestion que l'individu anticipe sur la voie dédiée au mode  $a$  et  $b$ , avant que les PCE soient mis en place. Une répartition modale non-nulle des deux modes de déplacement implique  $\tilde{\theta}_0 \in [\underline{\theta}, \bar{\theta}]$ .

Pour simplifier l'écriture des relations, posons :

- $\Delta t = t_b - t_a > 0$ , la différence du temps de transport entre le bus et l'automobile, sans prendre en considération l'externalité temporelle de congestion.
- $w_j = v_j - p_j$  avec  $j = \{a, b\}$ , l'utilité nette du coût du déplacement, hors du coût du temps et de l'usage des PCE.

—  $\Delta w = w_b - w_a$ , tel que  $w_a = \bar{v} - p_a$  et  $w_b = \underline{v} - p_b$ . Cette quantité exprime la différence des utilités nettes des coûts de déplacement avec les deux modes  $a$  et  $b$ , hors du coût du temps et de l'usage des PCE.

Il vient :

$$\tilde{\theta}_0 = \frac{\Delta w}{\Delta t + \frac{q_b^0}{s_b} - \frac{q_a^0}{s_a}}$$

Dans la situation de *statu quo*, un individu préférera se déplacer en bus plutôt qu'en automobile, si et seulement si l'utilité associée à l'usage du bus est supérieure à celle de l'usage de l'automobile :

$$\begin{aligned} V_a(\theta) < V_b(\theta) &\Leftrightarrow \bar{v} - p_a - \theta\left(t_a + \frac{q_a^0}{s_a}\right) < \underline{v} - p_b - \theta\left(t_b + \frac{q_b^0}{s_b}\right) \\ &\Leftrightarrow w_a - \theta\left(t_a + \frac{q_a^0}{s_a}\right) < w_b - \theta\left(t_b + \frac{q_b^0}{s_b}\right) \\ &\Leftrightarrow \theta\left(t_b + \frac{q_b^0}{s_b}\right) - \theta\left(t_a + \frac{q_a^0}{s_a}\right) < \Delta w \\ &\Leftrightarrow \theta\left(\Delta t + \frac{q_b^0}{s_b} - \frac{q_a^0}{s_a}\right) < \Delta w \\ &\Leftrightarrow \begin{cases} \theta < \tilde{\theta}_0 = \frac{\Delta w}{\Delta t + \frac{q_b^0}{s_b} - \frac{q_a^0}{s_a}} & \text{si } t_b + \frac{q_b^0}{s_b} > t_a + \frac{q_a^0}{s_a} \\ \theta > \tilde{\theta}_0 = \frac{\Delta w}{\Delta t + \frac{q_b^0}{s_b} - \frac{q_a^0}{s_a}} & \text{si } t_b + \frac{q_b^0}{s_b} < t_a + \frac{q_a^0}{s_a} \end{cases} \end{aligned}$$

Deux cas sont alors possibles :

**(1). Régime de congestion simple sur la voirie automobile :** le temps de parcours du bus (en tenant compte des externalités de congestion sur la voie de bus<sup>9</sup>) est supérieur au temps de parcours de l'automobile (en tenant compte des externalités de congestion sur la voirie automobile). Autrement dit, le trafic est tel qu'il est plus rapide de prendre l'automobile que le bus. Cela se traduit mathématiquement par  $t_b + \frac{q_b^0}{s_b} > t_a + \frac{q_a^0}{s_a}$ . Dans ce cas, tous les individus dont

---

9. Une externalité de congestion sur la voie du bus n'est pas aisément imaginable. Nous pouvons plutôt imaginer un potentiel allongement du temps de parcours de ce mode lié à la fréquentation de celui-ci.

la valeur du temps excède  $\tilde{\theta}_0$  utiliseront l'automobile. Par extension, ces individus disposent d'un revenu relativement plus élevé que celui des autres individus qui vont utiliser le bus.

Le nombre d'individus qui utilisent la voiture est alors de  $N - F(\tilde{\theta}_0)$  pour  $\tilde{\theta}_0 \in [\underline{\theta}, \bar{\theta}]$ . Cette part modale varie en sens inverse de  $\tilde{\theta}_0$ . La répartition modale, sous une loi de densité quelconque, peut être représentée à l'aide de la figure 2.

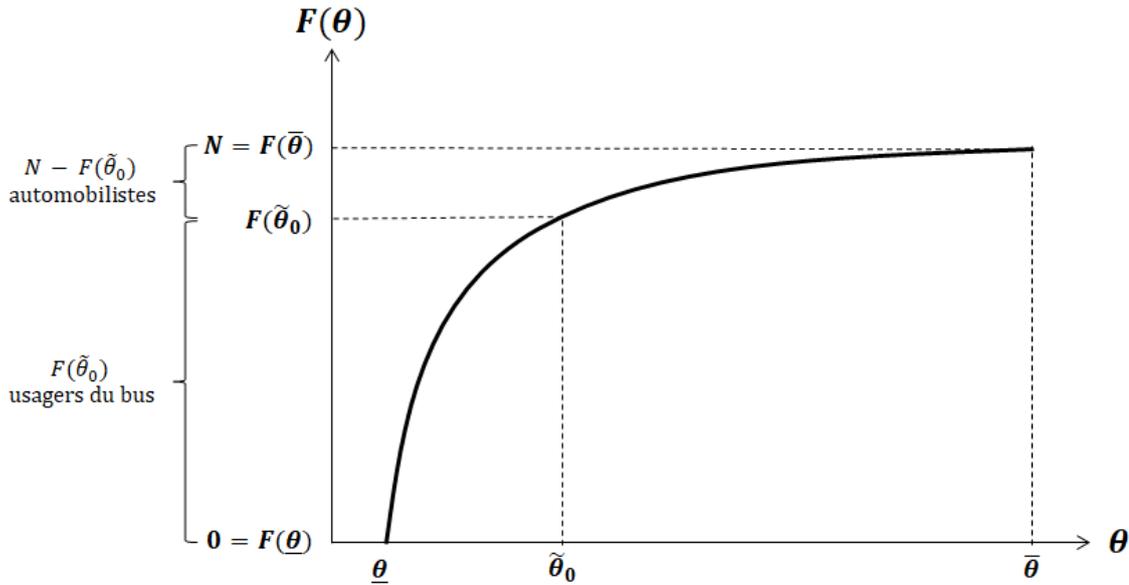


Figure 2 – Fonction de répartition modale dans un régime de congestion simple - Situation sans marché des PCE

Nous constatons graphiquement que si la valeur du temps de basculement  $\tilde{\theta}_0$  augmente, alors le nombre d'usagers du bus augmente, au détriment du nombre d'automobilistes. Cette valeur du temps peut décaler vers la droite du graphique en augmentant la capacité  $s_b$  de la voie exclusive au bus ou en diminuant la capacité  $s_a$  de la voirie automobile, toutes choses égales par ailleurs. Il en est de même en agissant sur les composantes du coût exogène  $p_b$  du déplacement en bus (e.g. diminuer le prix du titre de transport) et  $p_a$  du déplacement en automobile (e.g. augmenter le prix du carburant, de la prime d'assurance, etc.). Enfin, une égalisation des temps de

parcours des deux modes ira dans le sens d'une augmentation du nombre d'usagers du bus et d'une diminution du nombre d'automobilistes.

(2). **Hypercongestion sur la voirie automobile** : le temps de parcours du bus (en tenant compte des externalités de congestion sur la voie de bus) est inférieur au temps de parcours de l'automobile (en tenant compte des externalités de congestion sur la voirie automobile). Autrement dit, il sera plus rapide de se rendre au travail en bus qu'en voiture. Cela se traduit par  $t_b + \frac{q_b^0}{s_b} < t_a + \frac{q_a^0}{s_a}$ . Dans ce cas, tous les individus dont la valeur du temps est inférieure à  $\tilde{\theta}_0$  utiliseront l'automobile. La part modale de la voiture sera alors de  $F(\tilde{\theta}_0)$  pour  $\tilde{\theta}_0 \in [\underline{\theta}, \bar{\theta}]$ . Cette proportion varie dans le même sens que  $\tilde{\theta}_0$ .

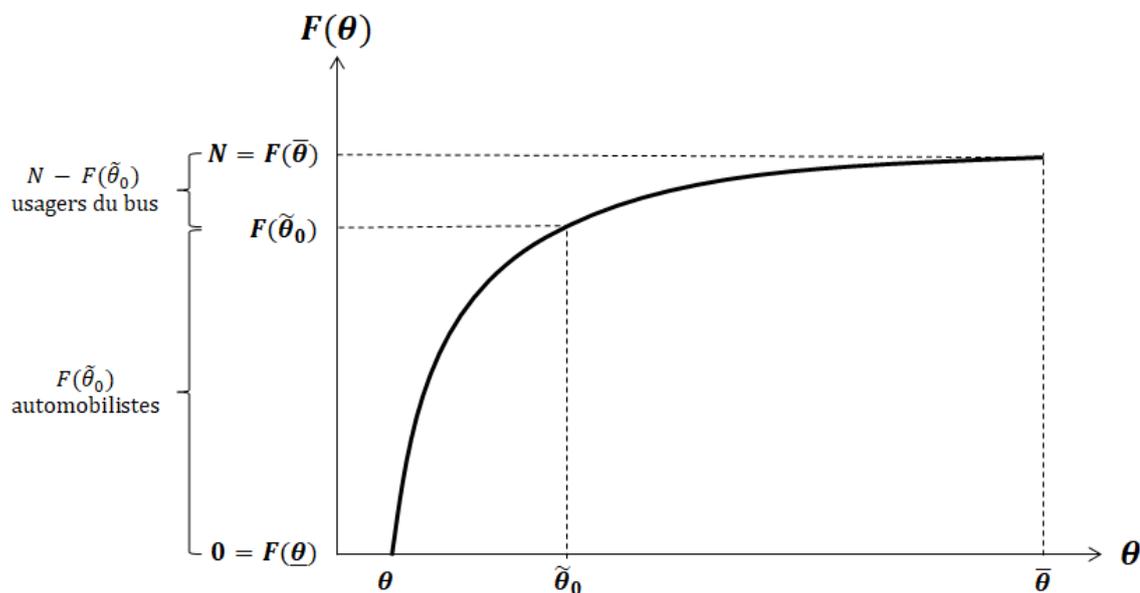


Figure 3 – Fonction de répartition modale en hypercongestion - Situation sans marché des PCE

Par conséquent, à l'aide des deux graphiques précédents, le bus sera préféré à la voiture dans deux cas. D'une part, les individus disposant d'une faible valeur du temps préféreront utiliser le bus dans un régime de congestion simple de la voirie automobile. C'est le cas le plus "standard" dans le monde réel. D'autre part, les individus disposant d'une forte valeur du temps préféreront utiliser le bus lorsqu'il

y a un phénomène d'hypercongestion sur la voirie automobile. Ce cas typique est baptisé comme étant un phénomène de "bus de riches". Dans cette situation, les individus disposant d'une faible valeur du temps utiliseront la voiture. Ce phénomène, difficilement concevable dans la réalité, provient du raisonnement en coût généralisé de déplacement. Les individus ayant une faible valeur du temps ne sont pas disposés à payer pour économiser du temps. Par conséquent, ceux-ci utiliseront le mode de déplacement le plus lent, ici l'automobile, toutes choses égales par ailleurs.

### 3.3.2 Répartition modale après la mise en place du marché des PCE

Dans cette situation, l'usager indifférent est :

$$\tilde{\theta} = \frac{\Delta w + \varepsilon}{\Delta t + \frac{q_b^*}{s_b} - \frac{q_a^*}{s_a}}$$

La répartition modale en faveur de la voiture, pour  $\tilde{\theta} \in [\underline{\theta}, \bar{\theta}]$ , est telle que  $q_a^* = N - F(\tilde{\theta})$  si  $t_b + \frac{q_b^*}{s_b} > t_a + \frac{q_a^*}{s_a}$  (congestion simple) ;  $q_a^* = F(\tilde{\theta})$  si  $t_b + \frac{q_b^*}{s_b} < t_a + \frac{q_a^*}{s_a}$  (hypercongestion).

Le marché des PCE est supposé être équilibre et en situation de concurrence pure et parfaite. Le prix d'équilibre du PCE  $\varepsilon^*$  doit alors vérifier l'égalisation de l'offre et de la demande de PCE au jour de déplacement considéré. Trois raisons nous ont poussés à supposer le marché des PCE en concurrence pure et parfaite. La première raison relève de l'approche classique de l'étude d'un marché qui n'existe pas : une approche simplifiée du marché est nécessaire avant d'envisager de le complexifier et le rendre fidèle à la réalité. La deuxième raison est l'existence d'un grand nombre d'agents économiques suffisamment hétérogènes par leur valeur du temps. Cette hétérogénéité permet effectivement les échanges dans le marché des PCE. La troisième raison renvoie à la fluidification et à la simplification des échanges. Ceci est dû à l'évolution des nouvelles technologies. Ces justifications permettent au modèle de

ne pas s'éloigner de la réalité de la dynamique de concurrence dans le marché, si ce marché venait à voir le jour dans nos villes.

Sachant qu'une proportion  $\bar{q}$  de PCE a été attribuée à chacun des  $N$  usagers, l'offre globale de PCE est alors  $N\bar{q}$ . On sait que  $N - F(\tilde{\theta})$  (resp.  $F(\tilde{\theta})$ ) usagers souhaitent utiliser leur automobile dans le régime de congestion simple (resp. dans le régime d'hypercongestion). Ces usagers ont besoin d'une part de PCE pour le faire. La demande globale de PCE est alors le produit entre cette part et le nombre d'usagers souhaitant se déplacer en automobile :  $1 \times N - F(\tilde{\theta}) = N - F(\tilde{\theta})$  (resp.  $F(\tilde{\theta})$ ).

Il vient alors, en égalisant l'offre et la demande de PCE :

$$\begin{cases} N\bar{q} = N - F(\tilde{\theta}) & \text{si } t_b + \frac{q_b^*}{s_b} > t_a + \frac{q_a^*}{s_a} \\ N\bar{q} = F(\tilde{\theta}) & \text{si } t_b + \frac{q_b^*}{s_b} < t_a + \frac{q_a^*}{s_a} \end{cases}$$

Ainsi, à l'équilibre du marché, il existe une valeur du temps de l'utilisateur indifférent  $\tilde{\theta}^*$  telle que :

$$\begin{cases} F(\tilde{\theta}^*) = N - N\bar{q} = N(1 - \bar{q}) & \text{si } t_b + \frac{q_b^*}{s_b} > t_a + \frac{q_a^*}{s_a} \\ F(\tilde{\theta}^*) = N\bar{q} & \text{si } t_b + \frac{q_b^*}{s_b} < t_a + \frac{q_a^*}{s_a} \end{cases}$$

Quel que soit le régime de congestion, le nombre d'individus qui utiliseront le bus est alors  $N(1 - \bar{q})$ <sup>10</sup>. Une augmentation du nombre de PCE détenus par les individus engendrera une part modale du bus plus faible. Disposant de davantage de PCE, les individus seront plus enclins à utiliser l'automobile.

---

10. Rappel : dans le régime d'hypercongestion, le nombre d'usagers du bus à l'équilibre est  $N - F(\tilde{\theta}^*)$ .

Si  $F(\tilde{\theta}^*) \in [0, N]$ , alors  $N\bar{q} \in [0, N]$  et  $\bar{q} \in [0, 1]$ . Une répartition non-nulle des deux modes de déplacement implique que la quantité de PCE à allouer à chacun des usagers doit être non-nulle et insuffisante pour qu'il puisse se déplacer sans devoir acquérir des PCE supplémentaires (i.e. inférieure à 1) :  $\bar{q} \in ]0, 1[$ . Ce résultat est valable quel que soit le régime de congestion. Ainsi, alors que la répartition modale est dépendante du régime de congestion lorsqu'il n'y a aucun marché des PCE, cette dépendance s'efface lors de la mise en place des PCE. Elle laisse place à une répartition modale guidée par l'allocation initiale individuelle de PCE.

### 3.4 Comparaison des répartitions modales : analyse du report modal

L'objectif de cette sous-section est de comparer le positionnement de l'utilisateur indifférent à l'équilibre du marché des PCE à celui de l'utilisateur indifférent en l'absence du marché des PCE. Si la valeur du temps  $\tilde{\theta}^*$  de l'utilisateur indifférent à l'équilibre du marché des PCE est différente de celle de l'utilisateur indifférent dans la situation de *statu quo* ( $\tilde{\theta}_0$ ), alors  $|F(\tilde{\theta}^*) - F(\tilde{\theta}_0)|$  individus effectueront un report modal. Ces individus peuvent être des usagers du bus qui utiliseront leur automobile après la mise en place des PCE, ou l'inverse. La répartition modale étant guidée par l'allocation initiale et individuelle de PCE, nous allons chercher l'ensemble des allocations pour lesquelles un report modal en faveur du bus est possible.

Quel que soit le régime de congestion, l'utilisateur indifférent à l'équilibre du marché des PCE est :

$$\tilde{\theta}^* = \frac{\Delta w + \varepsilon^*}{\Delta t + \frac{N(1-\bar{q})}{s_b} - \frac{N\bar{q}}{s_a}}$$

### 3.4.1 Variation de la valeur du temps de basculement et impact sur le prix de marché des PCE

Dans le cas de la congestion simple, le fait d'attribuer davantage de PCE à l'individu implique une augmentation du nombre d'individus qui utiliseront l'automobile. Autrement dit, la valeur du temps de basculement diminue à mesure que l'allocation initiale et individuelle de PCE augmente :

$$\frac{d\tilde{\theta}^*}{d\bar{q}} = \frac{d\tilde{\theta}^*}{dF(\tilde{\theta}^*)} \frac{dF(\tilde{\theta}^*)}{d\bar{q}} = -\frac{N}{f(\tilde{\theta}^*)} < 0$$

Il existe alors une allocation  $\bar{q}_0$  qui neutralise l'effet du système de PCE sur l'usager indifférent dans la situation de *statu quo*, telle que :

$$\tilde{\theta}^* = \tilde{\theta}_0 \Leftrightarrow F(\tilde{\theta}^*) = F(\tilde{\theta}_0) \Leftrightarrow N(1 - \bar{q}_0) = F(\tilde{\theta}_0) \Leftrightarrow \bar{q}_0 = \frac{N - F(\tilde{\theta}_0)}{N} = \frac{q_a^0}{N}$$

Si la dotation initiale de PCE est uniforme, alors la proportion de PCE allouée à chaque individu à ne pas égaliser et ne pas dépasser pour que le système de PCE engendre une nouvelle répartition modale plus favorable au bus correspond à la proportion d'automobilistes dans la situation de *statu quo*  $\frac{q_a^0}{N}$ . Par exemple, si 60% des individus se déplaçaient quotidiennement en automobile avant la mise en place des PCE, alors chaque individu doit disposer de moins de 60% du nombre de PCE nécessaires pour pouvoir se déplacer quotidiennement en automobile lors de la mise en place du dispositif. Nous pouvons lire ce résultat de manière globale : le nombre de PCE émis quotidiennement par les autorités ( $N\bar{q}$ ) doit être inférieur au nombre d'automobilistes qui se déplaçaient quotidiennement en automobile ( $q_a^0$ ) avant la mise en place des PCE.

Dans le cas d'un régime d'hypercongestion, le fait d'attribuer davantage de PCE à l'individu implique aussi une augmentation du nombre d'individus qui utiliseront l'automobile. Dans ce cas, ce sont les individus ayant les valeurs du temps les plus faibles qui utilisent l'automobile :

$$\frac{d\tilde{\theta}^*}{d\bar{q}} = \frac{d\tilde{\theta}^*}{dF(\tilde{\theta}^*)} \frac{dF(\tilde{\theta}^*)}{d\bar{q}} = \frac{N}{f(\tilde{\theta}^*)} > 0$$

Il existe alors une allocation  $\bar{q}_0$  qui neutralise l'effet du système de PCE sur l'usager indifférent dans la situation de *statu quo*, telle que :

$$\tilde{\theta}^* = \tilde{\theta}_0 \Leftrightarrow F(\tilde{\theta}^*) = F(\tilde{\theta}_0) \Leftrightarrow N\bar{q}_0 = F(\tilde{\theta}_0) \Leftrightarrow \bar{q}_0 = \frac{F(\tilde{\theta}_0)}{N} = \frac{q_a^0}{N}$$

Nous obtenons la même allocation neutralisante que celle qui figure dans le régime de congestion simple. Cette allocation neutralisante ne correspond pas à une situation où tous les individus auraient le nombre de PCE nécessaires pour pouvoir se déplacer en automobile (i.e.  $\bar{q} = 1$ ). Une telle situation provoquerait un déséquilibre entre l'offre et de la demande de PCE : les individus n'ayant pas besoin de PCE ne pourraient pas tous les vendre. Le prix d'équilibre du marché des PCE diminuerait par rapport à celui où l'on retrouve une répartition modale équivalente à celle de la situation de *statu quo*. Ce prix deviendrait alors négatif car la situation de *statu quo* revient à avoir un prix du marché des PCE nul.

Nous pouvons en même temps observer l'effet de l'allocation initiale des PCE sur le prix d'équilibre du marché. Ce prix provient d'une transformation de l'équation de la valeur du temps de basculement à l'équilibre du marché :

$$\tilde{\theta}^* = \frac{\Delta w + \varepsilon^*}{\Delta t + \frac{N(1-\bar{q})}{s_b} - \frac{N\bar{q}}{s_a}} \Leftrightarrow \varepsilon^* = \tilde{\theta}^* \left( \Delta t + \frac{N(1-\bar{q})}{s_b} - \frac{N\bar{q}}{s_a} \right) - \Delta w$$

La variation du prix d'équilibre du marché lorsque l'allocation initiale des PCE est :

$$\frac{d\varepsilon^*}{d\bar{q}} = \frac{d\tilde{\theta}^*}{d\bar{q}} \left( \Delta t + \frac{N(1-\bar{q})}{s_b} - \frac{N\bar{q}}{s_a} \right) + \tilde{\theta}^* \left( -\frac{N}{s_b} - \frac{N}{s_a} \right)$$

Dans le régime de congestion simple,  $\frac{d\tilde{\theta}^*}{d\bar{q}} < 0$  et  $\Delta t + \frac{N(1-\bar{q})}{s_b} - \frac{N\bar{q}}{s_a} > 0$ . Puisque  $\tilde{\theta}^* > 0$  et  $-\frac{N}{s_b} - \frac{N}{s_a} < 0$ , il vient  $\frac{d\varepsilon^*}{d\bar{q}} < 0$  : si l'allocation initiale de PCE augmente, alors le prix d'équilibre du marché baisse dans la mesure où les individus vont disposer de davantage de PCE pour pouvoir se déplacer. Ces individus ont alors une plus faible propension à se rendre sur le marché des PCE pour pouvoir en acquérir.

Dans le régime d'hypercongestion,  $\frac{d\tilde{\theta}^*}{d\bar{q}} > 0$  et  $\Delta t + \frac{N(1-\bar{q})}{s_b} - \frac{N\bar{q}}{s_a} < 0$ . Puisque  $\tilde{\theta}^* > 0$  et  $-\frac{N}{s_b} - \frac{N}{s_a} < 0$ , il vient aussi  $\frac{d\varepsilon^*}{d\bar{q}} < 0$ . Nous obtenons alors le même résultat que dans le régime de congestion simple.

### 3.4.2 Synthèse graphique des situations de report modal

Dans notre modèle, les variations de la répartition modale sont conditionnées par le montant de l'allocation initiale de PCE fournie à chaque individu. Les résultats précédents ont montré que, pour obtenir lors de la mise en place des PCE la même répartition modale que celle de la situation de *statu quo*, il faut globalement attribuer autant de PCE que le nombre d'automobilistes qui circulaient dans la situation de *statu quo*. Dans la mesure où l'allocation est uniforme et destinée à l'ensemble des individus, une allocation cherchant à améliorer la part modale du bus engendre nécessairement un déficit en PCE pour tous les individus souhaitant se déplacer en automobile. Ce déficit conditionne la dynamique des échanges dans le marché.

Représentons graphiquement ces variations de la répartition modale. Nous y distinguons le régime de congestion. L'objectif n'est pas de maximiser le report modal en faveur du bus, car cela reviendrait à ne pas allouer des PCE aux individus et s'apparenterait à une interdiction totale de circuler.

La figure 4 permet d'observer la variation de la répartition modale en régime de congestion simple. Dans ce cas, la valeur du temps de basculement à l'équilibre du marché des PCE est inférieure à celle de la situation de *statu quo*. Cet événement implique que  $F(\tilde{\theta}^*) - F(\tilde{\theta}_0)$  usagers "historiques" de l'automobile vont effectuer un report modal et utiliser le bus après la mise en place du système de PCE. Dans ce cas, l'objectif de réduction de la congestion sur la voie automobile est accomplissable.

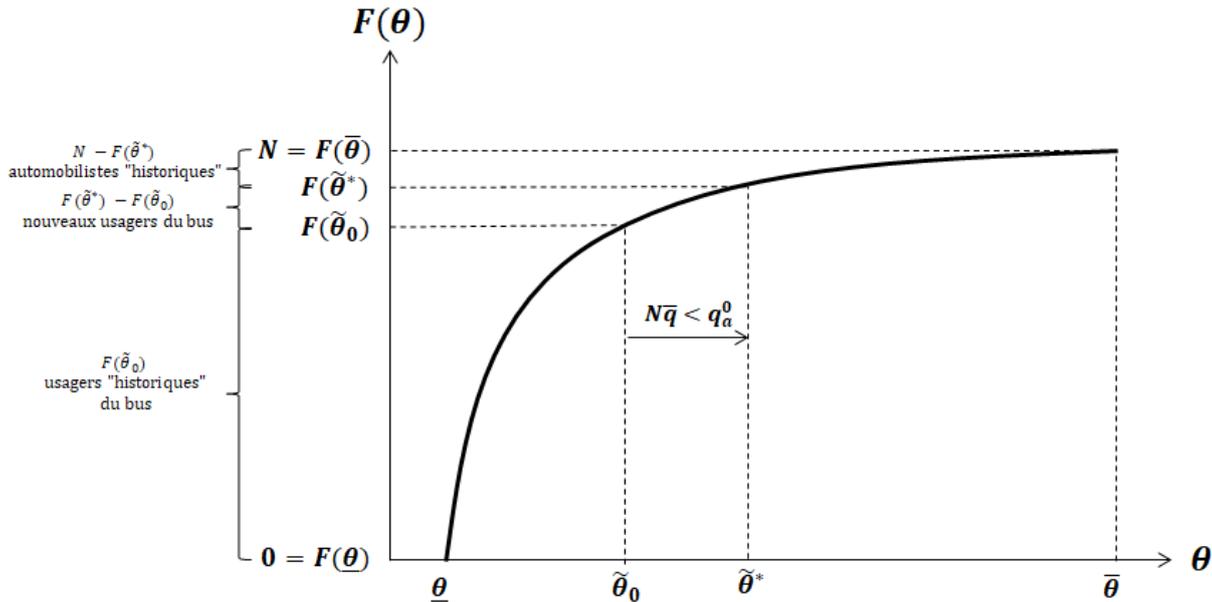


Figure 4 – Fonction de répartition modale en régime de congestion simple - Situation avec marché des PCE et report modal en faveur du bus

La figure 5 représente la variation de la répartition modale en régime d'hypercongestion.  $F(\tilde{\theta}_0) - F(\tilde{\theta}^*)$  usagers "historiques" de l'automobile vont effectuer un report modal vers le bus après la mise en place des PCE. Tout comme dans la situation de la figure 4, le système de PCE permettra de réduire la congestion sur la voie automobile.

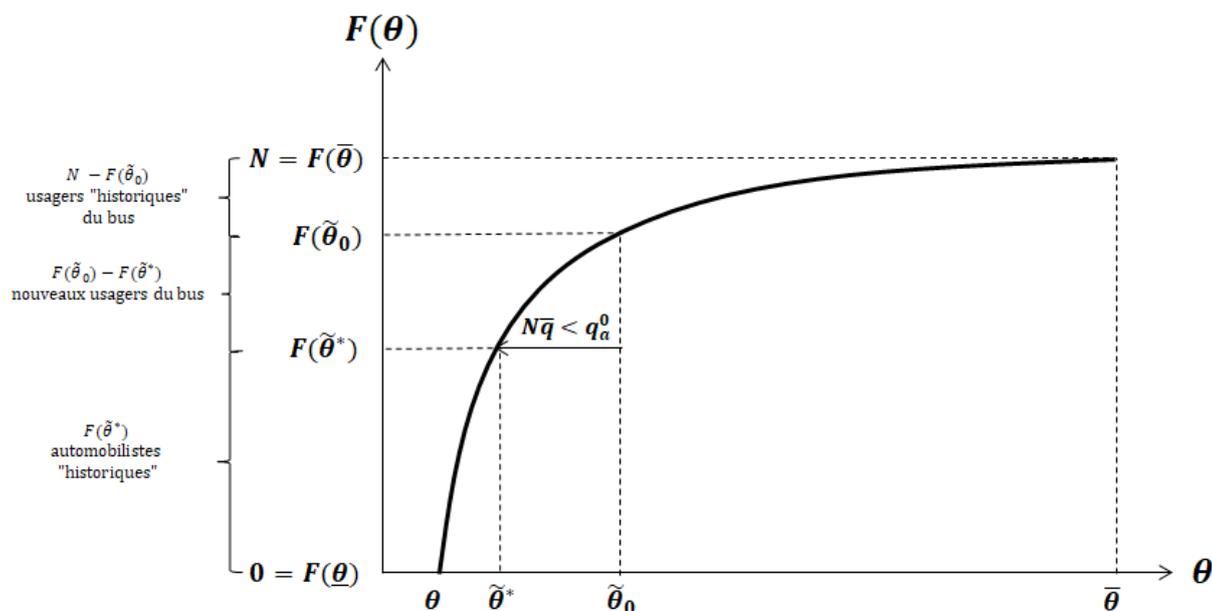


Figure 5 – Fonction de répartition modale en régime d'hypercongestion - Situation avec marché des PCE et report modal en faveur du bus

L'ensemble des résultats de ce modèle permettent de rendre compte, à notre échelle, des effets des PCE sur les choix modaux des individus. Le résultat principal de cette section est l'importance du montant de l'allocation initiale de PCE dans la variation de la répartition modale. Une allocation de PCE trop importante ne permettra pas de suivre la trajectoire qui mène à une mobilité urbaine plus soutenable. Notre modélisation pourra faire l'objet de multiples extensions afin de discerner l'ensemble des subtilités qui régissent les choix modaux. En effet, il existe de nombreux paramètres guidant les choix modaux que seul un montant des PCE désincitatif ne peut contrer. Les raisons symboliques et affectives peuvent dépasser les raisons économiques du choix de déplacement. De la même manière, nous aurions pu envisager l'effet d'un potentiel basculement du régime de congestion avec le système de PCE. Ce travail nécessiterait une réelle expertise économique sur l'analyse des déplacements des individus. Une approche mathématique plus complète, explicitant la dynamique du prix et des échanges dans le marché et du prix serait également nécessaire.

## Conclusion

Différents instruments de politique publique ont pour objectif d'agir sur la mobilité urbaine de manière directe, afin de la rendre durable. Nous avons donné quelques éclaircissements théoriques au sujet des PCE, cet outil quantitatif qui contourne les méfaits de la taxation. Ces derniers sont notamment l'inélasticité-prix de la demande de mobilité à court et moyen terme, la méfiance vis-à-vis de l'utilisation des recettes, l'iniquité en prix, ou encore la faible acceptabilité de la part de la population. Les PCE ne ponctionnent pas directement le budget des ménages pour assurer leur droit à la mobilité minimale. Les PCE, redistributifs, incitent les individus à des comportements de mobilité plus doux afin qu'ils puissent bénéficier d'une contrepartie financière ou d'autres avantages à l'échange du PCE non-utilisé. De tels échanges n'impliquent pas de flux financiers entre les individus et les pouvoirs publics.

Plusieurs types de PCE ont été proposés dans la littérature. Aucun n'a cependant été appliqué réellement dans les villes. Ceci peut s'expliquer par une mise en place longue, coûteuse et difficile du système, aussi bien financièrement que politiquement parlant. L'absence de retours d'expériences de cet instrument ne joue également pas en sa faveur. Pourtant, il semble que les bénéfices de cet instrument dépassent les coûts explicites et implicites de mise en place du système. Une forme hybride combinant péage et rationnement, alternative à ce potentiel bouleversement, a été proposée dans la littérature (Daganzo (1995) [24]; Nakamura & Kockelman (2002) [69]). Les individus sont affectés à des groupes. Selon les périodes, certains groupes devraient s'affranchir d'un paiement pour circuler. Les périodes étant différentes selon les groupes, il existe alors un rationnement de la mobilité. L'instrument s'apparente cependant plus à un système de péage différencié qu'à un système de quotas en tant que tel.

Le marché des PCE doit faire l'objet d'une volonté claire et transparente de la part de tous les acteurs de la mobilité, de l'AOM à l'utilisateur. Cette transparence est nécessaire pour diminuer les coûts d'accès et de transaction relatifs à la mise en place d'un tel système. Cette volonté doit être accompagnée d'une forme de normalisation à plus grande échelle, où des économies d'échelles pourront être réalisées. L'intervention des pouvoirs publics est elle-aussi nécessaire. Elle résulte des conditions trop restrictives pour que des échanges puissent se faire sereinement dans un marché concurrentiel des PCE, où la mobilité des individus en tant que liberté fondamentale est en jeu. La définition du périmètre spatio-tempo-modal de mobilité doit être adéquat au type de PCE envisagé. Il semble effectivement nécessaire de définir en amont les nuisances que l'on cherche à maîtriser. Rappelons qu'un tel outil ne se substitue en aucun cas à d'autres politiques de mobilité urbaine.

L'échange des PCE – alloués initialement de manière uniforme – sera bénéfique si celui-ci est contrôlé et le prix du PCE maîtrisé. Au-delà des considérations-mêmes relatives aux caractéristiques du marché, la virtualité du PCE semble nécessaire. Cette virtualité sera un atout afin de maîtriser en temps-réel ce marché, où le nombre d'agents économiques pourra être potentiellement élevé et le prix du PCE très dynamique. Cette dynamique du prix est aussi conditionnée par une allocation initiale de PCE bien calibrée. Cette allocation peut être déterminée dans une première phase d'apprentissage du marché.

Nous constatons que tous les instruments de mobilité doivent être inscrits dans un contexte certain : le progrès des nouvelles technologies. Avec celles-ci, la notion de MaaS (Mobility as a Service - voir par exemple Lyons et al. (2019) [60]) a émergé. Cette notion remet en cause le concept ancien et cloisonné d'offre et de demande de mobilité, tout en introduisant de nouvelles perspectives de mobilité urbaine prometteuses. Cette notion laisse aussi entrevoir de nouveaux problèmes à résoudre du point de vue de l'utilisateur. À titre d'exemple, nous pouvons citer la protection des

données, la maîtrise des plateformes de marché ainsi que la responsabilité à l'usage de nouveaux modes (notamment les véhicules autonomes). Dans un système collaboratif, coopératif, d'échange et de plateforme, les nouvelles technologies occupent une place considérable dans le système de PCE.

Introduire une plateforme de marché d'échange de permis domestiques implique la création d'un espace de production d'actifs immatériels. Parallèlement, les nouvelles technologies appuyant cette démarche font craindre une délégation partielle ou totale des leviers de la mobilité à des machines intelligentes. Aucune ville ne se ressemble en raison des rapports de force, de la taille de la ville, de la démographie et de la culture environnementale de la région dans laquelle elle se trouve. Le rôle des nouvelles technologies est aussi soumis à ces contraintes urbaines. Finalement, le virtuel apparaît encore incomplet dans la maîtrise des mobilités.

Les PCE ont alors une double ambition. La première est de réguler la mobilité urbaine par un système socialement acceptable, collaboratif et incitatif. La deuxième est de transformer la mobilité plus largement, en utilisant les nouvelles technologies comme modulateurs et fluidificateurs des déplacements. Volontarisme et pragmatisme sont alors les deux clés de voûte de la mise en place d'un instrument prometteur et modulable en fonction des besoins des villes.

Nous avons enfin proposé une modélisation économique d'un système de PCE journaliers. Nous avons constaté des situations dans lesquelles le report modal est en défaveur de l'usage de l'automobile. La condition de ce report modal réside dans le nombre de PCE émis et alloués par les autorités publiques. Le nombre de PCE détenus par l'ensemble des individus ne doit pas excéder le nombre d'individus qui utilisaient leur automobile pour se déplacer avant que le système de PCE ne soit mis en place. Cette rareté impulse en même temps les échanges dans le marché des PCE.

Nous avons exposé tout au long de ce chapitre les différents éléments théoriques à prendre en compte lors de la mise en place des PCE. Cet instrument n'a pas encore vu le jour dans nos villes. Il n'existe donc aucun retour d'expérience capable de conforter notre théorie à des observations pratiques. Dans le chapitre suivant, nous analysons empiriquement les tendances relatives aux effets hypothétiques d'un marché des PCE pour la ville de Montpellier. Cette analyse s'appuie sur une enquête-mobilité, proposant un exercice de ludification des PCE.

## Chapitre 2

Ludification des permis à circuler  
échangeables et analyse empirique  
des choix hypothétiques de  
déplacement dans la ville de  
Montpellier (France)

## Résumé

Une allocation rationnelle des permis à circuler échangeables (PCE) impliquera qu'une frange d'individus devra acquérir des PCE supplémentaires dans un marché d'échange, pour continuer à se déplacer autant qu'avant en mode "lourd". Cette acquisition ne pourra se faire que si une autre frange d'individus est disposée à céder des PCE au prix de marché. Dans la mesure où l'objectif quantitatif collectif, fixé en amont, reflètera la volonté d'une réduction des mobilités non-durables, alors la quantité de PCE sur le marché ne satisfera pas l'ensemble des déplacements en mode "lourd" qui auraient été exercés dans une situation de *statu quo*.

Une ludification des PCE et un jeu d'enchères nous permettent d'évaluer les consentements à payer et à recevoir d'un échantillon d'individus de l'aire urbaine de Montpellier, afin qu'ils puissent acheter ou vendre des PCE dans le marché. Après avoir confronté l'offre de PCE à la demande de PCE et rééquilibrer notre échantillon, l'échange dans le marché des PCE engendre une réduction du trafic des modes "lourds" autour de 15%. Cette proportion ne tient pas compte du caractère incitatif des PCE visant les "pollueurs-payeurs" à réduire leur consommation de PCE. Au-delà des incitations financières dans le but de réduire les déplacements en mode "lourd", l'échange dans le marché génère lui-même le report modal de déplacements contraints. La mise en place de mesures favorisant l'usage des transports alternatifs est nécessaire, tout comme celle de mesures favorisant l'attractivité de la ville, en combinant promotion du territoire et consommation de PCE. Les PCE offrent alors des perspectives prometteuses pour l'accomplissement de l'objectif de soutenabilité de la mobilité, sans peser lourdement sur le budget des ménages.

Nous avons enfin eu recours aux analyses factorielles discriminantes afin de mettre en exergue les déterminants individuels favorisant la mise à l'écart des individus du marché des PCE. Les individus peuvent eux-mêmes se mettre à l'écart

du marché en guise de rejet de la mesure. Ils peuvent aussi être exclus du marché en raison d'un consentement à payer des PCE trop faible. Les caractères individuels majeurs discriminant les individus sont le revenu et ses facteurs explicatifs classiques (CSP, âge, localisation et sexe), ainsi que la perception individuelle de certains événements de mobilité (perte de temps, danger lié au comportement de déplacement des autres citoyens et responsabilité individuelle dans les nuisances collectives). Le revenu joue un rôle séquentiel dans la mise à l'écart des individus. D'une part, les individus détenant de hauts revenus sont prédisposés à s'écarter volontairement du marché et à ne pas accepter de devoir acquérir des PCE sur le marché pour pouvoir se déplacer. D'autre part, parmi l'ensemble des individus souhaitant acquérir des PCE, les revenus les plus modestes sont exclus du marché des PCE en raison d'un consentement à payer des PCE trop faible. La mesure est alors inéquitable sous certains aspects. Plusieurs implications sur la définition des politiques publiques relatives à la mobilité urbaine clôturent ce chapitre.

**Mots-clés** : mobilité urbaine durable, permis à circuler échangeables, disposition à payer, disposition à recevoir, marché hypothétique, courbe offre-demande, trafic, analyse factorielle discriminante.

## **Introduction**

La rédaction de ce chapitre a été motivée par l'introduction de nouvelles opportunités d'arbitrage sur les choix de déplacement avec le marché des PCE. Ces opportunités ajoutent un obstacle à l'agrégation des préférences. En effet, le choix de déplacement guidé par une multitude de paramètres "classiques", allant des raisons économiques aux choix affectifs et symboliques, est maintenant soumis aux lois d'un marché des PCE dans la ville.

Les individus deviennent propriétaires de permis à se déplacer dans la ville en mode "lourd". Dans notre sujet, un mode "lourd" est considéré comme un mode individuel concerné par la restriction de mobilité. C'est également un mode qui génère des externalités négatives telles que la pollution, la congestion, le bruit, ou encore la dégradation des infrastructures. Les individus peuvent consommer leurs permis, en vendre tout ou partie, ou en acheter davantage. Ils peuvent aussi les perdre en n'effectuant aucune des actions précédemment énoncées car les permis ont une durée de validité limitée. Il devient alors fondamental d'analyser ces usages lorsqu'on étudie les choix de déplacement.

Un autre argument penchant en faveur de cette étude est de constater que, les permis étant limités, le rationnement introduit une contrainte sur le nombre de voyages globaux. Cela impose que, même si l'individu est prêt à payer pour se déplacer, les individus qui ont un consentement à payer des PCE non-nul mais qui est inférieur au prix de marché ne pourront pas assurer l'intégralité de leurs déplacements habituels en mode "lourd".

Une enquête en ligne a été diffusée, à destination des habitants de l'aire urbaine de Montpellier, dans laquelle un jeu sérieux sur les PCE est proposé. L'objectif de ce jeu est de mettre en évidence empiriquement les influences qu'aura le marché

hypothétique des PCE sur les déplacements urbains des individus. Ce jeu a pour vocation de mettre en lumière, sur une seule période, les dispositions marginales à payer et à recevoir des PCE de chaque individu dans un marché hypothétique. Le croisement des dispositions marginales à payer et à recevoir nous permet d'obtenir les courbes d'offre et de demande de PCE et, partant, les implications du marché d'échange sur le devenir des déplacements automobiles de la période actuelle. Plus globalement, ce jeu permet aussi de faire connaître le système de PCE, dans la mesure où cet instrument est très peu connu par la population.

L'enquête, son périmètre, ses objectifs et sa structure sont présentés dans la première section de ce chapitre. Le jeu est présenté dans la deuxième section de ce chapitre. La mise en lumière des phases de révélation des dispositions marginales à payer et à recevoir des PCE de chacun des individus fait l'objet de la troisième section de ce chapitre. Grâce à ces consentements, nous élaborons les courbes d'offre et de demande des PCE en fonction du prix. Ces courbes permettent d'évaluer le nombre de déplacements reportés par la mise en place des PCE. Ces éléments figurent dans la quatrième section de ce chapitre. Nous proposons dans une cinquième section de projeter les résultats obtenus à l'échelle de la population de l'aire urbaine de Montpellier. L'objectif est d'émettre des messages-clés à destination des pouvoirs publics locaux au sujet de l'impact d'un marché des PCE sur les choix de déplacement. Enfin, deux analyses factorielles discriminantes sont exposées à la dernière section de ce chapitre. Ces analyses ont pour objectif de trouver les déterminants d'exclusion des individus du marché en tant qu'acheteur, que ce soit par une volonté franche de ne pas payer pour acquérir des PCE ou par le fait d'un consentement à payer des PCE non-nul mais qui est inférieur au prix de marché. Nous concluons cette dernière section en proposant des mesures complémentaires et/ou compensatoires améliorant le fonctionnement et l'acceptabilité des PCE.

# 1 Périmètre, objectifs et structure de l'enquête-mobilité

## 1.1 Montpellier, sa métropole, son aire urbaine

D'après les chiffres pour 2016 de l'INSEE (2019) [51], Montpellier Méditerranée Métropole (M3M) est composée d'environ 465 000 habitants répartis sur 31 communes (dont quelques 280 000 sur la ville de Montpellier), dans une aire d'environ 439 km<sup>2</sup>. Du côté de l'aire urbaine, ce sont 616 000 habitants (INSEE (2020) [52]) qui occupent actuellement 115 communes. Forte d'un tissu économique dense et berceau d'une multitude de *start-ups* innovantes, la ville de Montpellier capte beaucoup plus d'actifs vivant hors de ses frontières qu'elle n'en laisse partir pour aller travailler quotidiennement. On voit alors immédiatement la problématique de congestion à l'entrée de la ville de Montpellier le matin, et à la sortie de la ville en fin d'après-midi. En même temps, si l'on regarde la projection de la population de la métropole de Montpellier à l'horizon 2030, d'après le Schéma de Cohérence Territoriale (SCOT) de M3M<sup>1</sup>, celle-ci graviterait autour de 545 000 habitants, soit une augmentation de 17% de la population. Cet accroissement de la population laisse sous-entendre la nécessité d'endiguer la congestion et de soulager la saturation des réseaux "historiques" de transport, tout cela dans un contexte d'aménagement de nouvelles zones habitables.

Du côté des infrastructures de transport, le maillage routier permettant d'accéder à la ville de Montpellier est dense, sans rocade périphérique complète mais avec deux autoroutes, une permettant d'accéder à Montpellier (A9) et une traversante (A709). Cette dernière est censée fluidifier le trafic en période de pointe. Nous pourrions d'ailleurs discuter des résultats escomptés de ce projet. En effet, ce projet pourra s'avérer inefficace sur un horizon temporel plus long en raison des nouveaux effets

---

1. [https://www.montpellier3m.fr/sites/default/files/t1\\_l1\\_diag.pdf](https://www.montpellier3m.fr/sites/default/files/t1_l1_diag.pdf)

d'opportunité d'usage de l'autoroute<sup>2</sup>. Par ailleurs, un réseau de bus départemental lie la ville de Montpellier aux villes et aux villages du département. Ces bus passent notamment dans des localités où les trains express régionaux (TER) ne circulent pas.

Sur le transport ferroviaire, une nouvelle gare TGV et une portion de ligne à grande vitesse (LGV) permettant de lier Montpellier à Paris exclusivement en LGV ont été construites. Bien que décriées par ses détracteurs, ces infrastructures ont été inaugurées en 2018 afin de désengorger l'axe ferroviaire Montpellier-Nîmes trop souvent saturé et de réduire à plus long-terme le temps de parcours entre la région Occitanie et les grands pôles urbains français. Le réseau ferroviaire de transport régional s'articule principalement autour d'un axe Nîmes-Perpignan, avec un embranchement dans la ville de Narbonne afin de se diriger vers la ville de Toulouse, la capitale régionale.

En termes de réseau urbain, la métropole de Montpellier est dotée de 4 lignes de tramway, selon un axe ouest/sud-est pour la première et la troisième ligne et selon un axe nord-est/sud-ouest pour la deuxième ligne. La quatrième ligne de tramway est circulaire et dessert le centre-ville et ses alentours. Afin de mailler davantage le territoire, 36 lignes de bus desservent la métropole de Montpellier. Cette offre de transport ne cesse de croître depuis les dix dernières années. Selon l'enquête ménages-déplacements (EMD) de 2014 pour la métropole de Montpellier, ceci implique une hausse de 50% de la fréquentation des transports collectifs entre 2007 et 2014. Pour cette raison, plusieurs autres projets voient le jour, notamment la création de lignes de bus à haut niveau de service (BHNS), le prolongement de la ligne 1 de tramway vers la nouvelle gare TGV, la mise en place de pôles d'échanges multimodaux (PEM) et la construction d'une cinquième ligne de tramway pour 2025 selon un axe nord/sud-ouest. Notons aussi qu'il est possible de louer des véhicules

---

2. cf. Downs (1962) [34].

en libre-service (Modulauto) et, pour les véhicules électriques, M3M est dotée de 150 points de recharge au moment de la rédaction de ce chapitre.

Enfin, concernant les modes "doux" actifs, la métropole de Montpellier est dotée de 160 km de pistes cyclables, avec la possibilité de louer des vélos en libre-service (Véломagg') dans 57 vélostations. L'année 2020 est marquée par le développement de voies mixtes expérimentales, dans lesquelles les modes "doux" actifs et les bus cohabitent en lieu et place d'une partie de la voirie automobile.

À l'échelle des individus de la métropole de Montpellier, d'après le SCOT de M3M où sont exposés les résultats de l'EMD de 2014 :

- Un habitant effectue en moyenne 4 déplacements par jour.
- 80% des déplacements d'un habitant de Montpellier se font pour rester dans la ville.
- Les motifs de déplacements se répartissent de la manière suivante : achats (21%), travail (20%), accompagnement (15%), scolaire et études supérieures (12%), visite à la famille et aux amis (8%), loisirs (7%), et autres (e.g. démarches administratives) (17%).
- Les parts modales se caractérisent par une prépondérance de la voiture particulière, représentant 52% des déplacements. Cette part est en baisse depuis 2004 au profit des transports collectifs et des modes "doux" actifs. 29% des déplacements se font à pied, 13% en transport collectif, 4% en vélo, 2% en deux-roues motorisés et le reste avec d'autres modes de déplacement.
- Le taux de motorisation est en diminution par rapport à 2004 (-4,3%). Cela s'explique en partie par un effet de substitution entre transport électronique des informations et transport physique des personnes (e.g. télétravail et démarches administratives numérisées). Une autre explication provient du développement des réseaux de transport alternatif. Enfin, cet événement peut s'expliquer par le délaissement progressif des véhicules motorisés dans la po-

pulation jeune (DRIEA (2010) [30]), au profit des nouveaux modes alternatifs de déplacement.

- La période de pointe est plus prononcée le matin (de 8 heures à 9 heures 15) que le soir (de 17 heures à 19 heures), en raison de la plus forte contrainte-horaire de l'heure d'arrivée sur le lieu de travail que celle de l'heure de départ pour retourner à son domicile.
- L'intermodalité transport collectif / voiture particulière est très faible : elle représente moins de 1% des déplacements des habitants de la métropole de Montpellier. L'évolution de cette proportion sera un véritable enjeu lors de la mise en place des PCE. Une attention sera portée à la nécessité d'améliorer l'usage des parkings relais implantés aux portes de la ville de Montpellier.

## 1.2 Objectifs généraux de l'enquête-mobilité

Nous souhaitons mettre en lumière, de façon empirique, les éléments théoriques majeurs présentés au premier chapitre qui justifient les perspectives prometteuses des PCE dans l'objectif de soutenabilité de la mobilité. Nous avons regroupé ces éléments en deux axes :

- Le marché des PCE génère lui-même les signaux en faveur de la réduction du trafic routier. Nous souhaitons estimer l'impact des échanges de PCE sur les choix de déplacement, avec une allocation rationnelle de PCE. Cette allocation globale, fixée en amont en fonction de l'objectif quantitatif collectif, est insuffisante pour que tous les déplacements pré-PCE effectués habituellement en mode "lourd" le soient aussi dans la période post-PCE. Cet axe sera abordé dans ce chapitre.
- La réussite économique et sociale des PCE est conditionnée par l'acceptabilité de l'instrument par les citoyens. La littérature scientifique fait état d'une meilleure acceptabilité des PCE par rapport à celle des instruments classiques

de restriction de la mobilité urbaine. Une recherche des déterminants de cette acceptabilité est nécessaire afin de définir les politiques publiques adéquates d'intégration des PCE dans le système-mobilité. Cet axe fera l'objet du troisième chapitre de cette thèse.

### 1.3 Contexte et structure de l'enquête-mobilité

L'enquête a été mise en forme et publiée en ligne sous un format numérique, à l'aide du logiciel d'enquête Eval&GO. Sa trame est disponible en annexe A et B. Ce projet s'inscrit dans l'initiative POTEM (Promouvoir les plateformes d'échanges pour faciliter la transition énergétique et les mobilités durables) de l'I-SITE MUSE (Montpellier Université d'Excellence), initiative pilotée par le laboratoire de recherche Montpellier Recherche en Économie (MRE). La récolte des réponses à cette enquête a débuté le 17 mars 2019, pour se terminer deux mois après. Sa diffusion a été effectuée au moyen des réseaux sociaux (Facebook, LinkedIn, Twitter), de différents sites web (Faculté d'Économie de Montpellier, laboratoires de recherche) et au moyen d'un acteur institutionnel, la Chambre de Commerce et d'Industrie du département de l'Hérault. L'enquête n'a pas été diffusée au travers des instances de la métropole de Montpellier, peut-être était-ce une crainte des pouvoirs publics locaux que d'imaginer les individus croire que cette enquête parlant d'instrument de restriction à la mobilité soit diligentée par les pouvoirs publics eux-mêmes. Notons que cette enquête a vu le jour un an avant les élections municipales.

Le temps moyen de réponse à cette enquête, fourni par la plateforme de conception de l'enquête, est d'environ 12 minutes. La collecte des données a permis d'extraire 512 réponses complètes, sur un total de 900 réponses.

L'enquête est découpée en plusieurs parties. Dans un premier temps, les individus sont invités à dévoiler les éléments socio-démographiques qui les caractérisent tels

que le sexe, l'âge, la catégorie socioprofessionnelle (CSP), la composition du ménage et la tranche de revenu du ménage. Dans un deuxième temps, nous avons demandé aux individus les principales caractéristiques de leur mobilité urbaine telles que l'existence de contraintes familiales de mobilité au quotidien, la localisation de leur lieu de vie et de travail<sup>3</sup>, ainsi que la distance les séparant, le degré de flexibilité des horaires de travail, le degré de variation des usages des modes de déplacement pour se rendre au travail, ou encore le degré d'usage des modes de déplacement quel que soit le motif du déplacement. Quelques statistiques et analyses descriptives générales de notre échantillon, relatives à l'ensemble des éléments cités dans ce paragraphe, peuvent être consultées en annexe C.

Ensuite, nous avons souhaité mesurer les perceptions individuelles des événements de mobilité urbaine (congestion automobile, pollution atmosphérique, danger lié aux comportements des autres citoyens, difficulté d'être informé sur les conditions de déplacement et responsabilité dans les nuisances collectives). L'acceptabilité d'autres instruments de politique publique relatifs à la mobilité urbaine est aussi mesurée dans cette enquête : péage urbain, interdiction de circulation aux véhicules les plus polluants, hausse du prix du stationnement et du carburant, aide à l'achat de véhicules propres, information  $CO_2$ , amélioration du réseau de transport collectif et de ses différentes sources d'information associées, et gratuité des transports collectifs financée par une augmentation des impôts.

Les dernières pages numériques de cette enquête sont consacrées à un jeu sérieux sur la mise en place potentielle des permis à circuler échangeables et à la mesure de l'acceptabilité de cet instrument. Nous allons présenter le jeu à la section suivante. Une étude sur l'acceptabilité des PCE sera proposée au troisième chapitre de cette thèse.

---

3. Nous définissons ici un "travail" comme étant l'exercice d'un emploi ou le fait de faire des études, impliquant alors des migrations pendulaires quotidiennes.

## 2 Design du jeu sérieux sur les PCE

### 2.1 Enjeux, contextualisation et vérification de la bonne compréhension du système de PCE

Le jeu, figurant en annexe B, a pour objectif d'étudier les comportements des individus sur un marché hypothétique des PCE. Dans ce marché, la volonté de céder ou d'acheter des PCE est un signal des tendances sur les choix de déplacement post-PCE. En effet, si l'individu n'est pas disposé à payer pour acquérir des PCE dont il aurait besoin pour se déplacer, alors celui-ci sera contraint à effectuer ses déplacements à l'aide d'un mode alternatif au mode "lourd". Dans le cadre d'un motif du déplacement qui n'est pas contraint dans le temps ou dans l'espace, l'individu pourra annuler ses déplacements, les reporter dans un autre lieu ou à un autre moment où il dispose déjà des PCE pour se déplacer.

La définition en amont de l'objectif quantitatif collectif à ne pas dépasser impose la rareté des PCE, afin que les individus soient incités à revoir leurs choix de déplacement. Cette rareté, permettant ainsi de réduire les déplacements en mode "lourd", se retrouvera dans l'allocation de PCE attribuée à chacun des individus. Nous avons démontré la nécessité de cette rareté dans la modélisation économique figurant à la dernière section du premier chapitre de cette thèse. Celle-ci impliquera des échanges sur un marché entre les individus qui souhaitent acheter des PCE et ceux qui souhaitent en vendre. Il n'est alors pas certain qu'un individu obtienne sur le marché les PCE qu'il souhaite, au prix qu'il consent à payer.

Nous allons mettre les individus possédant au moins un mode "lourd", avec lequel ils se déplacent dans la ville de Montpellier, dans une situation où la quantité de PCE qui leur est allouée est insuffisante pour effectuer l'ensemble de leurs déplacements

avec ce mode. Deux conditions seront nécessaires pour que les individus puissent acheter des PCE sur le marché :

- D'autres individus doivent mettre en vente des PCE sur ce marché, au prix de marché. Dans ce cas, nous pensons immédiatement aux individus disposant de PCE par la règle d'allocation de ces permis, mais qui ne disposent pas des modes de déplacement assujettis au prélèvement des PCE. Ces individus ont alors une importante propension à la cession de leur PCE, à condition que le prix de marché des PCE soit incitatif et que les individus prennent part au marché. De manière générale, tous les individus qui disposent de PCE après avoir effectué l'ensemble de leurs déplacements sont alors des potentiels vendeurs de PCE.
- L'individu qui demande des PCE doit être disposé à les acquérir au prix de marché. Un prix trop élevé des PCE contraindra l'individu à ne plus pouvoir se déplacer en mode "lourd". Même si cette restriction a un impact bénéfique considérable sur l'usage des modes "lourds", il est évident que l'ensemble des secteurs économiques en pâtira à cause de la perte d'attractivité de la ville. Le transport collectif risque d'être saturé et les tensions économiques et sociales peuvent s'intensifier.

La confrontation de l'offre et de la demande de PCE nous permettra de mesurer l'effet du marché hypothétique des PCE sur les déplacements en mode "lourd". Nous définissons, dans cette étude et en fonction du prix du PCE, l'offre de PCE comme étant la quantité de PCE offerte sur le marché par les individus qui n'ont pas besoin d'une certaine proportion de leur PCE pour se déplacer. La demande de PCE, quant à elle, est définie comme étant la quantité de PCE demandée par l'ensemble des individus souhaitant se déplacer en mode "lourd" et qui n'ont pas suffisamment de PCE avec l'allocation initiale des pouvoirs publics pour le faire. Nous allons décrire le design du jeu nous permettant d'aboutir à l'élaboration des

courbes d'offre et de demande de PCE, et à la détermination du prix d'équilibre du PCE sur le marché.

Avant toute chose, il convient de présenter, de manière simple, le fonctionnement d'un système de PCE aux individus. C'est la première étape du jeu. Afin que les individus s'approprient le concept de PCE, il leur a été demandé d'imaginer avoir en leur possession une quantité de "jetons" électroniques, allouée gratuitement par la municipalité. Avec ces jetons, les individus peuvent se déplacer dans la ville de Montpellier en automobile, moto ou scooter. Les usagers peuvent aussi revendre, ou garder tout ou partie de ces PCE jusqu'à la fin de leur durée de validité (ici, deux semaines après la détention de l'allocation). Cette période relativement courte empêche les individus de pouvoir imaginer qu'ils pourront faire fructifier sur le long-terme les PCE avec les variations du prix de marché des PCE induites par les variations de l'offre et de la demande.

Un système de prélèvement simple de PCE est ensuite présenté. Nous avons choisi de proposer aux individus un PCE journalier car le fonctionnement de ce type de PCE est sans doute le plus simple à comprendre et à présenter dans une enquête. Le déplacement en automobile, moto ou scooter dans la ville de Montpellier nécessite deux jetons par jour de déplacement du lundi au vendredi, un jeton le samedi. Le dimanche est un jour de circulation libre, aucun jeton n'est alors prélevé. Tout usage d'un autre mode de déplacement est exempté d'utilisation de PCE, quel que soit le jour de circulation.

Tous ces éléments sont illustrés au travers de l'exemple d'une cheffe d'entreprise, TaMara<sup>4</sup>, qui n'habite pas dans la ville de Montpellier. Dans cette contextualisation, TaMara travaille à Montpellier du lundi au vendredi, effectue des achats en famille le samedi dans cette même ville et ne se déplace pas le dimanche. Elle utilise les transports collectifs pour se rendre à Montpellier le mercredi. Elle utilise en revanche

---

4. En référence à la compagnie TaM, opératrice du système de transport collectif de Montpellier.

sa voiture le reste du temps, c'est-à-dire le lundi, mardi, jeudi, vendredi et samedi. TaMara a alors besoin de 2 jetons (lundi) + 2 jetons (mardi) + 0 jeton (mercredi) + 2 jetons (jeudi) + 2 jetons (vendredi) + 1 jeton (samedi) + 0 jeton (dimanche) = 9 jetons pour assurer ses déplacements hebdomadaires en voiture. Or, nous stipulons dans l'enquête que la municipalité lui a alloué 7 jetons. Dans ce contexte, TaMara a donc un choix à faire : acheter les deux jetons qui lui manquent, ou bien modifier ses comportements de mobilité.

Un test de compréhension de la situation de TaMara suit cette contextualisation, afin de renforcer et conforter la bonne compréhension des répondants au fonctionnement des PCE. Quatre questions sont posées. La première question permet de vérifier que les individus ont compris qu'utiliser les transports collectifs ne nécessite pas la consommation de PCE. La deuxième question permet de confirmer que les individus ont bien compris qu'un déplacement en semaine en mode "lourd" (i.e. en voiture, moto ou scooter) nécessite la consommation de deux PCE. La troisième question est de la même veine que la deuxième, pour un jour de déplacement le samedi (un seul PCE est nécessaire ce jour-là pour se déplacer en mode "lourd"). Enfin, la dernière question permet de rappeler aux individus que les PCE ont une durée de validité restreinte (deux semaines).

## **2.2 Mesure des dispositions marginales à payer et à recevoir des PCE**

L'élaboration des courbes d'offre et de demande de PCE, en fonction du prix de marché, nécessite de connaître les consentements à payer et à recevoir des PCE de chaque individu. Avant d'évaluer ces consentements, nous avons demandé à chaque individu détenant un mode "lourd" quel serait son besoin en PCE pour une semaine habituelle. À partir de cette déclaration, nous avons demandé à ceux qui ont un

besoin non-nul de PCE de supposer que l'allocation initiale de PCE qui leur a été fournie correspondait à leur besoin en PCE, moins un PCE. À partir de ce déficit unitaire individuel, nous allons chercher à évaluer la disposition marginale à payer (DmP) un PCE des individus utilisant un mode "lourd" pour se déplacer dans la ville de Montpellier. L'agrégation de ces DmP nous permettra de mettre en perspective la demande de PCE sur le marché.

Pour tous les autres individus, c'est-à-dire ceux qui ne détiennent pas de mode "lourd" ou qui en détiennent au moins un, mais qui ne se déplacent pas à Montpellier avec ce mode, nous leur avons demandé d'imaginer posséder un PCE en trop qu'ils peuvent vendre sur le marché. En fonction du prix de marché, nous pouvons alors évaluer la disposition marginale à recevoir (DmR) de chaque individu pour qu'il cède son PCE dans le marché. L'agrégation de ces DmR sera l'expression de l'offre de PCE sur le marché.

### **2.2.1 Préférences révélées, préférences déclarées ? Choix de la méthode de déclaration des dispositions**

Pour un bien marchand, la disposition à payer est le prix le plus haut qu'un acheteur est prêt à payer pour acquérir ce bien. La disposition à recevoir est le prix le plus bas qu'un vendeur est prêt à recevoir pour céder le bien. La littérature sur les méthodes d'évaluation des dispositions à payer ou à recevoir est abondante au sujet des biens potentiellement réguliers dans le futur et des effets bénéfiques ou maléfiques issus de la mise en place de projets collectifs. Nous allons focaliser notre propos sur deux méthodes appartenant à la famille des méthodes de préférences déclarées : l'évaluation contingente et la méthode des choix discrets. Les méthodes de préférences révélées seront ensuite brièvement abordées.

Une première méthode permettant l'élicitation des consentements à payer ou à recevoir est celle de l'évaluation contingente. L'objectif de cette évaluation est d'obtenir directement de l'individu son consentement à payer ou à recevoir un bien ou une ressource dans le cadre d'un marché hypothétique. Cette évaluation permet également d'évaluer les consentements à payer ou à recevoir afin de bénéficier (ou de pâtir) des effets d'un projet collectif hypothétique.

À titre d'exemple, dans une étude sur l'amélioration de la qualité de l'air à Nanjing, en Chine (He & Zhang (2018) [49]), les auteurs ont eu recours à des évaluations contingentes répétées. Afin de mesurer les dispositions à payer pour améliorer la qualité de l'air, une enquête a été menée toutes les deux semaines, 29 fois, à différents endroits de la ville. Après avoir pris connaissance de la problématique de la pollution de la ville et des mesures que les autorités envisagent de mettre en place, les individus étaient invités à voter en faveur d'une taxe sur la facture d'eau courante pour financer un projet d'amélioration de la qualité de l'air. Plusieurs niveaux de taxe ont été proposés, déterminant ainsi le consentement à payer de chaque individu pour améliorer, à son échelle, la qualité de l'air en contribuant à ce projet collectif. D'autres évaluations contingentes ont été menées, pour des projets divers et variés, par exemple pour déterminer le consentement à payer une taxe carbone en Italie (Rotaris et Danielis (2019) [85]).

Une seconde méthode est celle des choix discrets, plus connu en anglais sous le nom de *Discrete Choice Experiment*, basée sur la théorie de l'utilité aléatoire de McFadden (1973) [62]. Cette méthode consiste à faire choisir à chacun des individus le scénario qui engendre le plus grand niveau d'utilité parmi plusieurs choix hypothétiques, vis-à-vis d'un scénario de référence, la plupart du temps le *statu quo*. Dans le cas d'un projet collectif ou d'une politique publique, les modèles probabilistes peuvent permettre *in fine* d'estimer l'impact monétaire individuel et le consentement à payer ou à recevoir afin de mettre en place le projet ou la politique.

Cette méthode a été utilisée dans le domaine de l'énergie. Elle a permis de trouver le consentement à payer des ménages pour différents projets d'amélioration du service de distribution de l'électricité en Corée du Sud (Huh et al. (2015) [50]). Dans cet article, chaque individu devait choisir le projet énergétique qu'il préférerait parmi plusieurs scénarios possibles. Dans chacun des scénarios était mentionné l'impact monétaire individuel de ces projets sous la forme d'une hausse de la facture d'électricité individuelle. Un modèle logit mixte a ensuite permis de déterminer le consentement à payer médian pour chacun des projets. Dans le domaine des transports, cette méthode a notamment permis de monétiser la disposition à payer (en euros ou en unités de temps) pour améliorer la fiabilité du temps de déplacement ferroviaire (Beaud et al (2016) [8]).

Les deux méthodes ci-dessus s'opposent aux méthodes de préférences révélées, utilisant des biens ou des marchés de substitution afin d'évaluer les consentements à payer ou à recevoir pour pouvoir, entre autres, accéder à des biens non-marchands (par exemple, un site naturel). Une de ces méthodes est celle du coût de transport, qui évalue implicitement le consentement à payer pour accéder à un site géographique par rapport à la dépense en transport engagée. Nous n'approfondirons pas davantage ces méthodes, dans la mesure où nous traitons dans ce chapitre de biens marchands.

Quelle méthode utiliser pour notre travail? Les PCE domestiques n'ont aucune application dans la réalité. Ainsi, la révélation du consentement à payer ou à recevoir pour l'achat ou la vente de PCE au travers d'alternatives ou des marchés de substitution sera mal évalué. Cet instrument est moins connu que d'autres, comme par exemple le péage urbain. Par conséquent, les méthodes de préférences révélées et la méthode des choix discrets ne nous semblent pas adéquates pour aborder notre sujet. Dans notre cas, une évaluation subjective doit être produite, en demandant directement aux individus leurs consentements individuels à payer pour se déplacer davantage, ou à recevoir pour proposer des PCE sur le marché et donc réduire leurs

déplacements en mode "lourd". La méthode des évaluations contingentes fondée sur un marché hypothétique des PCE nous permet d'élaborer une étude individuelle des PCE.

Cela dit, questionner chaque individu sur son consentement à payer ou à recevoir un PCE comporte un risque. Une question ouverte peut effectivement conduire à des résultats beaucoup trop éloignés de la réalité. L'individu n'ayant jamais rencontré dans la vie réelle le système de PCE, valoriser l'inconnu de prime abord est un exercice assez complexe qui pourrait aboutir à des évaluations peu pertinentes. Il convient alors de trouver un mécanisme permettant de révéler ces consentements, sans laisser la possibilité à l'individu de déclarer un montant. Plusieurs méthodes d'élicitation existent, nous décidons d'utiliser le jeu d'enchères pour révéler ces dispositions. Cette méthode a été proposée par Davis (1964) [27]. Elle consiste à déterminer si l'individu est prêt à payer (ou à recevoir) le montant de l'enchère à partir d'une première enchère fixée par l'enquêteur.

La version originelle de cette méthode, pour la captation d'une disposition à payer, consiste à augmenter le montant de l'enchère progressivement jusqu'au seuil où l'individu n'est plus prêt à payer le montant de l'enchère. Dans le cas de l'étude d'une disposition à recevoir, l'enchère diminue progressivement, jusqu'au seuil où l'individu refuse de recevoir le montant de l'enchère. Les différentes propositions de prix permettent à l'individu de faire face au minimum à deux prix différents dans son choix, si le seuil initial est ni trop haut (pour les consentements à payer), ni trop bas (pour les consentements à recevoir).

Afin de guider les individus dans cet exercice d'évaluation monétaire d'un bien méconnu, les PCE, nous pouvons faire correspondre plusieurs propositions de prix de PCE avec des biens de mobilité, au même prix, que l'individu connaît. Nous proposons alors d'utiliser une version hybride de la méthode du jeu d'enchères. En

mettant en place un marché hypothétique des PCE, nous mesurons les dispositions à payer et à recevoir des PCE par un système d'enchères. L'enchère peut être ascendante ou descendante. Considérons l'exemple des dispositions marginales à payer. L'enchère sera ascendante si l'individu est prêt à payer le montant de l'enchère. Elle sera descendante si l'individu n'est pas prêt à payer le montant de l'enchère. Considérons maintenant les dispositions marginales à recevoir. L'enchère sera ascendante si l'individu n'est pas prêt à recevoir le montant de l'enchère. Elle sera descendante si l'individu est prêt à recevoir le montant de l'enchère. Plusieurs précautions s'imposeront sur les résultats d'un tel jeu d'enchères, les limites de cette méthode seront abordées au fil de la rédaction de ce chapitre.

### **2.2.2 Mesure des dispositions marginales à payer (DmP) pour l'achat d'un PCE**

Afin de trouver la disposition marginale à payer un PCE, il a été demandé aux répondants d'imaginer qu'il leur manquait un jeton pour assurer l'ensemble des déplacements qu'ils effectuaient habituellement en voiture, moto ou scooter. Le fait de manquer d'un PCE implique que l'individu ne pourra pas se déplacer dans la ville de Montpellier en voiture, moto ou scooter le temps d'une journée où il avait l'habitude de se déplacer avec ces modes. Naturellement, les individus ne possédant pas d'automobile, de moto ou de scooter seront exclus de la phase de captation de la DmP, tout comme les individus ne se déplaçant pas à Montpellier avec ces modes malgré le fait qu'ils en possèdent au moins un.

L'enchère initiale pour obtenir le jeton manquant est indiquée à 1,60 €. Ce prix est équivalent au prix d'un titre unitaire de transport collectif sur le réseau urbain de Montpellier et sa métropole, ou sur le réseau de bus départemental. Cette enchère initiale est justifiée par le fait que l'individu connaît bien le prix exogène d'usage de ce mode de transport et peut donc comparer le surcoût de son déplacement en mode

"lourd" par rapport au prix du titre unitaire de transports collectifs. De même, nous supposons que les transports collectifs seront l'alternative la plus choisie si l'individu doit effectuer un transfert modal lors de la mise en place des PCE. L'individu n'allant pas bénéficier des tarifs préférentiels (par exemple, un abonnement) avant d'avoir essayé d'effectuer ses déplacements en transports collectifs, le prix d'un titre unitaire de transports collectifs nous semble être une enchère adéquate au contexte.

Après l'enchère initiale fixée à 1,60 €, il s'en suivra une enchère supérieure si l'individu est prêt à payer le montant de l'enchère initiale. Dans le cas contraire, une enchère inférieure sera proposée. Le processus sera réitéré jusqu'aux issues possibles du jeu. Les montants des enchères ont été choisis, pour la plupart, en fonction de l'existence d'une correspondance avec des tarifs déjà existants dans les offres de mobilité pour la ville de Montpellier au moment de la rédaction de l'enquête. Ainsi, l'individu est en mesure de comparer implicitement le prix du PCE avec des offres de mobilité déjà existantes.

Les montants d'enchère pouvant être rencontrés sont les suivants :

- 0 € : c'est la limite inférieure des enchères. Ce montant correspond à la volonté de ne pas payer pour acquérir un PCE supplémentaire. L'individu renonce alors à effectuer son déplacement en mode "lourd".
- Entre 0 € et 0,50 € (bornes exclues) : ce palier est atteint uniquement si l'individu déclare vouloir payer un montant non-nul et inférieur à 0,50 €. Dans ce cas, l'individu est invité à donner directement sa DmP.
- 0,50 € : ce montant correspond au prix de location d'un vélo en libre-service pendant une heure.
- 1 € : ce prix peut correspondre au prix d'un trajet en transports collectifs lorsque l'individu achète au préalable un ticket donnant droit à 10 trajets pour 10 €. Ce tarif est proposé sur le réseau urbain de Montpellier et sa

métropole ou sur le réseau de bus départemental. Ce référentiel de prix n'a pas été mentionné dans l'enquête, par omission.

- 1,60 € : c'est le point de départ de l'enchère. Ce prix correspond au prix du titre unitaire de transport collectif, sur le réseau urbain de Montpellier et sa métropole, ou sur le réseau de bus départemental.
- 3 € : ce montant d'enchère n'a pas de correspondance avec une offre de mobilité déjà existante. Ce pas d'enchère a été proposé en raison d'un trop grand écart entre le pas d'enchère qui le précède (1,60 €) et celui qui le suit (4,30 €).
- 4,30 € : c'est le prix d'un titre de transport permettant de se déplacer de façon illimitée, pendant une journée, sur le réseau urbain de la ville de Montpellier et sa métropole.
- Plus de 4,30 € : ce palier est atteint uniquement si l'individu déclare vouloir payer plus de 4,30 € pour acquérir le PCE supplémentaire. Dans ce cas, l'individu est invité à donner directement sa DmP.

Chaque individu déclare s'il est prêt à acheter le jeton manquant à un certain montant, en suivant une ascension ou une descente du montant de l'enchère, en commençant par une enchère à 1,60 €. La figure 6 révèle l'arbre de décision suivant la réponse des individus à chaque étape d'enchère. Si l'individu est prêt à payer le montant indiqué (réponse "*Oui*"), alors l'enchère suivante sera supérieure à ce montant. Dans le cas contraire (réponse "*Non*"), alors l'enchère suivante sera inférieure au montant indiqué. Dans les deux cas, ces opérations sont réitérées jusqu'aux issues possibles de l'arbre de décision.

Les cases grises correspondent aux issues possibles de l'enchère. Il en existe sept, dont deux pour lesquelles l'individu déclarera sa DmP lui-même (case "*À déclarer*"). La première case "*À déclarer*" située à droite et dans la partie haute de l'arbre

renvoie aux individus qui sont prêts à payer plus de 4,30 € pour obtenir un PCE<sup>5</sup>. La seconde case "À déclarer" située à droite et dans la partie basse de l'arbre renvoie aux individus étant prêts à payer leur PCE à un montant compris entre 0 € et 0,5 € (bornes exclues). Dans cette phase, tout individu possède alors une DmP : ceux qui ne sont pas prêts à payer pour acquérir le PCE auront une DmP nulle mais existante.

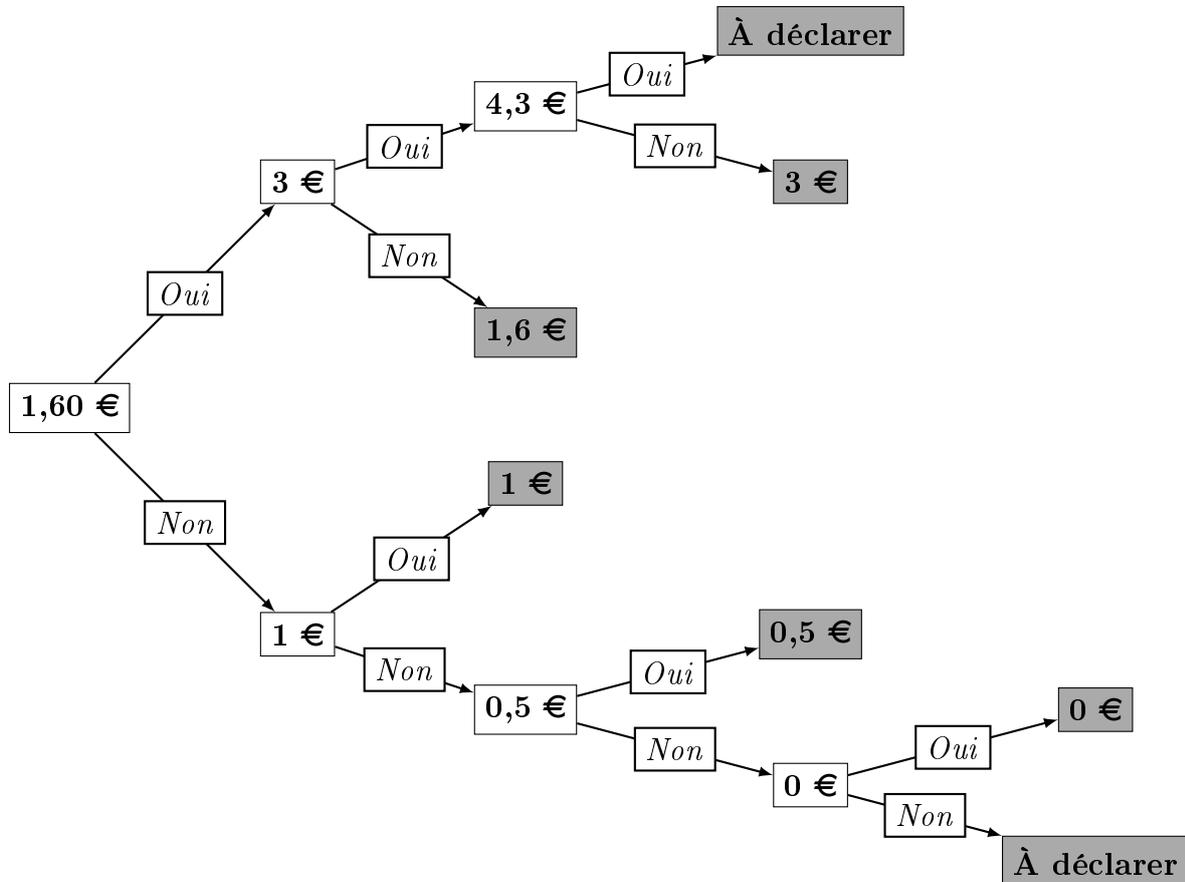


Figure 6 – Arbre de décision du système d'enchères ascendantes et descendantes pour la révélation des DmP

5. Nous avons choisi ce raccourci afin de limiter le temps global de réponse à ce questionnaire, pour avoir un taux de réponse convenable.

### 2.2.3 Mesure des dispositions marginales à recevoir (DmR) pour la vente d'un PCE

La phase de captation de la DmR est similaire à celle de la DmP. Cette fois, les individus ont un PCE en trop. Ils peuvent vendre ce PCE, le céder gratuitement ou le garder en espérant une montée du prix de marché pour le revendre plus tard, avant la fin de sa durée de validité. Si aucune action n'a été entreprise avant la fin de sa durée de validité, alors le PCE sera perdu. Les individus concernés par l'évaluation de la DmR sont les individus qui n'ont pas participé à l'évaluation de la DmP. Autrement dit, l'évaluation des DmR se focalise sur les individus n'ayant pas de voiture, moto ou scooter. Elle n'exclut pas cependant les individus disposant de ces modes, mais qui ne les utilisent pas dans la ville de Montpellier.

L'enchère initiale est aussi indiquée à 1,60 € et les pas d'enchères sont identiques à ceux proposés afin de capter la DmP des PCE. La figure 7 révèle l'arbre de décision suivant la réponse des individus à chaque étape d'enchère.

Si l'individu est prêt à céder son PCE au montant indiqué (réponse "*Oui*"), alors l'enchère suivante sera inférieure à ce montant. Dans le cas contraire (réponse "*Non*"), alors l'enchère suivante sera supérieure au montant indiqué. Ces opérations sont réitérées jusqu'aux issues possibles de l'arbre de décision. Dans cette phase, il se peut que des individus n'aient pas de DmR : il s'agit des individus n'étant pas prêts à céder leur jeton, quel que soit le prix de vente (case "*Néant*" située à droite et dans la partie haute de l'arbre).

Les cases grises sont les issues possibles de l'enchère. Il en existe huit, dont deux où l'individu déclarera sa DmR (case "*À déclarer*"). La première case "*À déclarer*" située à droite et dans la partie haute de l'arbre renvoie aux individus qui sont prêts à vendre leur PCE pour un montant minimal excédant 4,30 €. La seconde case "*À déclarer*" située à droite et dans la partie basse de l'arbre renvoie aux individus

étant prêts à vendre leur PCE pour un montant compris entre 0 € et 0,5 € (bornes exclues).

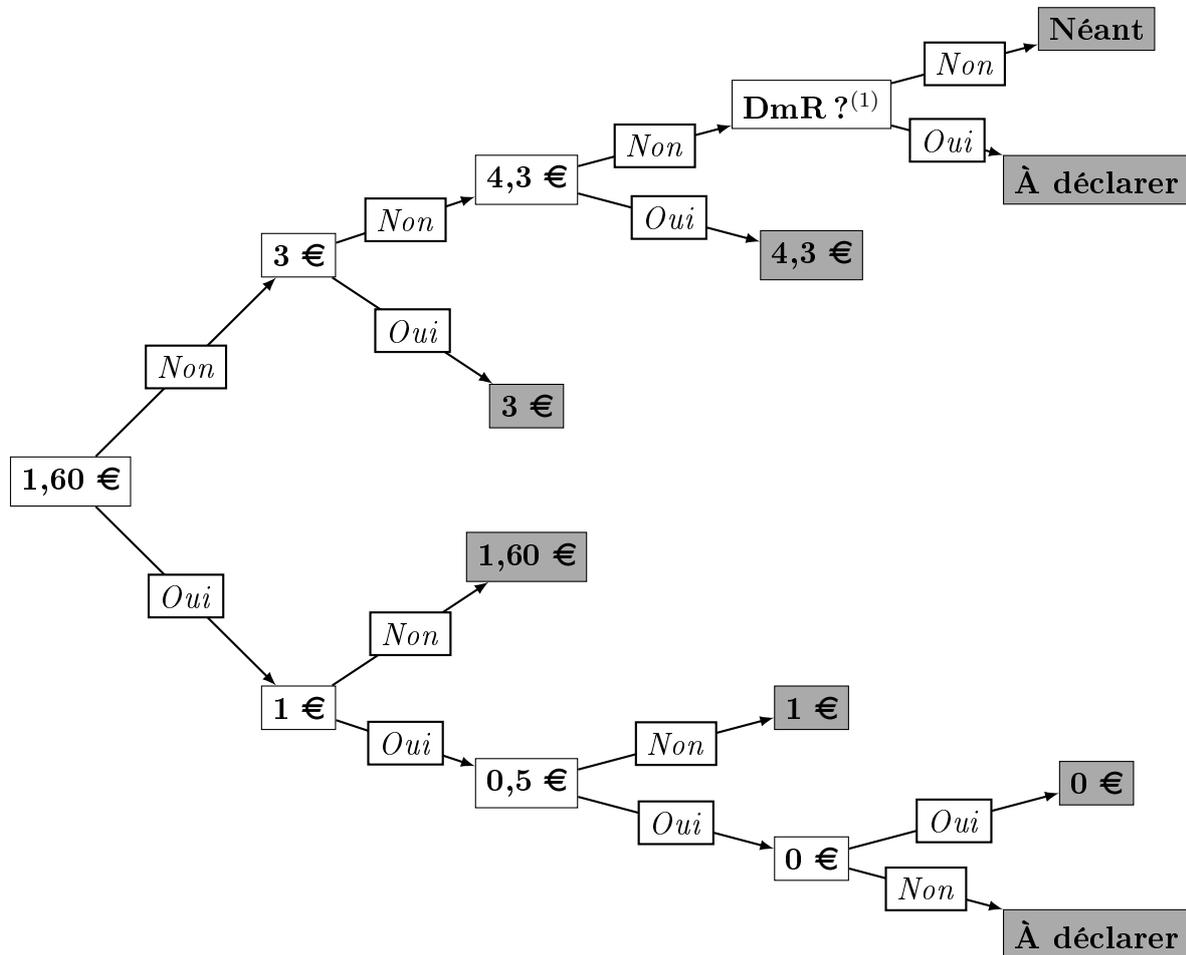


Figure 7 – Arbre de décision du système d'enchères ascendantes et descendantes pour la révélation des DmR

(1) : "DmR?" renvoie à une question où l'on demande à l'individu s'il est prêt à vendre son jeton pour un montant plus élevé que 4,30 €.

### 2.3 Affinement de la mesure des DmP et des DmR

Dans le contexte d'une révélation des dispositions marginales à payer ou à recevoir des PCE, il peut exister plusieurs comportements stratégiques impliquant que les individus ne déclarent pas leur réelle DmP ou DmR. Les raisons peuvent être multiples. D'un côté, l'individu peut volontairement sous-estimer sa DmP car celui-ci craint peut-être que le montant déclaré soit le montant pratiqué lors d'une possible implémentation de cet instrument dans la ville. De l'autre côté, l'individu n'utilisant pas ses PCE pour se déplacer peut être incité à surestimer sa DmR pour maximiser la recette qu'il obtiendra lors de la vente des PCE qu'il n'utilise pas. Enfin, toujours dans ce contexte, il peut exister un biais d'ancrage de l'enchère initiale pouvant influencer les résultats. Les dispositions technologiques de l'enquête n'ont malheureusement pas permis de faire varier l'enchère initiale selon l'individu, afin d'éviter ce biais. Tout en ayant conscience de ce phénomène, il a fallu arbitrer entre la naissance de ce biais dans un jeu d'enchères et le fait d'utiliser d'autres méthodes où l'individu aurait valorisé un bien qu'il ne connaît pas.

Nous proposons tout de même un affinement des dispositions marginales en proposant deux scénarios. Le premier scénario a pour objectif d'affiner la mesure des DmP. Ce scénario fait état d'une augmentation de deux euros du prix du PCE, en supposant que le prix du PCE était initialement égal à la DmP de l'individu déclarée à l'aide du jeu d'enchères de la figure 6. Le second scénario a pour objectif d'affiner les DmR. Ce scénario fait état d'une diminution de moitié du prix du PCE, en supposant que le prix du PCE était initialement égal à la DmR de l'individu déclarée à l'aide du jeu d'enchères de la figure 7.

Le premier scénario est le suivant : dans une semaine d'hiver, froide et pluvieuse, il manque un PCE à l'individu pour qu'il puisse conserver ses habitudes de déplacement. Compte-tenu de ces conditions météorologiques, beaucoup d'usagers veulent

acheter des PCE. Cela implique alors une hausse du prix du PCE de deux euros par rapport à la DmP individuelle du répondant. Il a été demandé à l'individu s'il était prêt à acheter le PCE à ce prix. Avec l'ensemble des réponses affirmatives, nous obtenons le nombre d'individus captifs à l'achat de PCE malgré une hausse du prix significative.

La réputation de la ville de Montpellier, pour son taux d'ensoleillement parmi les plus élevés de France, est le point central du second scénario. L'individu doit imaginer une semaine de printemps, où la météo annonce un temps ensoleillé. Ces conditions pré-estivales impliquent que les individus ont chacun une propension à se déplacer en mode "lourd" qui diminue. Ceci entraîne une baisse du prix du PCE équivalente à la moitié de la DmR de chacun des répondants. Nous avons demandé aux individus s'ils sont tout de même prêts à céder leur PCE à ce prix. Avec l'ensemble des réponses affirmatives, nous obtenons le nombre d'individus tout de même offreurs de PCE si le prix diminue dans les proportions fixées dans le scénario.

Révétons et analysons, à la section suivante, les résultats de ce jeu sérieux dans notre échantillon.

## 3 Révélation et analyse des DmP et des DmR de l'échantillon

### 3.1 Phase 1 : révélation de la DmP

Au regard du système d'enchères de la figure 6, chaque individu concerné a déclaré son consentement à payer pour acquérir un PCE. Ce PCE manque à l'individu afin qu'il puisse maintenir ses habitudes de déplacement en mode "lourd" (voiture, moto et scooter). Cette phase constitue la première approche de l'élaboration d'une courbe de demande de PCE.

Les répondants invités à évaluer leur DmP sont ceux détenant au moins un mode "lourd" puisque les individus qui ne détiennent pas ce mode n'ont pas besoin de PCE pour se déplacer. 316 individus sont concernés. 309 possèdent au moins une voiture. Parmi les 316 individus, 39 déclarent ne pas avoir besoin de PCE pour circuler dans la ville de Montpellier. Les raisons peuvent être multiples : pas d'entrée dans la ville de Montpellier en mode "lourd", aucun passage dans la ville de Montpellier quel que soit le mode de déplacement, etc. Ces 39 individus, à ce titre, sont exclus de la phase de captation de la DmP et seront intégrés dans la phase de révélation des DmR puisqu'ils n'ont pas besoin de PCE pour se déplacer.

Il reste alors 277 individus (54% des enquêtés) concernés par cette phase 1. Une fois toutes les DmP consignées dans l'annexe D, nous obtenons le nombre d'individus prêts à payer pour l'achat de PCE pour chacun des montants proposés dans l'enquête. Si le prix du PCE est inférieur ou égal à la DmP de l'individu, alors l'individu voudra acheter le PCE au prix de marché. Par ce principe, en effectuant un cumul des DmP, nous pouvons déterminer la demande cumulée partielle de PCE en fonction du prix du PCE.

Nous nous apercevons que 68 individus ne souhaitent pas payer pour acheter le PCE qui leur manque. Par cette déclaration, les individus renoncent à utiliser le mode "lourd" pour ce déplacement. 120 individus ont une  $DmP$  égale à l'enchère initiale : le biais d'ancrage est malheureusement existant et nous essaierons de l'atténuer en effectuant un affinement des  $DmP$  dans la phase suivante. Une fois cet affinement effectué, c'est-à-dire lorsque nous aurons déterminé les individus tout de même acheteurs d'un PCE lorsque le prix augmente, nous aurons notre demande totale de PCE par cumul des  $DmP$  affinées, en fonction du prix unitaire des PCE.

### **3.2 Phase 2 : affinement de la $DmP$ par variation du prix hypothétique des PCE**

Cet affinement révèle les individus qui restent captifs à l'usage des modes "lourds" malgré une hausse du prix de deux euros. Il convient alors de modifier les  $DmP$  des individus qui seront captifs à l'achat de PCE dans ce marché hypothétique et, par conséquent, affiner la demande globale de PCE.

105 individus sont captifs à l'achat de PCE malgré une hausse du prix de deux euros par rapport à leur  $DmP$ . Les autres individus effectueront alors un transfert modal du déplacement vers les transports alternatifs à ce prix du PCE, dans la mesure où les individus étaient sensibilisés à l'absence de solution de repli pour le déplacement considéré (i.e. pas d'annulation du déplacement, ni de report).

Raisonnons par catégorie de prix. Les individus ayant une  $DmP$  relativement plus élevée que les autres sont plus enclins à accepter une hausse de prix (100 % des individus ayant une  $DmP$  supérieure ou égale à 6 € sont prêts à payer deux euros de plus pour acquérir le PCE qui leur manque). Cela peut s'expliquer par le fait qu'une variation de deux euros sur une  $DmP$  déjà élevée a moins d'impact que sur une  $DmP$  plus faible. Néanmoins, cela concerne seulement 9 individus. Environ un tiers des

individus qui étaient prêts à payer le montant de l'enchère initiale (1,60 €) qui est sujet à un biais d'ancrage, sont finalement prêts à payer deux euros supplémentaires pour acquérir le PCE.

Nous constatons que 27 individus, qui n'étaient pas prêts à payer initialement pour acquérir le PCE qui leur manque, sont maintenant prêts à payer jusqu'à 2 € pour acquérir ce PCE, dans les conditions du scénario. Autrement dit, des individus refusant d'effectuer le déplacement en mode "lourd" dans la phase 1, souhaitent maintenant effectuer le déplacement en mode "lourd" pour un prix du PCE inférieur ou égal à deux euros. Ce changement de comportement va à l'encontre d'une certaine logique cognitive. Ce phénomène peut être lié à une mauvaise compréhension du système de PCE ou à une mauvaise formulation du questionnaire. Par mesure de précaution, nous décidons alors d'écarter ces individus de notre jeu sérieux. Notre étude de la demande de PCE s'appuie alors sur un échantillon de 250 individus, dont nous dressons le profil socioéconomique dans la dernière section de ce chapitre.

Nous obtenons alors, par modalité de prix, la demande cumulée et affinée de PCE en ajoutant le nombre d'individus supplémentaires de la phase 2 à la demande partielle obtenue en phase 1. Ces éléments figurent en annexe D. Nous analyserons cette demande lors de la confrontation de celle-ci avec l'offre de PCE que nous allons décrire dans la sous-section suivante.

### 3.3 Phase 3 : révélation de la $DmR$

Nous devons exclure les demandeurs de PCE de la phase de déclaration des  $DmR$ . Ceux-ci ne peuvent pas être simultanément demandeurs et vendeurs de PCE. Dans cette phase, nous considérons alors les individus qui ne possèdent pas un mode "lourd". Ces individus sont au nombre de 196. Nous considérerons aussi comme étant des offreurs de PCE les 39 individus ayant déclaré ne pas avoir besoin de PCE pour se déplacer dans la ville de Montpellier. Il y a donc 235 offreurs potentiels pour 250 demandeurs d'un PCE.

Il leur a été demandé d'imaginer posséder un PCE qu'ils n'utiliseront pas. 14 individus décident de ne pas prendre part au marché, donc ne pas vendre le PCE qu'ils ont en trop, quel que soit le prix de vente du PCE. Deux raisons peuvent être évoquées. La première peut être le signal d'un désintérêt vis-à-vis du système. La seconde peut être le symbole d'une forme de thésaurisation des PCE s'apparentant à une aversion à la dépossession, ou effet de dotation ("*Endowment effect*" de Kahneman & Tversky (1979) [55]). Alors, dans notre contexte, quel que soit le prix du PCE, l'individu ne cédera pas son PCE par l'attache psychologique qui le lie à sa possession et à la surestimation de sa valeur. Le nombre d'offeurs dans le marché des PCE est alors de 221. Même dans l'hypothèse où les 221 offreurs céderaient leur PCE, la demande s'élevant à 250 PCE ne pourra pas être intégralement satisfaite.

Un autre fait marquant est le nombre de personnes étant prêtes à céder le PCE à titre gratuit : 61 répondants. Cette déclaration intervient après que le jeu d'enchères ait proposé à l'individu 3 enchères non-nulles (1,60 €, 1 € et 0,50 €). Ce phénomène va à l'encontre de la rationalité classique en sciences économiques selon laquelle l'individu chercherait sans doute à valoriser le PCE qu'il a en trop. Nous assistons peut-être à des phénomènes d'altruisme dans le présent, où l'individu cè-

dera volontiers son PCE pour le besoin de quelqu'un d'autre au même instant, par conviction. Nous pouvons néanmoins faire fausse route.

La méthode pour définir la courbe d'offre de PCE est similaire à celle de la courbe de demande. Si le prix du PCE est supérieur ou égal à la  $DmR$  de l'individu, alors l'individu voudra céder le PCE qu'il a en trop au prix de marché. Il est consigné dans l'annexe E le nombre d'individus prêts à vendre le PCE qu'ils ont en trop. Bien que le biais d'ancrage soit moins prononcé qu'en phase 1 (49 individus ont une  $DmR$  égale à l'enchère initiale de 1,60 €), il n'en demeure pas moins que l'individu pourrait surestimer sa  $DmR$ . Il convient d'essayer d'affiner la courbe d'offre, tout comme nous l'avons fait en phase 2 pour la courbe de demande de PCE.

### **3.4 Phase 4 : affinement de la $DmR$ par variation du prix hypothétique des PCE**

Cette phase permet de mettre en lumière les individus toujours prêts à vendre leur PCE en trop malgré une baisse du prix des PCE. Cette baisse de prix est équivalente à la moitié de la  $DmR$  individuelle. Les individus ayant une  $DmR$  nulle sont naturellement exclus de cette phase.

42 individus sont toujours prêts à vendre le PCE qu'ils ont en trop, même si le prix du PCE ne s'élève qu'à la moitié de leur  $DmR$ . Il est évident que cette variation de prix (en valeur) diffère selon les individus puisque ce nouveau prix est fonction de la  $DmR$  de chacun. Il convient alors d'affiner le profil de ces 42 individus : tous ont une  $DmR$  initiale comprise entre 0,5 € et 3 €. La variation du prix du PCE est alors comprise entre 0,25 € et 1,50 €. Il n'y a qu'un seul individu dont la variation de prix est supérieure à 0,8 €. Nous pouvons essayer d'expliquer ce phénomène par deux arguments. D'une part, la baisse du prix du PCE dans la phase 4 est d'autant plus grande que les  $DmR$  sont initialement élevées. Ceci implique une désincitation

à céder son PCE au fur et à mesure de l'élévation de la variation (en valeur) du prix. D'autre part, une  $DmR$  initiale élevée peut témoigner d'une certaine volonté à ne pas vouloir "brader" son PCE. Ces individus seront alors défavorables à céder un PCE si le prix baisse.

L'affinement des  $DmR$ , tout comme celle des  $DmP$ , aurait pu évidemment être abordée de manière différente, peut-être avec davantage de pas d'enchères. Néanmoins, la précision de l'affinement de ces courbes aurait augmenté le temps de réponse des individus à l'enquête. De fait, le taux de réponse à l'enquête en aurait pâti.

Tout comme en phase 2, nous ventilons les individus tout de même vendeurs suite à une baisse du prix, dans les classes de prix comprises entre la moitié de leur  $DmR$  (classe incluse) et leur  $DmR$  (classe exclue, pour ne pas comptabiliser deux fois un même individu). Nous obtenons ainsi l'offre cumulée et affinée de PCE en fonction du prix du PCE dans l'annexe E.

Les 4 phases nous ont permis d'obtenir la demande cumulée et l'offre cumulée de PCE. Croisons ces résultats afin de déterminer les effets d'un marché fictif des PCE sur la mobilité urbaine.

## 4 Transfert modal, report et annulation de déplacement : une première évaluation de l'impact des PCE

### 4.1 Courbe d'offre et de demande des PCE

Les résultats de la section précédente nous permettent de dresser le tableau situé en annexe F. Après avoir défini et affiné l'offre et la demande de PCE (colonnes rouges du tableau de l'annexe F), nous pouvons calculer le nombre de PCE vendus en fonction du prix (colonne grise du tableau de l'annexe F). Le nombre de PCE vendus est égal à l'offre de PCE si la demande de PCE est supérieure ou égale à l'offre de PCE. Le nombre de PCE vendus est égal à la demande de PCE si l'offre de PCE est supérieure ou égale à la demande de PCE.

471 individus sont dans le marché : 221 offreurs d'un PCE (47% des individus dans le marché) et 250 demandeurs d'un PCE (53%). Ces proportions ressemblent aux parts modales qui figurent dans le SCOT de la métropole de Montpellier (54% des déplacements s'effectuent en mode "lourd" - cf. Section 1.1). La figure 8 donne une représentation des courbes d'offre et de demande de PCE dans le marché hypothétique, ainsi que le nombre de PCE vendus en fonction du prix unitaire du PCE.

Le sens de variation des courbes d'offre et de demande de PCE est en adéquation avec la logique économique. Il est important de signaler qu'un prix nul du PCE n'est pas similaire à une situation de laisser-faire : le marché serait déséquilibré par un nombre d'offreurs de PCE insuffisant.

Ces courbes nous permettent de visualiser l'équilibre du marché hypothétique de PCE à la jonction des courbes d'offre et de demande de PCE. Nous aurions

pu représenter ces courbes par paliers puisque le prix des PCE est une variable discrète par construction. Or, nous pouvons supposer qu'en raison de la dynamique du marché, en partie liée à l'atomicité des agents économiques et les progrès des nouvelles technologies, le prix des PCE pourra être continu. Cherchons à déterminer l'équilibre analytiquement, pour ensuite mener une réflexion sur l'impact du marché hypothétique des PCE sur le trafic.

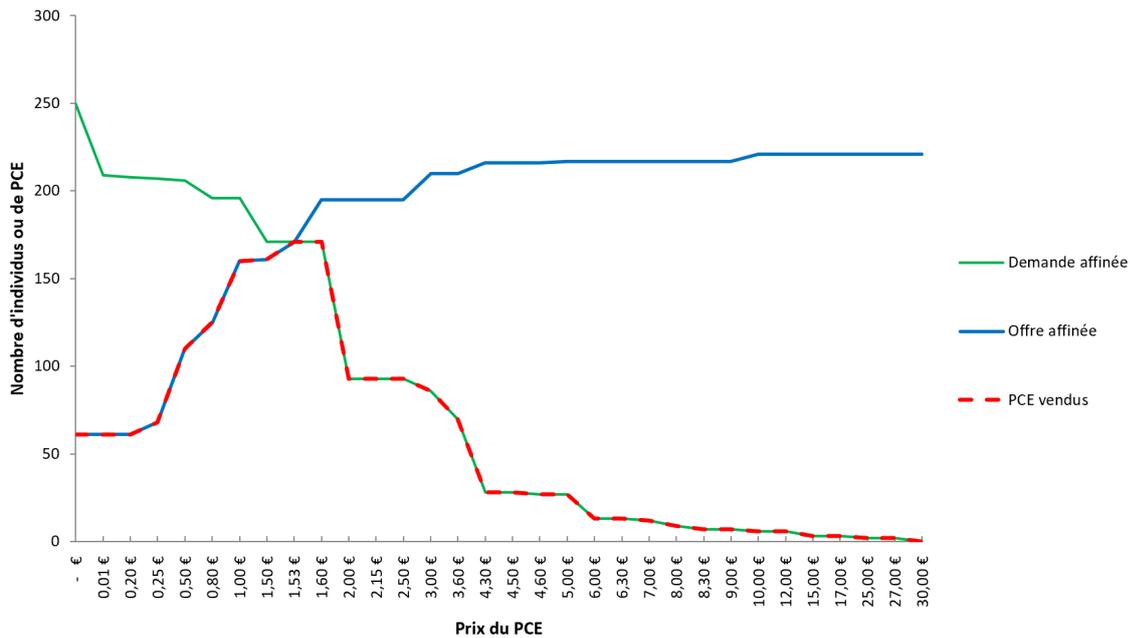


Figure 8 – Courbes d'offre et de demande de PCE sur le marché hypothétique

L'équilibre du marché hypothétique des PCE est modélisé par le triplet (prix du PCE ; offre de PCE ; demande de PCE), où l'offre de PCE égale la demande de PCE. Nous ne connaissons pas l'équation des courbes d'offre et de demande pour donner de manière précise l'équilibre de ce marché hypothétique. Nous pouvons essayer d'approximer cet équilibre par interpolation linéaire, en identifiant le prix du PCE au voisinage de cet équilibre. Le fait de travailler au voisinage de l'équilibre, donc dans un intervalle suffisamment restreint, nous permet de faire l'hypothèse d'une variation linéaire de l'offre et de la demande de PCE. Le tableau 1 référence le prix de PCE, l'offre de PCE et la demande de PCE au voisinage de cet équilibre.

Prix du PCE ( $p^{PCE}$ )	Offre de PCE ( $O^{PCE}$ )	Demande de PCE ( $D^{PCE}$ )
1,50 €	161	171
1,60 €	195	171

Tableau 1 – Prix, offre et demande de PCE au voisinage de l'équilibre du marché hypothétique

Au voisinage de l'équilibre, 195 détenteurs d'un PCE dont ils n'ont pas besoin (soit 88% de l'ensemble des offreurs d'un PCE) sont prêts à le céder pour un montant de 1,60 €. À ce prix de marché, 171 demandeurs d'un PCE sont prêts à l'acheter (soit 68% des demandeurs d'un PCE). Ces mêmes individus sont prêts à acheter le PCE pour un montant de 1,50 €, alors que 161 offreurs de PCE sont prêts à céder leur PCE à ce prix.

La demande de PCE est constante au voisinage de l'équilibre. Nous allons effectuer une interpolation linéaire du prix du PCE et de l'offre de PCE variant à ce voisinage, soit :

$$O^{PCE} = \frac{161 - 195}{1,50 - 1,60} p^{PCE} + \frac{1,50 \cdot 195 - 1,60 \cdot 161}{1,50 - 1,60} = 340 p^{PCE} - 349$$

Pour  $O^{PCE} = D^{PCE} = 171$ , il vient  $p^{PCE} = 1,53$  €. L'équilibre de notre marché hypothétique est alors :  $(p^{PCE}; O^{PCE}; D^{PCE}) = (1,53; 171; 171)$ . Si 171 PCE sont vendus sur le marché pour 250 individus ayant chacun besoin d'un PCE supplémentaire pour assurer leurs déplacements hebdomadaires en mode "lourd", alors 79 individus (32% des demandeurs d'un PCE) à qui il manquait ce PCE seront contraints à effectuer un déplacement sans utiliser le mode "lourd".

Le prix d'équilibre gravite autour du prix de départ de l'enchère. Nous l'avons signalé, le choix d'une méthode de mesure des dispositions à payer ou à recevoir un bien ou une ressource est soumis à un arbitrage : obtenir un biais d'ancrage sur nos résultats ou obtenir des résultats éloignés de la réalité si l'individu valorise

un bien qu'il ne connaît pas puisqu'étant encore inexistant dans la pratique. Avant cette ludification des PCE, il a été demandé aux individus s'ils avaient déjà entendu parler de cet instrument économique : plus de 95% des répondants ne connaissaient pas cet instrument avant l'enquête, témoignant bien du fait que cet instrument est, pour l'instant, au stade embryonnaire de sa potentielle application dans les villes.

Dans une projection future des résultats sur l'ensemble de la population de l'aire urbaine de Montpellier, et en supposant une diminution de la part modale des modes "lourds" significative, ce prix d'équilibre est tout de même faible relativement au prix d'une entrée dans la ville lorsqu'il y a un péage urbain<sup>6</sup>. Cela signifie que l'objectif d'une mobilité urbaine plus soutenable ne rime pas avec une désincitation financière importante dans le cadre de notre travail. Si la contrainte est plus forte, c'est-à-dire si l'individu doit acheter encore plus de PCE pour pouvoir se déplacer en mode "lourd", cet effet aura alors une répercussion sur le prix d'équilibre du marché. Une allocation rationnelle de PCE, ainsi qu'un mécanisme de régulation du prix<sup>7</sup> permettront au système de PCE d'être plus compétitif que le péage urbain.

## 4.2 **Caractérisation du nombre de voyages évités en mode "lourd"**

L'équilibre du marché hypothétique des PCE nous a permis de distinguer le nombre d'individus utilisant un mode "lourd" exclus du marché par une disposition à payer qui n'excédait pas le prix du PCE. Nous avons obtenu le résultat suivant : dans l'échantillon, 79 déplacements journaliers seront évités dans la semaine concernée par les conditions de marché précédemment décrites. Donnons un sens à cette valeur en regardant la proportion de voyages évités sur l'ensemble des déplacements

---

6. [www.ademe.fr/sites/default/files/assets/documents/etat-art-sur-peages-urbains-2014.pdf](http://www.ademe.fr/sites/default/files/assets/documents/etat-art-sur-peages-urbains-2014.pdf)

7. cf. Chapitre 1, section 2.2.

hebdomadaires de l'échantillon dans la ville de Montpellier. Une projection de ce résultat à l'échelle de la population est proposée dans la cinquième section de ce chapitre. Avec toutes les précautions d'usage, celle-ci nous apportera un éclairage sur l'effet hypothétique des PCE sur le trafic routier de la ville de Montpellier, lors d'une contrainte imposée sur le nombre de PCE alloués par individu.

Pour obtenir cette proportion dans l'échantillon, nous devons détenir le nombre de déplacements hebdomadaires en mode "lourd", dans la ville de Montpellier, dans la période qui précède la mise en place hypothétique des PCE et dans celle qui suivrait. Notre analyse n'est pas suffisamment fine pour distinguer les parts modales de chaque mode dans la période précédant la mise en place des PCE. Néanmoins, nous avons demandé indirectement, pour une semaine habituelle, le nombre de PCE que l'individu aurait besoin d'utiliser pour se déplacer. Cette révélation nous permet d'avoir une estimation du nombre total de voyages<sup>8</sup>, passant au moins une fois dans la ville de Montpellier, avant la mise en place des PCE, du lundi au samedi. Le dimanche est exclu puisqu'il n'y a pas besoin de PCE pour se déplacer.

Soit  $n_i^{PCE}$ , le nombre de PCE dont l'individu  $i$  a besoin pour se déplacer en mode "lourd" pendant une semaine habituelle, hors dimanche. Rappelons les hypothèses suivantes. Un voyage pendant les jours ouvrés nécessite deux PCE. Un voyage le samedi nécessite un PCE. Un voyage le dimanche ne nécessite pas de PCE. Ainsi, un individu se déplaçant dans la ville de Montpellier en mode "lourd" aura besoin, au maximum, de 11 PCE par semaine. En même temps, si  $n_i^{PCE}$  est pair, alors l'individu a déclaré ne pas se déplacer dans la ville de Montpellier le samedi. En effet, l'individu aura un besoin nul ou de deux PCE par jour de déplacement en jour ouvré.

---

8. Un voyage est considéré comme étant un jour de déplacement, puisque le type de PCE que nous avons choisi pour notre étude est un PCE journalier.

Il vient, en posant  $v_i^0$  le nombre de voyages pour une semaine habituelle, hors dimanche, de l'individu  $i$  dans la ville de Montpellier, en fonction de la parité de  $n_i^{PCE}$  :

$$\begin{cases} v_i^0 = \frac{n_i^{PCE}}{2} & \text{si } n_i^{PCE} = 2k \ \forall k \in \{1, 2, 3, 4, 5\} \\ v_i^0 = \frac{n_i^{PCE}-1}{2} + 1 & \text{si } n_i^{PCE} = 2k + 1 \ \forall k \in \{1, 2, 3, 4, 5\} \end{cases}$$

L'ensemble des voyages hebdomadaires  $V^0$  avant la potentielle mise en place des PCE, du lundi au samedi, pour les 250 demandeurs de PCE est alors :

$$V^0 = \sum_{i=1}^{250} v_i^0$$

En fonction de  $n_i^{PCE}$ , dans la base de données, nous pouvons obtenir le nombre d'individus caractérisés par le même besoin de PCE pour assurer leurs déplacements du lundi au samedi, avant la mise en place des PCE. Ensuite, pour chacune des modalités de  $n_i^{PCE}$ , nous pouvons multiplier ce nombre par le nombre de voyages  $v_i^0$  pour obtenir le nombre de voyages hebdomadaires, hors dimanche, pour l'ensemble des individus caractérisés par le même besoin de PCE. La variable  $n_i^{PCE}$  ayant 11 modalités, la somme des 11 produits donne alors  $V^0$ , c'est-à-dire l'ensemble des voyages hebdomadaires, hors dimanche, que les individus effectuent avant la potentielle mise en place des PCE. Le tableau 2 rassemble les éléments nous permettant de trouver le nombre de voyages hebdomadaires effectués par notre échantillon qui passe par la ville de Montpellier du lundi au samedi.

876 voyages hebdomadaires passant dans la ville de Montpellier sont effectués par les 250 individus pendant une semaine habituelle, du lundi au samedi, avant la mise en place des PCE. Chaque individu effectue alors en moyenne entre 3 et 4 circulations journalières par semaine en mode "lourd", du lundi au samedi, dans

la ville de Montpellier<sup>9</sup>. Ce nombre de voyages doit être comparé au nombre de voyages de ces mêmes 250 individus après la mise en place des PCE.

$n_i^{PCE}$	$v_i^0$	Nombre d'individus	Nombre de voyages
1	1	23	23
2	1	24	24
3	2	26	52
4	2	18	36
5	3	17	51
6	3	22	66
7	4	14	56
8	4	14	56
9	5	9	45
10	5	31	155
11	6	52	312
Total	x	250	$V^0 = 876$

Tableau 2 – Nombre de voyages en fonction du besoin de PCE (N=250)

Pour déterminer le nombre de voyages que chaque individu effectuera après la mise en place des PCE, une condition est nécessaire. Tout individu  $i$  dont la disposition à payer un PCE supplémentaire ( $DmP_i$ ) est supérieure ou égale au prix du PCE à l'équilibre ( $p^{PCE*}$ ) fera autant de voyages en mode "lourd" qu'avant la mise en place des PCE. Dans le cas contraire, d'après notre cadre hypothétique de travail, l'individu fera un voyage de moins après la mise en place des PCE. Une restriction

---

9. Bien que la révélation du nombre de déplacements dans l'échantillon en mode "lourd" repose sur des valeurs déclaratives d'un besoin de PCE, et que notre échantillon n'est pas suffisamment représentatif, la répartition des besoins en fonction du nombre de PCE ne semble pas être aberrante. Il serait alors intéressant, dans une future recherche, d'appliquer cette méthode sur un échantillon plus large.

plus forte aurait sans doute réduit davantage le nombre de déplacements en mode "lourd" et, partant, le prix d'équilibre du marché des PCE.

Posons  $v_i^*$  le nombre de voyages hebdomadaires de l'individu  $i$  après la mise en place des PCE :

$$\begin{cases} v_i^* = v_i^0 & \text{si } DmP_i \geq p^{PCE^*} \\ v_i^* = v_i^0 - 1 & \text{si } DmP_i < p^{PCE^*} \end{cases}$$

L'ensemble des voyages du lundi au samedi après la potentielle mise en place des PCE,  $V^*$  pour les 250 individus est alors :

$$V^* = \sum_{i=1}^{250} v_i^*$$

Nous pouvons enfin calculer le pourcentage des voyages subissant une annulation de l'usage du mode "lourd"  $\frac{\Delta V}{V}$  :

$$\frac{\Delta V}{V} = 1 - \frac{V^*}{V^0}$$

Nous projetons alors cette démarche sur l'ensemble des prix de PCE possibles (colonnes bleues de l'annexe F). Le graphique 9 reporte l'évolution du nombre de voyages évités en fonction du prix du PCE.

Dans cette sous-section, l'objectif n'est pas de chercher le prix du PCE pour lequel le nombre de déplacements évités en mode "lourd" est maximal. La solution résiderait en un prix du PCE très élevé. Cela s'apparenterait peu ou prou à une interdiction totale de circuler. À l'équilibre, parmi les 250 individus se déplaçant dans la ville de Montpellier au moins une fois par semaine en mode "lourd", 79 devront effectuer un de leurs voyages autrement qu'en mode "lourd". Par conséquent, 797 voyages seront effectués par les 250 individus :  $V^* = 797$ . Avec cette dernière valeur

et les calculs précédents, 9,02% des voyages en mode "lourd" passant au moins une fois par la ville de Montpellier seront évités avec le marché des PCE.

Ce chiffre est à prendre avec précaution, notamment car notre échantillon n'est pas représentatif. De plus, le nombre de voyages s'appuie sur des valeurs déclaratives. Néanmoins, les proportions que nous venons de déterminer pourraient être sous-évaluées. En effet, cette évaluation ne prend pas en compte le caractère incitatif du PCE. Certains individus se déplaçant en mode "lourd" pourraient être moins incités à utiliser ces modes et vendre eux-aussi des PCE. Cela ouvrirait alors des perspectives prometteuses à l'instrument.

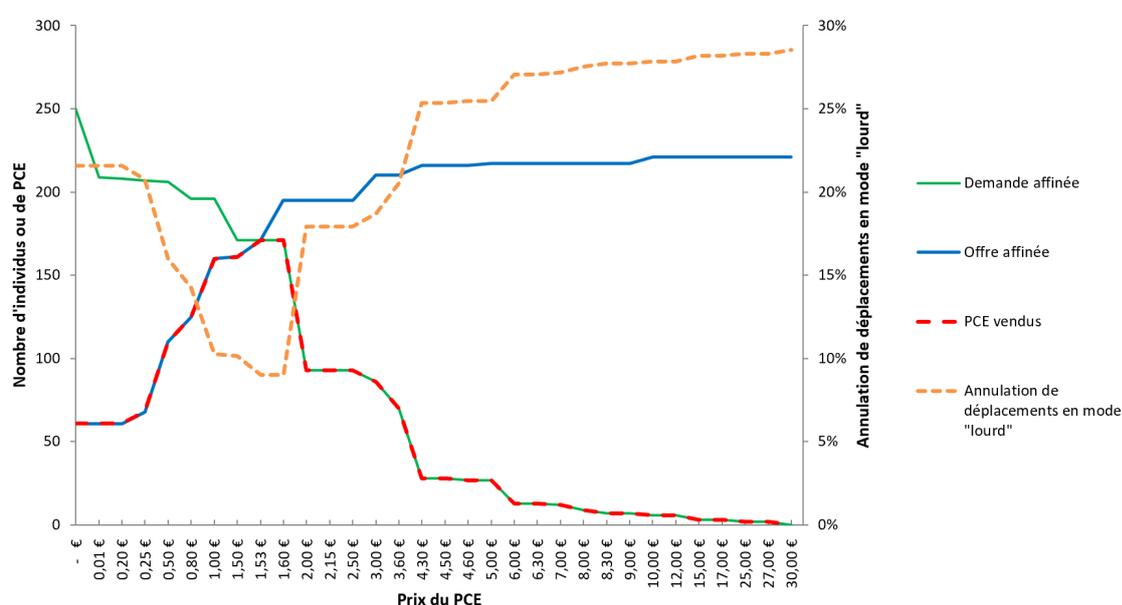


Figure 9 – Courbes d'offre et de demande de PCE sur le marché hypothétique - Effet sur le nombre de voyages évités

Nous proposons à la section suivante une projection de nos résultats à l'échelle de la population au travers d'un rééquilibrage de notre base de données. Avant cela, analysons quelques résultats descriptifs supplémentaires. Ceux-ci sont issus de questions au sujet de la projection hypothétique du comportement de l'individu lors de la mise en place des PCE en termes de choix de destination et modaux.

### 4.3 Effets hypothétiques des PCE sur le choix modal

Les répondants étaient invités à s'exprimer sur l'éventuelle modification de leurs choix modaux suite à l'implémentation du système de PCE. En effet, dans les sections précédentes, nous avons caractérisé le transfert modal comme étant le report de l'utilisation d'un mode "lourd" vers d'autres modes alternatifs. En revanche, nous ne savons pas quel serait le mode (ou le nouvel usage du mode "lourd" avec le covoiturage par exemple) qui bénéficierait de ce report.

Cinq questions ont été posées, en demandant aux individus de supposer que le système de PCE existait à Montpellier. La première question porte sur l'effet des PCE sur l'usage du covoiturage urbain afin de partager la dépense de PCE. La deuxième et la troisième question cherchent à évaluer l'impact des PCE sur l'usage du mode "lourd" en semaine et pendant le week-end. L'usage des transports collectifs et l'usage des autres modes alternatifs (e.g. marche, vélo et trottinette) lors de la mise en place des PCE font respectivement l'objet de la quatrième et de la cinquième question.

Les modalités de réponse se présentent sur une échelle impaire de 0 à 10, afin que l'individu puisse exprimer sa neutralité au niveau 5 si les PCE n'ont aucun impact sur son choix de déplacement avec le mode considéré. Une deuxième échelle signale que la valeur nulle correspond à un déplacement beaucoup plus rare avec le mode considéré. À l'inverse, la valeur maximale de l'échelle correspond à un déplacement beaucoup plus fréquent avec le mode considéré.

Les individus qui ont pu répondre à cette question sont ceux qui possèdent au moins un mode "lourd". Nous avons fait le choix d'écarter les 27 individus exclus du jeu sérieux en raison de l'illogisme de leur DmP aux deux étapes de mesure. La figure 10 donne un aperçu de l'impact des PCE sur l'usage des modes de déplacement.

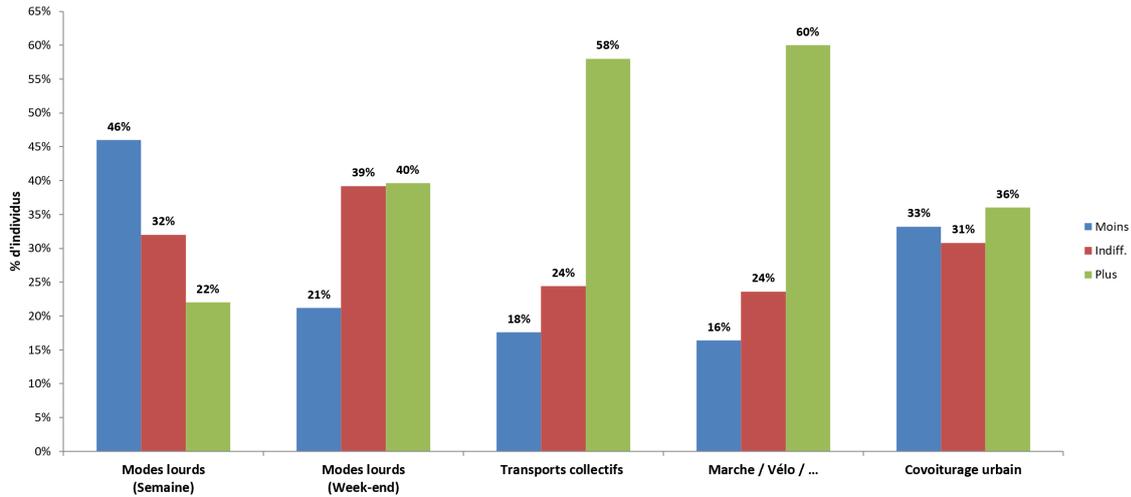


Figure 10 – Impact des PCE sur l'usage des modes de déplacement (N=289)

On constate que le système de PCE a une incitation au transfert modal plus forte que celle du report dans le temps d'un déplacement, ou encore de celle de l'utilisation d'un mode "lourd" sous une autre forme. Les chiffres illustrent ceci : 58% des individus déclarent qu'ils se déplaceront davantage à l'aide des transports collectifs et 60% à l'aide d'autres modes alternatifs de déplacement. 40% reporteront leur déplacement le week-end. 36% utiliseront le mode "lourd" sous une autre forme, par exemple en covoiturant.

Le fait d'implémenter le système de PCE ne décale donc pas uniquement les déplacements pour diminuer la congestion : il supprime des véhicules-kilomètres parcourus en mode "lourd". L'inflexibilité-horaire de certains motifs de déplacement, notamment pour aller travailler, obligera l'individu à utiliser les transports alternatifs. Une future recherche pourrait se consacrer à l'analyse précise de ces résultats en fonction des motifs de déplacement, ce que nous n'avons pas capté dans cette enquête.

Intéressons-nous aux individus ne modifiant pas leur usage des modes de déplacement. Leur proportion conséquente pourrait être sous-estimée par rapport à la réalité des faits si un système de PCE venait à voir le jour. La principale raison de cette hypothèse repose sur le fait que nos résultats reposent sur des faits hypothé-

tiques. Malgré certaines intuitions économiques logiques, deux paradoxes peuvent être soulevés.

Le premier paradoxe naît des individus déclarant davantage vouloir se déplacer en mode "lourd" avec la mise en place du système de PCE (22% en semaine, 40% le week-end) et des individus délaissant les modes "doux" après l'exécution des PCE (18% pour les transports collectifs, 16% pour les autres modes alternatifs de déplacement). À la lumière de Downs (1962) [34] sur l'effet de long-terme d'opportunité d'usage des modes "lourds" suite à la construction d'infrastructures routières, tout laisse à croire que certains individus, par opportunisme, vont se recentrer sur les modes "lourds" par l'amélioration potentielle des conditions de circulation.

Le second paradoxe est l'effet contrasté sur le covoiturage urbain. D'un côté, l'intuition consiste à énoncer qu'il y aura davantage de covoiturage urbain sur les routes après la mise en place des PCE, dans des proportions restant à quantifier. 36% des individus de notre échantillon déclarent qu'ils pratiqueront davantage le covoiturage urbain après la mise en place des PCE. Cet effet, moins prononcé que celui du transfert modal, nous montre que l'Homme urbain et périurbain semble rester individualiste dans son déplacement tant pour des raisons affectives que symboliques (Brisbois (2010) [11]). Toutefois, et c'est un effet paradoxal, 33% des individus ont déclaré qu'ils covoitueraient moins par rapport à la situation de laisser-faire. Dans la mesure où les individus covoiturent déjà très peu pour des trajets urbains, il apparaît très surprenant qu'il y ait autant d'individus qui déclarent vouloir moins covoiturer si le système de PCE voyait le jour. La seule explication que nous réussissons à apporter est l'existence d'un comportement ponctuellement égoïste de l'individu ne voulant pas faire bénéficier aux autres de l'usage de ses PCE.

#### 4.4 Effets hypothétiques des PCE sur le choix d'heure de départ et de destination

L'effet des PCE sur le choix d'heure de départ ne peut qu'être indirect et lié au choix modal. En effet, le prélèvement de PCE dans notre enquête est indépendant de l'heure de passage dans la ville. Basculer vers les transports collectifs peut impacter le choix d'heure de départ selon le motif de déplacement, particulièrement les trajets domicile-travail. Nos données ne permettent pas de mettre en exergue ce phénomène.

L'effet des PCE sur le choix de destination dans le cadre de déplacements non-contraints concerne 95 individus. Ce sont les individus qui ne vivent pas dans la ville de Montpellier et qui possèdent au moins un mode "lourd". Une question leur a été posée en ce sens, sur une échelle de 0 à 10 : "*Hormis dans un cadre professionnel ou scolaire, si un tel système existait, je viendrais à Montpellier ...*". La figure 11 reporte les résultats de cette question.

Les proportions d'individus qui viendront moins, autant ou davantage dans la ville de Montpellier sont respectivement de 41%, 31% et 28%. Nous attirons l'attention sur le fait que venir autant qu'avant, soit la valeur centrale de l'échelle (5), n'est pas une réponse hasardeuse. Il n'y avait pas de réponse préremplie dans le questionnaire en ligne.

Les PCE désinciteraient 41% des habitants périurbains possédant un mode "lourd" à venir dans la ville, pour des déplacements non-contraints. Plus de deux tiers de ces individus désincités ont déclaré qu'ils viendraient beaucoup moins qu'avant (valeurs 0 et 1 de l'échelle). Au-delà de ce résultat, cet effet pose la question des effets de l'instrument sur les activités économiques de la ville de Montpellier, en particulier dans le secteur tertiaire. Nous assistons actuellement à une perte d'attractivité du centre-ville au profit des zones périurbaines. Une réflexion doit être

menée à propos de la mise en œuvre de mesures incitatives alliant la promotion des commerces de la ville et la consommation de PCE.

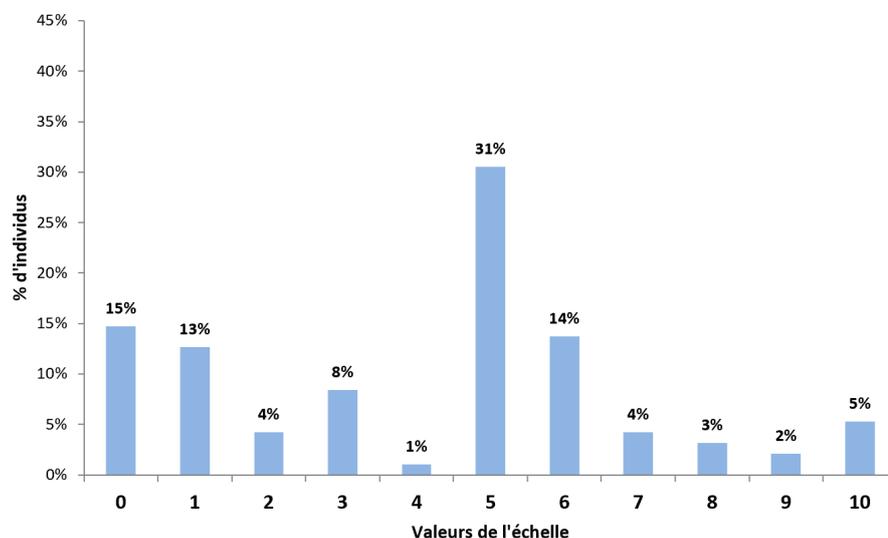


Figure 11 – Effets hypothétiques des PCE sur la venue des individus habitant hors de la ville de Montpellier (*hors trajets professionnels ou scolaires*)

Les PCE produisent plusieurs effets bénéfiques en faveur d'une mobilité urbaine plus soutenable. C'est l'information qui émerge de l'ensemble de nos résultats. Ceci s'illustre par un transfert modal en faveur des transports alternatifs. Leur conséquence est ainsi une réduction du nombre de voyages effectués en mode "lourd" dans le trafic routier de la ville de Montpellier. Proposons une projection de l'ensemble des résultats de cette section à l'échelle de la population de l'aire urbaine de Montpellier.

## 5 Projection des résultats sur l'aire urbaine de Montpellier

Il apparaît malheureusement évident que les résultats obtenus précédemment ne sont pas directement transposables à l'échelle de la population que l'échantillon est censé représenter. La faible représentativité de notre échantillon y est pour beaucoup. Nous allons essayer de redresser l'échantillon afin de l'apparenter autant que faire se peut aux caractéristiques de la population. Ce travail ne cherchera pas à caractériser de manière précise les effets des PCE sur l'ensemble de la population et des déplacements, mais cherchera plutôt à proposer modestement des observations générales à destination des pouvoirs publics locaux, compte-tenu des données à notre disposition.

### 5.1 Périmètre de redressement de l'échantillon

#### 5.1.1 Variables de redressement

Afin de déterminer les variables de redressement de notre échantillon, il convient de déterminer les éléments socio-démographiques individuels pouvant caractériser les choix de déplacement, compte-tenu des variables à notre disposition. À l'échelle urbaine, les déplacements sont quotidiens, souvent habituels et/ou pendulaires. On a souvent distingué les cols "bleus" des cols "blancs" afin de distinguer les individus pour qui la contrainte temporelle était plus importante que la contrainte budgétaire de déplacement. L'activité de l'individu détermine alors une partie du besoin individuel de déplacement. C'est en ce sens que nous proposons un redressement selon la catégorie socioprofessionnelle (CSP) des individus. La deuxième variable de redressement de notre échantillon, l'âge de l'individu, est justifiée par l'existence d'un frein générationnel et physique à l'usage de tel ou tel mode.

Par ailleurs, nous ne détenons pas de manière précise le revenu de chaque individu, dans la mesure où nous craignons un faible taux de réponse à l'enquête. Nous proposons que le croisement entre la CSP et l'âge soit une approximation de l'effet du revenu disponible sur les choix de déplacement. Enfin, nous ne pouvons pas nier les inégalités hommes-femmes face à la mobilité, notamment à cause des modes d'organisation des ménages, ni même les inégalités de revenu : le sexe sera alors la troisième variable qui pondèrera la base de données. Nous verrons dans la dernière section de ce chapitre que l'ensemble des variables évoquées permettent de discriminer les individus qui pourront acquérir des PCE d'autres individus. Ces derniers ne prennent pas part au marché volontairement ou à cause d'une DmP des PCE inférieure au prix de marché.

### 5.1.2 Délimitation géographique de la population

Il faut déterminer la zone géographique où la population est considérée comme étant attirée par le pôle urbain qui nous intéresse : la ville de Montpellier. Nous trouverons ainsi les données correspondantes à cette population. Le découpage de l'INSEE en aires urbaines semble être adéquat avec le profil de la population que nous cherchons. Une aire urbaine, selon l'INSEE<sup>10</sup> est définie comme étant *"un ensemble de communes, d'un seul tenant et sans enclave, constitué par un pôle urbain (...) et par des communes rurales ou unités urbaines dont au moins 40% de la population résidente ayant un emploi travaille dans le pôle ou dans des communes attirées par celui-ci"*. Les données concernant la répartition des CSP, de l'âge et du sexe au sein de la population de l'aire urbaine de Montpellier sont disponibles sur le site de l'INSEE<sup>11</sup>. Nous avons reporté ces valeurs dans l'annexe G.

---

10. [www.insee.fr/fr/metadonnees/definition/c2070](http://www.insee.fr/fr/metadonnees/definition/c2070)

11. <https://www.insee.fr/fr/statistiques/2011101?geo=AU2010-015>

## 5.2 Mise en application du redressement de l'échantillon

### 5.2.1 Croisement sexe $\otimes$ CSP $\otimes$ âge

Les données sur la population de plus de 15 ans sont regroupées en plusieurs modalités (2 pour le sexe, 8 pour la CSP et 6 pour l'âge), que l'on code pour faciliter le traitement informatique des données (code entre parenthèses) :

- Pour la variable *sexe* : femme (0) et homme (1).
- Pour la variable *CSP* : agriculteurs exploitants (1); artisans, commerçants, chefs d'entreprises (2); cadres et professions intellectuelles supérieures (3); agents de maîtrise et professions intermédiaires (4), employés (5), ouvriers (6), retraités (7), autres personnes sans activité professionnelle (8 - séparé dans notre enquête en deux catégories : étudiants et individus sans emploi).
- Pour la variable *âge* : de 15 à 19 ans (1), de 20 à 24 ans (2), de 25 à 39 ans (3), de 40 à 54 ans (4), de 55 à 64 ans (5), 65 ans et plus (6).

Compte-tenu du nombre de modalités de chacune des variables, il y a  $2 \times 8 \times 6 = 96$  combinaisons possibles *sexe*  $\otimes$  *CSP*  $\otimes$  *âge* ( $S \otimes C \otimes A$ ). Chaque individu est alors caractérisé par un code à trois chiffres, afin de lier ses réponses à la catégorie à laquelle il appartient : le premier chiffre est le code de la variable *sexe*, le deuxième est celui de la variable *CSP* et le dernier est celui de la variable *âge*. Le code 034 correspond par exemple aux femmes (0xx), cadres ou occupant une profession intellectuelle supérieure (x3x), âgées entre 40 et 54 ans (xx4).

### 5.2.2 Représentativité d'un individu de l'échantillon dans la population

Au travers de cette pondération, un individu de notre base de données va représenter une certaine partie de la population : celle qui aura les mêmes caractéristiques que lui en ce qui concerne le sexe, la CSP et l'âge. Il convient alors de déterminer

le poids de l'individu  $p_{sexe,CSP,age}$  dans la base de données, c'est-à-dire le nombre d'individus qu'il représente :

$$p_{sexe,CSP,age} = \frac{N_{sexe,CSP,age}}{n_{sexe,CSP,age}}$$

$N_{sexe,CSP,age}$  est le nombre d'individus caractérisés par un croisement particulier  $S \otimes C \otimes A$  dans la population de l'aire urbaine de Montpellier et  $n_{sexe,CSP,age}$  le nombre d'individus caractérisés par ce même croisement dans l'échantillon.

Nous allons projeter les résultats de la section précédente, dans laquelle 471 individus ont pris part à un jeu sérieux et ont répondu à certaines questions au sujet de la projection hypothétique de leur comportement lors de la mise en place des PCE. L'annexe H indique le poids de chaque individu dans ces projections, en fonction du croisement  $S \otimes C \otimes A$  auquel il appartient. Il existe théoriquement 96 croisements  $S \otimes C \otimes A$  possibles mais, dans la population, 5 croisements ne caractérisent pas un individu. Ces croisements réfèrent à des individus qui seraient retraités et qui auraient moins de 25 ans (codes 071 et 072 pour les femmes, 171 et 172 pour les hommes) et des individus de moins de 20 ans, de sexe féminin et qui seraient agricultrices exploitantes (code 011).

Notre échantillon fait figurer 58 croisements  $S \otimes C \otimes A$  sur les 91 croisements existants dans l'aire urbaine de Montpellier. Ces 58 croisements représentent 91 % de la population de plus de 15 ans. La moitié de la représentativité manquante concerne une CSP : les ouvriers, surtout chez les hommes. Imputer des données manquantes ne nous semble pas être une bonne méthode pour notre base de données. Déjà modeste, celle-ci ne reflèterait pas correctement les comportements des individus manquants.

### 5.2.3 Avant de généraliser nos résultats...

Nous pouvons constater dans l'annexe H que, pour certains croisements  $S \otimes C \otimes A$ , un unique individu peut représenter plus de 10000 personnes. C'est notamment le cas d'un individu de notre base de données qui est un homme, ouvrier, âgé entre 40 et 54 ans (code 164). Cet individu représente 11525 personnes de l'aire urbaine de Montpellier. Pour remédier à ce problème, pour chacun des phénomènes pour lesquels nous souhaitons effectuer une projection des résultats sur l'ensemble de la population, nous proposons d'effectuer 11 simulations. Ces simulations nous permettront de vérifier si nos résultats sont globalement robustes. Nous pourrons ainsi présenter des résultats généraux sur l'effet des PCE sur le trafic des modes "lourds" domestiques dans la ville de Montpellier. Il conviendra de procéder à un arbitrage : soit nous accordons un poids trop important à certains individus, soit nous acceptons que notre échantillon représente une plus petite partie de la population.

Les six premières simulations consistent à exclure au fur et à mesure les croisements  $S \otimes C \otimes A$  pour lesquels le nombre de réponses à l'enquête est inférieur à une valeur fixée a priori. La première simulation (Simulation 1) comportera toutes les données de l'échantillon redressé. Nous excluons au fur et à mesure les individus appartenant aux catégories  $S \otimes C \otimes A$  pour lesquelles nous avons moins de 2 (Sim. 2), 3 (Sim. 3), 4 (Sim. 4), 5 (Sim. 5) et 10 réponses (Sim. 6) dans l'enquête.

Une autre manière d'appréhender la sur-représentativité de certains individus est d'effectuer des simulations dans lesquelles nous allons procéder à de nouvelles exclusions. Nous allons exclure les croisements  $S \otimes C \otimes A$  où le poids de chaque individu dépasse un nombre fixé a priori de personnes représentées dans la population. Cinq simulations supplémentaires viendront en appui de notre étude. La septième simulation (Sim. 7) exclura les individus de l'échantillon qui représentent à eux-seuls plus de 10000 personnes. Nous excluons au fur et à mesure les individus de l'échantillon

qui représentent à eux-seuls plus de 5000 (Sim. 8), 3000 (Sim. 9), 2000 (Sim. 10) et 1000 (Sim. 11) personnes.

## 5.3 Observations à destination des décideurs publics locaux

### 5.3.1 Impact des PCE sur la réduction du trafic routier

Nous proposons de généraliser le résultat relatif au nombre de déplacements évités en mode "lourd" par le système de PCE. Il est donc nécessaire de réévaluer les courbes d'offre et de demande du marché des PCE pour chacune des simulations que l'on veut effectuer. Pour la visualisation de chacun des graphiques, nous renvoyons le lecteur en annexe I.

Dans un premier temps, nous cherchons l'équilibre du marché des PCE pour chacune de nos simulations. Tout comme dans la section précédente, nous estimons les courbes d'offre et de demande de PCE au voisinage de l'équilibre par interpolation linéaire. Une fois les équations de régression caractérisées, l'équilibre du marché hypothétique des PCE se situe à l'intersection des courbes d'offre et de demande de PCE estimées au voisinage de l'équilibre du marché.

Soient deux triplets (prix du PCE ; offre de PCE ; demande de PCE), l'un précédant et l'autre suivant l'équilibre :  $(P_1; O_1; D_1)$  et  $(P_2; O_2; D_2)$ , avec  $P_1 < P_2$ ,  $O_1 < O_2$  et  $D_1 > D_2$ . La première étape consiste donc à estimer les portions de courbes d'offre et de demande de PCE que l'on suppose linéaires au voisinage de l'équilibre. Une fois que l'équilibre est déterminé, nous calculons le nombre de déplacements évités en mode "lourd" avec la mise en place des PCE. Nous utilisons la même méthode que celle que nous avons présentée lors de l'analyse des déplacements évités dans l'échantillon, à la quatrième section de ce chapitre. Le tableau 3 reporte les résultats de ces interpolations pour les 6 premières simulations.

Numéro de la simulation	1	2	3	4	5	6
<b>Population représentée</b>	459581 (91%)	413710 (82%)	374564 (74%)	328208 (65%)	320116 (63%)	157558 (31%)
$(P_1; O_1; D_1)$	(1,6 €; 138012; 179297)	(1,6 €; 127843; 147969)	(1,5 €; 96507; 122435)	(1,5 €; 90153; 102537)	(1,5 €; 88130; 98491)	(1 €; 59644; 59940)
$(P_2; O_2; D_2)$	(2 €; 138012; 74708)	(2 €; 127843; 67281)	(1,6 €; 122807; 122435)	(1,6 €; 116453; 102537)	(1,6 €; 114430; 98491)	(1,5 €; 59933; 52481)
<b>Annulation de déplacements en mode "lourd"</b>	16%	14%	13%	14%	14%	6%
<b>Prix d'équilibre</b>	1,76 €	1,7 €	1,59 €	1,55 €	1,54 €	1,02 €

Tableau 3 – Résultats des simulations 1 à 6 - Marché hypothétique des PCE - Généralisation des résultats

À l'exception de la dernière colonne où la population est représentée à 31%, la mise en place d'un marché des PCE engendre en moyenne une annulation des déplacements en mode "lourd" qui gravite en moyenne autour de 14%, pour un prix du PCE oscillant entre 1,54 € et 1,76 €.

Par rapport aux résultats de l'échantillon, nous observons alors une augmentation de la proportion de voyages évités. Notre échantillon fait état d'une surreprésentation des individus jeunes et étudiants<sup>12</sup> qui utilisent peu les modes "lourds". Le fait de rééquilibrer la base de données implique que l'on accorde plus de poids aux individus utilisant davantage les modes "lourds". Par conséquent, l'impact sur le nombre de voyages évités augmente.

12. Voir annexe C.

Le tableau 4 reporte les résultats des 5 autres simulations qui éliminent les individus de l'échantillon en fonction de leur représentativité dans la population. À l'exception des deux dernières simulations, où la population est représentée à 41% et 27%, la mise en place d'un marché engendre une annulation des déplacements en mode "lourd" comprise entre 11% et 15%. Le prix du PCE oscille quant à lui entre 1,65 € et 1,82 €.

Numéro de la simulation	7	8	9	10	11
<b>Représentativité maximale d'un individu, en nombre d'individus</b>	10000	5000	3000	2000	1000
<b>Population représentée</b>	395421 (78%)	308006 (61%)	280400 (56%)	209319 (41%)	135673 (27%)
$(P_1; O_1; D_1)$	(1,6 €; 116958; 167772)	(1,6 €; 104322; 123498)	(1,6 €; 100931; 105936)	(1,5 €; 72980; 75424)	(1 €; 48863; 53365)
$(P_2; O_2; D_2)$	(2 €; 116958; 74708)	(2 €; 104322; 69645)	(2 €; 100981; 62079)	(1,6 €; 88623; 75424)	(1,5 €; 49166; 45358)
<b>Annulation de déplacements en mode "lourd"</b>	15%	13%	11%	9%	7%
<b>Prix d'équilibre</b>	1,82 €	1,74 €	1,65 €	1,52 €	1,07 €

Tableau 4 – Résultats des simulations 7 à 11 - Marché hypothétique des PCE - Généralisation des résultats

Le graphique 12 synthétise la proportion de voyages évités et le prix d'équilibre du marché hypothétique des PCE des 11 simulations. Compte-tenu de la taille de notre échantillon, il nous est malheureusement impossible de déterminer avec précision et certitude l'impact des PCE sur le transfert modal. Nous constatons néanmoins, pour une part de la population représentée supérieure à 50% (à droite de la ligne rouge du graphique), une certaine régularité de la proportion des déplacements annulés

lors de la mise en place du marché des PCE. Cette régularité nous permet de décrire un intervalle relativement mince de l'impact moyen des PCE sur le trafic routier.

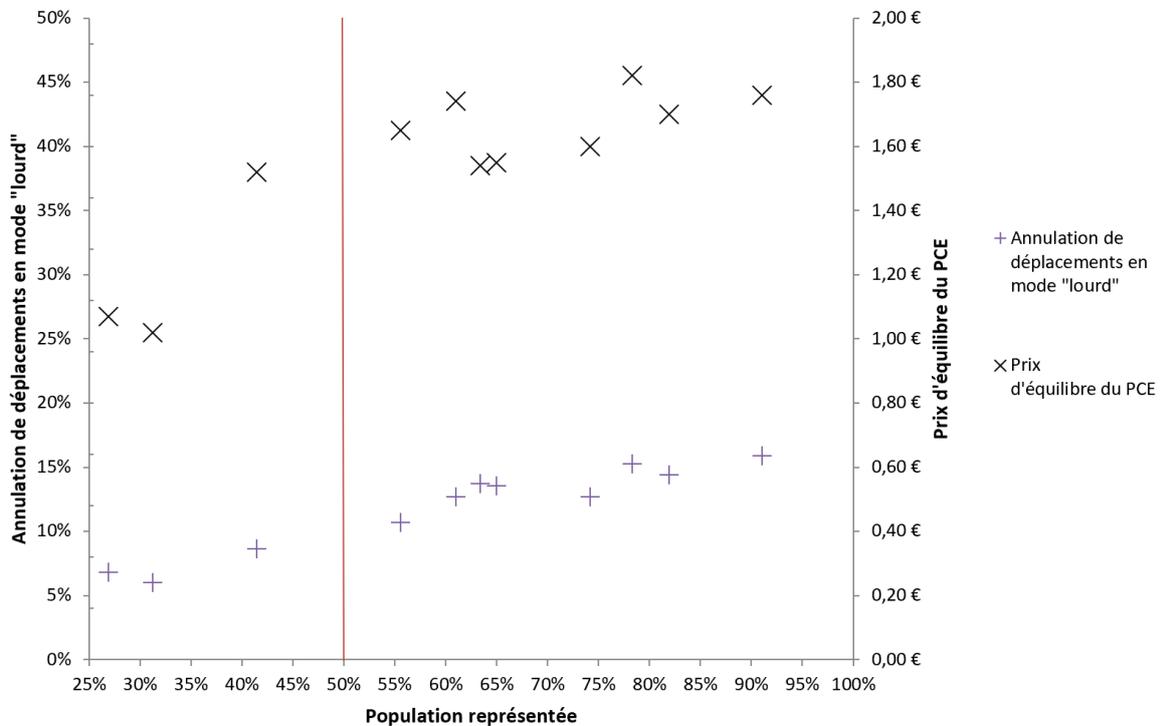


Figure 12 – Synthèse des simulations 1 à 11 - Prix d'équilibre du marché des PCE et déplacements évités en mode "lourd" - Généralisation des résultats

**Observation 1 :** Sur 100 voyages en mode "lourd" dans la ville de Montpellier des individus de l'aire urbaine de Montpellier, environ 15 voyages seront évités par la mise en place du marché des PCE, pour un prix du permis compris entre 1,54 € et 1,82 €. Ce résultat est conditionné par l'allocation initiale de PCE qui empêche les individus d'effectuer un voyage sans faire recours au marché des PCE. Alors, la proportion de voyages évités pourrait croître à mesure que l'allocation initiale de PCE baisse. Dans ce cas, il faudra accorder un point de vigilance à l'évolution du prix de marché des PCE.

**Observation 2** : Le prix d'équilibre du marché, dans notre cadre de travail, est faible relativement au prix moyen d'une entrée dans la ville lorsqu'il y a un péage urbain <sup>13</sup>. Cela signifie que l'objectif d'une mobilité urbaine plus soutenable ne rime pas avec une désincitation financière importante pour les ménages. Ce résultat n'inclut pas le caractère incitatif du PCE : les individus se déplaçant dans la ville de Montpellier en mode "lourd" peuvent être incités, à leur tour, à céder des PCE. Ils renonceraient donc à des voyages en mode "lourd". En effet, nous travaillons dans un contexte d'immédiateté (Keren & Roelofsma (1995) [57] ; O'Donoghue & Rabin (1999) [74]) qui encourage, dans un premier temps, les individus à dépenser leurs PCE pour se déplacer. Nous pouvons anticiper un effet d'apprentissage (Erev & Barron (2005) [36]) du système de PCE qui pourrait ensuite progressivement inciter les individus qui se déplacent en mode "lourd" à réduire cette dépense.

Le tableau 5 permet d'observer le nombre moyen de déplacements évités par semaine, par individu. Ce nombre est compris entre 0,37 et 0,53, pour un taux de représentativité de la population supérieur à 50%, c'est-à-dire en ne prenant pas en compte les simulations 6, 10 et 11.

---

13. [www.ademe.fr/sites/default/files/assets/documents/etat-art-sur-peages-urbains-2014.pdf](http://www.ademe.fr/sites/default/files/assets/documents/etat-art-sur-peages-urbains-2014.pdf)

<b>Simulation</b>	<b>Nombre d'individus se déplaçant dans la ville de Montpellier en mode "lourd" (% de ces individus par rapport à la population représentée)</b>	<b>Nombre moyen de voyages pré-PCE par individu en mode "lourd"</b>	<b>Variation du nombre moyen de voyages par individu après la mise en place des PCE</b>
1	293033 (64%)	3,33	-0,53
2	257331 (62%)	3,5	-0,5
3	225326 (60%)	3,59	-0,46
4	192301 (59%)	3,44	-0,47
5	186232 (58%)	3,43	-0,47
6	75199 (48%)	3,45	-0,21
7	249927 (63%)	3,48	-0,53
8	181941 (59%)	3,35	-0,43
9	161213 (57%)	3,5	-0,37
10	106998 (51%)	3,42	-0,3
11	64507 (48%)	3,55	-0,24

Tableau 5 – Variation hebdomadaire moyenne du nombre de déplacements par individu se déplaçant dans la ville de Montpellier en mode "lourd" - Marché hypothétique des PCE - Généralisation des résultats

**Observation 3** : La mise en place d'un marché des PCE journaliers annule 2 voyages par mois en mode "lourd". Cette observation est valable en moyenne, pour chaque individu de l'aire urbaine de Montpellier se déplaçant dans la ville de Montpellier en mode "lourd". Pour une acceptabilité accrue des PCE, des mesures provisoires compensant cette annulation des déplacements pourraient être envisagées. Par exemple, les autorités publiques pourraient céder deux titres journaliers de transport collectif pour tous les individus dans le marché des PCE, afin de les accompagner et de les inciter à modifier leurs choix de déplacement. Rappelons que la réussite des PCE est conditionnée par la mise en place de mesures favorisant l'usage des transports alternatifs.

### 5.3.2 Incitation des PCE à adopter des comportements de mobilité urbaine plus vertueux

Reprenons et généralisons les réponses à propos des projections hypothétiques des individus de l'échantillon à propos de leurs comportements de mobilité lors de la mise en place des PCE. L'annexe J reporte l'ensemble des graphiques représentant les tendances sur les effets qu'auront les PCE sur les choix de déplacement de la population représentée. Des tendances similaires à celles que nous avons constatées dans l'échantillon se dégagent. Nous restons prudents sur la méthodologie utilisée pour la révélation de ces tendances.

**Observation 4 :** Il existe une incitation au report des déplacements, à la fois modal et temporel, avec la mise en place des PCE.

- Sur le transfert modal, la moitié des individus se déplacerait davantage avec d'autres modes de déplacement (e.g. marche, vélo, transports collectifs et nouveaux modes). Le changement de mode de déplacement est favorisé par rapport à l'usage du mode "lourd" partagé (environ 30% des individus déclarent qu'ils pratiqueront davantage le covoiturage urbain). Le nombre de véhicules-kilomètres en mode "lourd" est directement impacté et diminue, bien qu'il puisse exister une opportunité à vouloir utiliser davantage le mode "lourd" suite à l'amélioration des conditions de circulation.
- Sur le report temporel, plus de 30% des individus se déplaceront davantage en mode "lourd" pendant les périodes de week-end. Ce comportement peut se résorber par l'habitude des usages des modes alternatifs en semaine. On constate aussi une certaine indifférence sur l'usage du mode "lourd" (30% en semaine, 40% le week-end), que l'on peut interpréter à travers divers arguments (e.g. nécessité du déplacement, captivité, réseau de transport alternatif inadéquat, et aucune incitation et/ou intérêt à vouloir adopter un comportement plus vertueux).

**Observation 5** : Il existe une évidente désincitation à venir en ville pour des déplacements non-contraints, pour ceux n'habitant pas ou ne travaillant pas à Montpellier. Environ 30% des individus viendront moins dans la ville de Montpellier. La problématique d'aménagement des zones périurbaines se pose alors, mais aussi celle de l'éventuelle relocalisation des activités. Afin de faire face à ce phénomène, une réflexion doit être menée sur une hybridation des politiques publiques alliant maîtrise du territoire et promotion des activités en zone urbaine.

## 6 Analyses factorielles discriminantes des individus écartés de l'usage du mode "lourd" lors de la mise en place hypothétique des PCE

Cette sous-section est consacrée à la recherche des caractéristiques communes aux individus susceptibles d'être écartés de l'usage des modes "lourds" par la mise en place du marché des PCE. Nous pouvons séparer les 79 individus écartés du marché des PCE sur les 250 acheteurs potentiels en deux groupes :

- **Les individus qui s'écartent du marché eux-mêmes, par "conviction"**. Ces individus ont déclaré ne pas être disposés à payer pour acquérir le PCE supplémentaire, et renoncent alors directement à assurer l'ensemble de leurs déplacements en mode "lourd". Ces individus sont au nombre de 41.
- **Les individus écartés du marché alors qu'ils auraient voulu assurer l'ensemble de leurs déplacements en mode "lourd"**. Ces individus ont une DmP non-nulle, mais inférieure au prix d'équilibre du marché (1,53 €). Par conséquent, ces individus ne pourront pas acquérir le PCE dans le marché et renoncent de manière contrainte à effectuer un voyage en mode "lourd". Ces individus sont au nombre de 38.

Existe-t-il des caractéristiques individuelles qui permettent d'expliquer le fait que les individus s'écartent volontairement du marché des PCE ? Quelles caractéristiques expliquent le fait que les individus sont écartés par le prix de marché ? Nous proposons de modéliser ces événements en effectuant séquentiellement deux analyses factorielles discriminantes (AFD). Dans une première étape, nous allons chercher les déterminants de la mise à l'écart volontaire des individus du marché des PCE. Dans une seconde étape, nous exposerons les caractéristiques individuelles qui augmentent les chances qu'un individu soit écarté du marché du fait d'une DmP des

PCE non-nulle, mais inférieure au prix de marché des PCE. Une réflexion sera enfin menée sur l'implication de ces résultats pour la définition des politiques publiques complémentaires à la mise en place des PCE.

Notre base de données fait état de plusieurs caractéristiques individuelles qui peuvent être susceptibles de discriminer nos trois groupes d'individus (le groupe d'individu qui s'écarte volontairement du marché, le groupe d'individus qui est écarté du marché à cause de sa DmP des PCE inférieure au prix de marché des PCE et le groupe d'individu qui pourra acquérir des PCE dans le marché). Nous proposons d'effectuer ces AFD en intégrant les variables quantitatives suivantes :

- L'âge de l'individu.
- Le revenu disponible mensuel au centre de la classe (en euros) par unité de consommation (UC - Le premier adulte du ménage compte pour 1 UC, les autres individus du ménage de 14 ans et plus comptent chacun pour 0,5 UC et les enfants de moins de 14 ans comptent chacun pour 0,3 UC).
- Le degré d'utilisation du mode "lourd" (L'individu est invité à mettre une note de 0 à 5 sur son degré d'utilisation du mode. Cette note est guidée par une seconde échelle, où la note de 0/5 est attribuée lorsque l'individu n'utilise jamais le mode (modalité "Jamais"). La note 5/5 est attribuée lorsque l'individu utilise tous les jours un mode "lourd" (modalité "Tous les jours").).
- Le degré d'utilisation des transports collectifs (même mesure que celle du degré d'utilisation des modes "lourds").
- La perception d'une perte de temps lors d'un déplacement à Montpellier (L'individu est invité à mettre une note de 0 à 5. Cette note est guidée par une seconde échelle, où la note 0/5 est attribuée lorsque l'individu ne perçoit jamais l'événement (modalité "Jamais"). La note 5/5 est attribuée si l'individu perçoit l'événement dès lors qu'il se déplace dans la ville (modalité "Toujours").).

- La perception de la pollution atmosphérique lors d'un déplacement à Montpellier (même mesure que la perception d'une perte de temps lors d'un déplacement à Montpellier).
- La perception d'un danger lié au comportement des autres citoyens lors d'un déplacement à Montpellier (même mesure que la perception d'une perte de temps lors d'un déplacement à Montpellier).
- La perception d'une difficulté à être informé sur les conditions de déplacement dans la ville de Montpellier (même mesure que la perception d'une perte de temps lors d'un déplacement à Montpellier).
- La perception d'une responsabilité individuelle dans les nuisances collectives (même mesure que la perception d'une perte de temps lors d'un déplacement à Montpellier).

Les outils informatiques permettent maintenant d'intégrer dans une AFD des variables qualitatives en tant que variables susceptibles de discriminer les groupes d'individus. Nous intégrons alors des variables dichotomiques 0/1 suivantes :

- Le sexe (Femme (0) et Homme (1)).
- Le fait de disposer d'une contrainte familiale de mobilité, par exemple déposer les enfants à l'école ou le conjoint au travail (Non (0) et Oui (1)).
- La localisation du logement (4 variables dichotomiques 0/1 représentant les 4 localisations suivantes : Au cœur de ville de Montpellier / Dans la ville de Montpellier, hors du cœur de ville / Dans la métropole de Montpellier, en dehors de la ville de Montpellier / Ailleurs. Une variable prendra comme valeur 1 si l'individu habite dans la localisation donnée par la variable, 0 sinon.).
- La catégorie socioprofessionnelle ((CSP) - 9 variables dichotomiques 0/1 représentant les 9 CSP suivantes : Agriculteurs exploitants / Artisans, commerçants, chefs d'entreprises / Cadres et professions intellectuelles supérieures /

Agents de maîtrise et professions intermédiaires / Employés / Ouvriers / Retraités / Étudiants / Individus sans emploi. Une variable prendra comme valeur 1 si l'individu appartient à la CSP que la variable décrit, 0 sinon.).

## 6.1 Déterminants de la mise à l'écart du marché des PCE par "conviction"

Dans le jeu sérieux, 41 individus ne sont pas disposés à payer pour acquérir le PCE qui leur manque afin d'assurer l'ensemble de leurs déplacements en mode "lourd". Nous appellerons "écartés" les individus qui se mettent volontairement à l'écart du marché des PCE. 209 individus sont alors prêts à payer pour acquérir ce PCE et feront partie du groupe des "non-écartés". Notre première AFD a pour objectif d'établir une grille de lecture sur les caractéristiques individuelles discriminant ces deux groupes.

Avant cela, nous souhaitons effectuer une pré-sélection des variables susceptibles de discriminer les deux groupes d'individus. Deux options s'offrent à nous. La première, dans l'hypothèse où la distribution de la variable considérée suit une loi normale dans les deux sous-échantillons indépendants, consistera à effectuer un test paramétrique de comparaison des moyennes. Nous sélectionnerons les variables où la moyenne (ou la proportion pour les variables qualitatives binaires) est significativement différente entre les deux sous-échantillons. La deuxième option, dans l'hypothèse où la distribution de variable considérée ne suit pas une loi normale dans les deux sous-échantillons indépendants, consistera à effectuer le test bilatéral non-paramétrique de Mann-Whitney. Ce test détermine si les distributions des deux sous-échantillons sont identiquement positionnées. Si tel n'est pas le cas, alors ces variables pourront être susceptibles de discriminer nos deux groupes d'individus et seront sélectionnées pour effectuer notre AFD.

Il s'avère, par le test de normalité de Shapiro-Wilk, qu'aucune des deux distributions de nos deux sous-échantillons suit une loi normale. Nous distinguons alors les variables susceptibles de discriminer nos deux groupes à l'aide du test de Mann-Whitney. Le tableau 6 reporte les résultats du test.

Pour un seuil critique de 10%, certaines variables sont susceptibles d'être discriminantes dans nos deux sous-échantillons. Il s'agit de l'âge, du revenu disponible par unité de consommation, de la perception d'un danger lié au comportement des autres citoyens, du fait d'exercer une profession intermédiaire et du fait d'être étudiant. Dans une moindre mesure, au point de pourcentage près du seuil critique, les variables modélisant le fait d'habiter en cœur de ville et la perception d'une perte de temps dans les déplacements peuvent aussi discriminer nos deux groupes.

Nous effectuons une AFD sur la base des variables que nous avons sélectionnées à l'aide du test de Mann-Whitney. Le test du lambda de Wilks nous permet de rejeter l'hypothèse selon laquelle les centres de gravité des deux sous-échantillons sont égaux ( $\Lambda = 0,921$ ,  $F = 2,984$ , prob. critique = 0,005). Autrement dit, au moins une de nos variables de l'AFD permet de discriminer les individus qui se mettent volontairement à l'écart du marché des autres individus.

6. Analyses factorielles discriminantes des individus écartés de l'usage du mode "lourd" lors de la mise en place hypothétique des PCE

VARIABLES QUANTITATIVES						
	Moyenne		Écart-type		Mann-Whitney	
	Non-écartés	Écartés	Non-écartés	Écartés	Statistique U	Prob. critique
Âge	32,78	36,244	12,559	13,843	3553,3	0,084
Revenu disponible par UC	1616,715	2083,624	1016,798	1354,099	3314,5	0,021
<b>Degré d'utilisation :</b>						
– Modes "lourds"	2,794	2,683	1,641	1,781	4445,5	0,698
– Transports collectifs	2,148	2	1,576	1,581	4501,5	0,602
<b>Perception des événements :</b>						
– Perte de temps	2,66	3,049	1,419	1,516	3618,5	0,109
– Pollution atmosphérique	2,383	2,463	1,406	1,614	4142	0,732
– Danger lié aux autres citoyens	3,335	3,756	1,36	1,41	3450	0,043
– Difficulté de s'informer	2,411	2,683	1,402	1,588	3838,5	0,283
– Resp. indiv. nuisances coll.	2,038	2,024	1,308	1,491	4317	0,938
VARIABLES QUALITATIVES						
	Proportion		Écart-type		Mann-Whitney	
	Non-écartés	Écartés	Non-écartés	Écartés	Statistique U	Prob. critique
Sexe (1 = "Homme")	0,464	0,488	0,5	0,506	4183	0,783
Contrainte (1 = "Oui")	0,297	0,341	0,458	0,48	4092,5	0,57
<b>Logement (1 = "Oui") :</b>						
– Cœur de ville	0,038	0,098	0,192	0,3	4030,5	0,106
– Montpellier, hors du cœur	0,598	0,585	0,491	0,499	4339	0,881
– Métropole de Montpellier	0,258	0,244	0,439	0,435	4346,5	0,848
– Ailleurs	0,105	0,073	0,308	0,264	4422	0,533
<b>CSP (1 = "Oui") :</b>						
– Agriculteurs exploitants	0,005	0,024	0,069	0,156	4200,5	0,201
– Artisans, ...	0,038	0	0,192	0	4448,5	0,205
– Prof. intellectuelles sup., ...	0,311	0,39	0,464	0,494	3945	0,323
– Prof. intermédiaires, ...	0,053	0,171	0,224	0,381	3778,5	0,008
– Employés	0,139	0,146	0,347	0,358	4252	0,9
– Ouvriers	0,014	0,024	0,119	0,156	4241,5	0,644
– Retraités	0,038	0,073	0,192	0,264	4135	0,322
– Étudiants	0,321	0,122	0,468	0,331	5135,5	0,01
– Sans emploi	0,081	0,049	0,274	0,218	4424	0,474

Tableau 6 – Statistiques descriptives et test de Mann-Whitney - Individus écartés du marché des PCE par "conviction" (N=250)

Un seul axe discriminant est nécessaire puisque nous détenons seulement deux groupes. Le tableau 7 reporte les coefficients de corrélation entre nos variables discriminantes et l'axe factoriel. Nous nous apercevons que la variable dichotomique modélisant le fait d'être étudiant est la seule à être corrélée positivement avec notre axe discriminant. De l'autre côté de l'axe discriminant, dans des proportions similaires, un groupe de deux variables corrélées négativement avec notre axe discriminant se détache des autres variables. Ces deux variables modélisent le fait d'exercer une profession intermédiaire et le revenu disponible par unité de consommation.

Corrélations négatives		Corrélations positives	
Variable	Valeur	Variable	Valeur
CSP : Professions intermédiaires, ...	-0,6	CSP : Étudiants	0,576
Revenu disponible par UC	-0,564		
Perception : Danger lié aux autres citoyens	-0,403		
Logement : Cœur de ville	-0,364		
Âge	-0,356		
Perception : Perte de temps	-0,355		

Tableau 7 – Corrélation entre les variables et le facteur discriminant - AFD - Individus écartés du marché des PCE par "conviction" (N=250)

Nous devons connaître la position des centres de gravité des deux groupes d'individus sur l'axe discriminant. L'objectif est de lier économiquement la position des groupes d'individus aux variables qui permettent de constituer cet axe discriminant. Le centre de gravité du nuage de point projeté sur l'axe discriminant qui représente les individus qui ne se mettent pas à l'écart du marché a pour coordonnée la valeur 0,13. Cette coordonnée est proche de l'origine du repère, relativement à la coordonnée du centre de gravité des individus qui se mettent à l'écart du marché

(-0,661). Par conséquent, plus un point-individu est projeté dans le sens opposé de l'axe discriminant, plus il sera probable que l'individu caractérisé par ce point se mette volontairement à l'écart du marché des PCE. Il apparaît alors que toutes les variables corrélées négativement avec l'axe discriminant sont les variables qui augmentent les chances qu'un individu se mette volontairement à l'écart du marché des PCE. À l'inverse, les variables corrélées positivement avec notre axe factoriel sont les variables qui diminuent les chances que l'individu se mette volontairement à l'écart du marché des PCE.

La probabilité qu'un individu s'écarte volontairement du marché des PCE est d'autant plus grande que (1) celui-ci exerce une profession intermédiaire et (2) détient un revenu disponible par unité de consommation élevé. Puisque nous considérons généralement que l'usage des modes "lourds" est croissant avec le revenu de l'individu, il n'est pas surprenant qu'une partie des individus disposant d'un revenu élevé ou exerçant une profession intermédiaire rejette notre instrument de politique publique relatif aux problématiques de la mobilité urbaine. Ces individus refusent ainsi de payer davantage pour se déplacer en mode "lourd".

Dans une moindre mesure, cette même probabilité croît d'autant plus que (a) l'individu perçoit un danger lié au comportement de déplacement des autres citoyens, (b) habite au cœur de la ville de Montpellier, (c) est âgé et (d) perçoit une perte de temps lors de ses déplacements dans la ville de Montpellier.

Sur les perceptions, les individus ne souhaitent pas payer davantage pour un usage d'un mode qui leur fait perdre du temps ou qui est dangereux. Ces individus ont alors une propension au changement de mode plus élevée que les autres en raison des nuisances que l'usage des modes "lourds" leur fait subir.

Sur le lieu de domicile, un individu qui habite dans le cœur de ville de Montpellier a plus de "possibilités modales" afin de pouvoir se déplacer dans la ville. Il possède

un avantage de localisation certain pour assurer ses principales activités quotidiennes dans la ville de Montpellier. Cet individu peut plus aisément refuser de payer des PCE pour assurer l'ensemble des déplacements qu'il effectuait en mode "lourd" avant la mise en place des PCE.

Enfin, le fait que l'âge et la probabilité qu'un individu se mette à l'écart du marché des PCE suive une même tendance croissante peut être lié à la corrélation positive entre l'âge et le revenu. Ceci est vraisemblablement valide jusqu'à un certain âge, car le revenu est généralement concave en fonction de l'âge. Nous ne disposons pas toutefois de données suffisantes sur les individus les plus âgés de la population. Cet événement peut également être lié au désintérêt vis-à-vis de la mesure, et au coût psychologique d'entrée au marché des PCE plus important si la plateforme d'échange est numérique ou si l'accès au système de PCE engendre des démarches numérisées. À l'opposé alors, le fait d'être étudiant implique une propension à une mise à l'écart du marché plus faible.

Le tableau 8 reporte les coefficients associés aux deux fonctions linéaires discriminantes permettant de classer *ex-post* les individus de notre analyse dans l'un des deux groupes. Bien que notre analyse classe dans la bonne catégorie 203 individus sur les 209 qui sont prêts à payer pour acquérir un PCE (Spécificité = 97,13%), 5 individus sur les 41 qui se mettent à l'écart du marché sont bien classés (Sensibilité = 12,2%).

De façon globale, 83,20% des individus sont tout de même bien classés dans notre AFD en raison d'un bon classement des individus qui ne se mettent pas volontairement à l'écart du marché. Le pouvoir discriminant de l'analyse, modélisé par la valeur propre de l'axe factoriel, est significatif mais faible ( $\lambda = 0,086$ , statistique de Barlett = 20,24, prob. critique = 0,005). Notre analyse se veut alors bien plus descriptive que prédictive. C'est la raison pour laquelle nous avons choisi de recou-

rir à l'AFD plutôt qu'à un modèle logit binomial qui donne exactement les mêmes tendances mais qui aura plutôt vocation à être utilisé pour une analyse prédictive. Nous parlerons des implications économiques de nos résultats après avoir effectué une seconde AFD. Dans la seconde AFD, nous allons déterminer les caractéristiques individuelles qui permettent de discriminer le groupe des individus qui sont écartés du marché en raison de leur DmP des PCE inférieure au prix de marché du groupe des autres individus qui pourront acquérir des PCE.

Variable	Non-écartés	Écartés
Constante	12,983	10,024
Âge	0,266	0,263
Revenu disponible par UC	$1,486.10^{-4}$	$4,539.10^{-4}$
Perception : Perte de temps	0,927	1,012
Perception : Danger lié aux autres citoyens	2,189	2,322
Logement : Cœur de ville	-23,293	-21,731
CSP : Professions intermédiaires, ...	-19,901	-18,344
CSP : Étudiants	0,074	-0,563

Tableau 8 – Fonction linéaire de classement - AFD - Individus écartés du marché des PCE par "conviction" (N=250)

## 6.2 Déterminants de l'exclusion du marché des PCE par une DmP insuffisante

Nous avons regroupé, dans la première AFD, l'ensemble des individus qui étaient prêts à payer pour acquérir des PCE. Ces individus faisaient partie du groupe des "non-écartés". Nous souhaitons, à l'aide d'une seconde AFD, trouver les caractères individuels qui augmentent les chances de ne pas pouvoir acquérir des PCE en raison d'une DmP inférieure au prix de marché. Ces individus se font ainsi exclure

du marché des PCE en tant qu'acheteur. Parmi les 209 individus prêts à payer pour pouvoir acquérir des PCE dans le marché, 38 individus ne pourront pas acquérir des PCE en raison d'une DmP des PCE inférieure au prix de marché des PCE, qui est de 1,53 €. Ces 38 individus appartiendront au groupe des "exclus" du marché. Les 171 autres individus appartiendront au groupe des "non-exclus" du marché.

Aucune des distributions dans nos deux sous-échantillons indépendants ne suit une loi normale selon le test de Shapiro-Wilk. Le test bilatéral non-paramétrique de Mann-Whitney nous permet, tout comme dans la précédente analyse, de sélectionner les variables susceptibles de discriminer nos deux groupes d'individus. À l'aide du tableau 9, au seuil critique de 10%, les caractéristiques individuelles suivantes peuvent discriminer les deux groupes d'individus : le revenu disponible par unité de consommation, la perception d'une responsabilité individuelle dans les nuisances collectives, le sexe, le fait d'être agriculteur exploitant, ou ouvrier. Ces variables sont ainsi intégrées dans la seconde AFD. D'après le test du lambda de Wilks, au moins une de nos cinq variables est discriminante ( $\Lambda = 0,916$ ,  $F = 2,259$ , prob. critique = 0,003).

6. Analyses factorielles discriminantes des individus écartés de l'usage du mode "lourd" lors de la mise en place hypothétique des PCE

<b>VARIABLES QUANTITATIVES</b>						
	<b>Moyenne</b>		<b>Écart-type</b>		<b>Mann-Whitney</b>	
	<b>Non-exclus</b>	<b>Exclus</b>	<b>Non-exclus</b>	<b>Exclus</b>	<b>Statistique U</b>	<b>Prob. critique</b>
Âge	32,912	32,184	12,561	12,7	3357	0,75
Revenu disponible par UC	1673,684	1360,352	1040,95	866,588	3856,5	0,068
<b>Degré d'utilisation :</b>						
– Modes "lourds"	2,848	2,553	1,67	1,501	3557	0,35
– Transports collectifs	2,135	2,211	1,56	1,663	3214,5	0,918
<b>Perception des événements :</b>						
– Perte de temps	2,626	2,816	1,418	1,43	2984	0,424
– Pollution atmosphérique	2,374	2,421	1,427	1,328	3182	0,84
– Danger lié aux autres citoyens	3,316	3,421	1,361	1,368	3116,5	0,688
– Difficulté de s'informer	2,392	2,5	1,395	1,447	3114	0,684
– Resp. indiv. nuisances coll.	1,953	2,421	1,287	1,348	2598,5	0,048
<b>VARIABLES QUALITATIVES</b>						
	<b>Proportion</b>		<b>Écart-type</b>		<b>Mann-Whitney</b>	
	<b>Non-exclus</b>	<b>Exclus</b>	<b>Non-exclus</b>	<b>Exclus</b>	<b>Statistique U</b>	<b>Prob. critique</b>
Sexe ( <i>1 = "Homme"</i> )	0,491	0,342	0,501	0,481	3733,5	0,097
Contrainte ( <i>1 = "Oui"</i> )	0,287	0,342	0,453	0,481	3068,5	0,5
<b>Logement (<i>1 = "Oui"</i>) :</b>						
– Cœur de ville	0,035	0,053	0,185	0,226	3192	0,614
– Montpellier, hors du cœur	0,602	0,579	0,491	0,5	3325	0,792
– Métropole de Montpellier	0,251	0,289	0,435	0,46	3125,5	0,63
– Ailleurs	0,111	0,079	0,315	0,273	3353,5	0,562
<b>CSP (<i>1 = "Oui"</i>) :</b>						
– Agriculteurs exploitants	0	0,026	0	0,162	3163,5	0,035
– Artisans, ...	0,035	0,053	0,185	0,226	3192	0,614
– Prof. intellectuelles sup., ...	0,333	0,211	0,473	0,413	3648	0,141
– Prof. intermédiaires, ...	0,058	0,026	0,235	0,162	3353,5	0,425
– Employés	0,14	0,132	0,348	0,343	3277,5	0,89
– Ouvriers	0,006	0,053	0,076	0,226	3097	0,029
– Retraités	0,035	0,053	0,185	0,226	3192	0,614
– Étudiants	0,316	0,342	0,466	0,481	3163,5	0,755
– Sans emploi	0,076	0,105	0,266	0,311	3154	0,554

Tableau 9 – Statistiques descriptives et test de Mann-Whitney - Individus exclus du marché des PCE par une DmP inférieure au prix de marché (N=209)

Nous pouvons observer, dans le tableau 10, que le fait d'être ouvrier ou agriculteur exploitant, mais aussi de déclarer avoir une part de responsabilité dans les nuisances collectives sont des caractéristiques individuelles qui sont corrélées négativement avec l'axe factoriel discriminant nos deux groupes d'individus. Le revenu disponible par unité de consommation et le fait d'être un homme sont corrélés positivement avec l'axe discriminant.

Corrélations négatives		Corrélations positives	
Variable	Valeur	Variable	Valeur
CSP : Ouvriers	-0,523	Revenu disponible par UC	0,411
CSP : Agriculteurs exploitants	-0,507	Sexe : Homme	0,398
Perception : Resp. indiv. nuisances coll.	-0,477		

Tableau 10 – Corrélation entre les variables et le facteur discriminant - AFD - Individus exclus du marché des PCE par une DmP inférieure au prix de marché (N=209)

Le centre de gravité du nuage de point projeté des individus qui sont exclus du marché a pour coordonnée, sur l'axe factoriel, la valeur -0,661. La coordonnée est de 0,142 pour les individus qui ne sont pas exclus du marché. La projection d'un point-individu dans le sens opposé de l'axe discriminant verra l'individu associé détenir plus de chances d'être exclu du marché en raison d'une DmP des PCE inférieure au prix de marché. Toutes les variables corrélées négativement avec l'axe factoriel augmentent alors les chances qu'un individu soit exclu du marché des PCE en tant qu'acheteur. Les variables corrélées positivement avec l'axe factoriel procurent l'effet inverse.

La probabilité qu'un individu soit exclu du marché diminue lorsque le revenu disponible par unité de consommation augmente. Ce même revenu, rappelons-le, est

l'un des caractères individuels de mise à l'écart volontaire des individus du marché. Le revenu joue alors un rôle séquentiel. Dans un premier temps, un revenu élevé implique qu'une frange d'individus qui détient un tel revenu se met volontairement à l'écart du marché, par rejet du système de PCE. Dans un second temps, parmi l'ensemble des individus prêts à payer des PCE, les individus détenant un revenu élevé sont plus enclins à avoir une DmP élevée et, par conséquent, ont plus de chances de pouvoir acquérir des PCE.

L'effet du revenu se reporte également sur les CSP qui discriminent nos deux groupes d'individus. Un individu ouvrier ou agriculteur exploitant aura plus de chances d'être exclu du marché en ayant une DmP plus faible relativement aux autres individus qui pourront participer au marché. Ces individus ont une propension à se déplacer en mode "lourd" élevée en raison de la localisation périurbaine ou parcellaire (e.g. terrains agricoles) de leur activité de travail.

Le fait d'être une femme (resp. un homme) augmente (resp. diminue) la probabilité d'être exclu du marché. Les hommes ont alors une propension à se déplacer coûte que coûte en mode "lourd" plus élevée que les femmes. Ceci se traduit par une DmP des PCE plus grande. Les inégalités de salaires, l'organisation et la composition des ménages, et le lien qu'il y a entre le revenu et la probabilité d'être exclu du marché, impliquent que les femmes sont indéniablement défavorisées à l'acquisition des PCE.

Enfin, ressentir une part de responsabilité dans les nuisances collectives augmente aussi les chances d'être exclu du marché. Le marché des PCE désincite alors ce type d'individu à se déplacer en mode "lourd". Cette part de responsabilité dresse une barrière symbolique, une limite à l'usage du mode "lourd" par rapport à l'objectif quantitatif socialement désirable. Le franchissement de cette barrière est possible en acquérant des PCE dans le marché, mais engendre une culpabilité plus forte pour ces

individus vis-à-vis des nuisances engendrées par les déplacements en mode "lourd". Ces individus ont alors une propension plus faible que les autres à se déplacer coûte que coûte en mode "lourd".

Les coefficients des deux fonctions linéaires discriminantes sont reportés dans le tableau 11. Notre AFD classe dans la bonne catégorie 82,78% des individus. 170 individus sur les 171 qui ont une DmP des PCE supérieure ou égale au prix de marché des PCE (Spécificité = 99,42%) sont bien classés, tandis que 3 individus sur les 35 exclus du marché sont bien classés (Sensibilité = 7,89%). Notre seconde AFD possède un pouvoir discriminant significatif mais faible ( $\lambda = 0,092$ , statistique de Bartlett = 17,98, prob. critique = 0,003).

Variable	Non-exclus	Exclus
Constante	144,829	143,001
Revenu disponible par UC	$1,765.10^{-4}$	$-1.10^{-4}$
Perception : Resp. indiv. nuisances coll.	0,491	0,828
Sexe : Homme	0,199	-0,21
CSP : Agriculteurs exploitants	-216,284	-210,606
CSP : Ouvriers	-74,691	-71,31

Tableau 11 – Fonction linéaire de classement - AFD - Individus exclus du marché des PCE par une DmP inférieure au prix de marché (N=209)

### 6.3 Quelles implications pour la définition des politiques publiques ?

Les résultats de nos AFD nous permettent de suggérer quelques préconisations aux autorités publiques sur les mesures complémentaires à adopter lors de la mise en place d'un marché des PCE. Il faudra être prudent sur ces résultats en raison des limites déjà évoquées de nos analyses.

Nous synthétisons dans le tableau 12 l'effet des variables qui discriminent l'ensemble de nos individus. Ces individus sont finalement séparés en trois groupes. Le premier groupe est le groupe des individus qui se mettent volontairement à l'écart du marché. Le deuxième groupe caractérise les individus exclus du marché en raison d'une DmP des PCE qui est inférieure au prix de marché. Le dernier groupe d'individus est celui qui peut acquérir des PCE dans le marché. Le signe et l'intensité des effets sont jaugés à l'aide du signe des coefficients de corrélation variables-facteur discriminant, et de la valeur de ceux-ci.

<b>Variable</b>	<b>Écartés</b>	<b>Exclus</b>
Âge	+	
Revenu disponible par UC	+++	- -
Perception : Perte de temps	+	
Perception : Danger lié aux autres citoyens	++	
Perception : Resp. indiv. nuisances coll.		++
Sexe : Homme		-
Logement : Cœur de ville	+	
CSP : Agriculteurs exploitants		+++
CSP : Professions intermédiaires, ...	+++	
CSP : Ouvriers		+++
CSP : Étudiants	- - -	

Tableau 12 – Synthèse des liens statistiques obtenus par AFD - Déterminants des deux groupes écartés du marché des PCE

Le revenu disponible par unité de consommation est le seul caractère individuel qui joue un rôle séquentiel. Pendant que celui-ci prédispose une certaine frange d'individus aux revenus élevés à s'écarter volontairement du marché des PCE, il engendre une exclusion d'une partie des individus aux revenus plus modestes qui étaient prêts à entrer dans le marché en tant qu'acheteur pour acquérir des PCE.

La mise en place des PCE est à la fois désincitative pour une partie des individus disposant d'un revenu élevé, et inéquitable pour les faibles revenus.

Bien qu'il s'agisse d'une désincitation vertueuse collectivement des individus détenant un revenu élevé<sup>14</sup>, il n'en demeure pas moins qu'une réflexion doit être menée sur les mesures compensatoires à appliquer sur les individus aux revenus plus modestes. Ceux-ci sont davantage sujets à être exclus du marché. De telles mesures ne doivent pas non plus générer une iniquité en sens inverse, où les individus disposant de hauts revenus seront à leur tour désavantagés, ce qui diminuerait l'acceptabilité sociale de la mesure<sup>15</sup>. Une allocation initiale de PCE différente et un système de prélèvement différencié selon le revenu semblent inenvisageables.

La solution résiderait peut-être dans les modèles de *Yield Management*, où une réservation à l'avance de PCE serait permise pour les individus aux revenus modestes, à un prix inférieur à celui de l'équilibre attendu. Un mécanisme de compensation de l'écart de prix entre le prix de marché et le prix du PCE réservé à l'avance devrait alors être mis en place. En revanche, afin d'éviter toute spéculation sur ces PCE, ces derniers ne pourraient pas être revendus sur le marché ou cédés à des tiers. Le champ des possibles sur les mécanismes compensatoires est ouvert.

Le fait d'être écarté, exclu ou intégré en tant qu'acheteur dans le marché des PCE est aussi lié au fait d'appartenir à des CSP particulières. Cet effet est directement lié à l'effet du revenu. Il demeure en supplément que les individus les plus sujets à avoir leur activité de travail localisée à l'extérieur de la ville et/ou à plusieurs endroits sont plus à même d'être exclus du marché des PCE. De même, les individus vivant dans le cœur de la ville de Montpellier ont une propension plus élevée à se mettre volontairement à l'écart du marché. Nous distinguons alors, à l'aide de

---

14. Cette désincitation vertueuse ne tient pas compte du fait que ces individus participeront moins à l'activité économique des centres-villes. Cette économie pourra alors pâtir de ce manque à gagner.

15. cf. Chapitre 3.

ces phénomènes, un effet de la localisation des activités et du domicile sur la mise à l'écart volontaire et sur l'exclusion du marché des PCE. Une continuité sur le développement des transports alternatifs dans la ville favorisera cette mise à l'écart volontaire des individus et réduira le nombre de véhicules-kilomètres parcourus dans les villes.

Il apparaît cependant que la localisation des activités et des lieux de vie engendre un certain désavantage pour les individus qui ont moins de "possibilités modales" pour exercer leurs déplacements. C'est en ce sens, premièrement, qu'un PCE basé sur le nombre de véhicules-kilomètres parcouru n'est pas la meilleure option. Deuxièmement, le développement des réseaux de transport alternatif, mais aussi l'encouragement au covoiturage d'entreprise et au covoiturage urbain ont un rôle incitatif à jouer sur ce déséquilibre. Enfin, nous pourrions envisager une solution hybride au versement transport des entreprises afin de soutenir ce déséquilibre territorial des lieux de profession.

Ressentir une certaine responsabilité dans les nuisances collectives entraîne une propension à être exclu du marché plus importante. Cette exclusion n'est pas le fruit d'une iniquité mais plutôt d'un obstacle psychologique entraînant les individus à vouloir moins se déplacer en mode "lourd". De même, ressentir une perte de temps dans les déplacements et/ou un danger provenant des comportements de déplacement des autres individus augmente les chances qu'un individu se mette à l'écart du marché des PCE. Nous proposons alors qu'une campagne de communication au sujet des effets néfastes des déplacements individuels en mode "lourd" soit mise en place afin de sensibiliser les individus sur l'usage des modes "lourds". À titre d'exemple, il a été établi que la transmission de l'information aux individus au sujet des émissions de CO<sub>2</sub>, ainsi que l'usage de normes injonctives ou descriptives, procurent des effets bénéfiques sur la mobilité dans le cadre de longs trajets (Raux et al. (2015) [82]).

L'âge augmente, dans des proportions moindres, les chances de mise à l'écart volontaire des individus du marché des PCE. En partie lié au revenu, cet effet peut aussi s'expliquer par un coût supposé psychologique d'accès au marché qui augmente avec l'âge. Il faut raison garder sur ce phénomène, notamment en raison du faible pouvoir discriminant de l'âge. Nous proposons tout de même qu'une cellule d'accompagnement à l'accès au système de PCE et à la pénétration dans le marché soit mise en place afin de rééquilibrer un potentiel écart intergénérationnel.

Finalement, les implications en termes de politiques publiques relatives à la mobilité urbaine de l'effet du sexe sur les prédispositions à appartenir à tel ou tel groupe d'individu dépassent le champ de la mobilité urbaine. Bien que l'effet du sexe soit faiblement discriminant, cet effet renvoie incontestablement à une problématique bien plus globale des inégalités sociales entre les femmes et les hommes.

## Conclusion

Nous avons étudié dans ce chapitre l'impact d'un marché hypothétique des PCE sur les choix de déplacement. Dans ce marché, la demande de PCE ne peut être pas satisfaite dans son intégralité si l'allocation initiale de PCE est rationnelle. Nous avons pu évaluer les dispositions marginales à payer et à recevoir des PCE afin d'élaborer la courbe d'offre et de demande de PCE dans ce marché hypothétique.

Les résultats sont sans appel pour l'aire urbaine de Montpellier : l'échange de PCE permettrait une réduction du trafic en mode "lourd" d'environ 15%. L'étude dirigée par l'ADEME <sup>16</sup> montre que les péages urbains ont un impact plus important sur le trafic, mais avec un prix du péage majoritairement plus élevé dans chacune des villes. Cela dit, nous pensons que notre étude sous-estime l'impact des PCE sur le trafic routier. En effet, nous n'avons pas capté le nombre d'usagers des modes "lourds" qui préféreront plutôt vendre des PCE que d'en consommer, en raison du caractère incitatif de l'instrument.

Au-delà de la volonté des individus à se déplacer en mode "lourd", le marché des PCE crée lui-même une demande de mobilité alternative pour des déplacements contraints dans l'espace et dans le temps. Il y a aussi une grande incitation au report temporel et de destination des déplacements non-contraints, au détriment d'un nouvel usage partagé du mode "lourd". La réussite économique et sociale des PCE est alors soumise à la mise en place de mesures favorisant l'usage des transports alternatifs. Cette réussite est aussi soumise au développement de mesures améliorant l'attractivité de la ville. L'objectif serait de mettre en place un équilibre adéquat entre la promotion des activités économiques de la ville et le prélèvement des PCE.

---

16. [www.ademe.fr/sites/default/files/assets/documents/etat-art-sur-peages-urbains-2014.pdf](http://www.ademe.fr/sites/default/files/assets/documents/etat-art-sur-peages-urbains-2014.pdf)

Deux analyses factorielles discriminantes ont permis de mettre en exergue les différents effets individuels qui augmentent les chances de se mettre à l'écart, d'être exclu ou d'être intégré au marché des PCE. Le revenu des individus joue un rôle pivot dans la séparation des groupes. Il engendre un phénomène vertueux de désincitation à entrer dans le marché pour les individus qui détiennent de hauts revenus. Il donne cependant naissance, dans une seconde phase, à un problème d'iniquité : les revenus les plus modestes auront plus de chances d'être exclus du marché. On retrouve alors les mêmes questions d'équité que celles liées aux péages urbains. Les composantes gravitant autour du revenu, à savoir la CSP, l'âge, le sexe et la localisation, sont impliquées dans la définition des caractères discriminants les groupes d'individus. Un modèle logit séquentiel, ou *nested dichotomies*, pourrait rendre compte des mêmes événements en introduisant une certaine dynamique à la probabilité d'appartenance à un groupe défini.

Notre étude, l'une des premières sur ce sujet en France, est nécessairement critiquable en raison de son échantillon non-représentatif. Nous avons essayé d'outrepasser cette difficulté en proposant une pondération basée sur des croisements sexe, âge et catégorie socioprofessionnelle. Ces trois variables peuvent expliquer les choix de déplacement mais ces déterminants, bien qu'étant majeurs, ne guident pas seuls ces choix. Les paramètres individuels symboliques et affectifs n'ont par exemple pas été captés dans notre étude.

La seconde critique qui peut être faite à cette étude est le fait qu'il manque une certaine interaction entre les individus dans ce marché des PCE. De futurs travaux de recherche pourront s'appuyer sur des travaux expérimentaux afin de rendre compte de ces interactions (e.g. Dogterom et al. (2016) [33]; Brands et al. (2020) [10]), pour ensuite analyser plus finement les effets hypothétiques des PCE sur les piliers de la mobilité urbaine. Les choix de déplacements pourront être ensuite modélisés en faisant recours à des techniques modernes, comme les arbres de décision.

Cette approche permettrait de présenter une grille de lecture clarifiée des éléments majeurs guidant les choix de déplacement. Il serait intéressant de déterminer des seuils de basculement d'un choix de déplacement à un autre en fonction des variables significatives. Notre approche est vouée à évoluer, à se préciser et à s'améliorer. Elle constitue pour l'instant une nouvelle approche de l'étude des effets des PCE sur les choix de déplacement, ainsi que de la définition des politiques publiques sous-jacentes à mettre en place.

Nous savons aussi que la réussite sociale et économique d'un instrument de politique publique relatif aux problématiques de mobilité urbaine est conditionnée par l'acceptabilité sociale de l'instrument. Cette acceptabilité est un indicateur de la variation hypothétique du bien-être social mais aussi de celui entre les groupes socio-économiques d'individus. Le chapitre suivant sera consacré à mesurer l'acceptabilité des PCE dans notre échantillon et à évaluer les déterminants de cette acceptabilité.

## Chapitre 3

# Analyse économétrique de l'acceptabilité des permis à circuler échangeables dans la ville de Montpellier (France)

## Résumé

Ce chapitre est voué à mesurer l'acceptabilité des PCE dans l'aire urbaine de Montpellier et à déterminer les facteurs individuels qui influencent cette acceptabilité. La littérature scientifique rend compte d'une meilleure acceptabilité des PCE par rapport aux autres instruments de gestion de la mobilité urbaine qui restreignent les déplacements des individus. Nous montrons d'abord que l'acceptabilité d'un instrument est d'autant plus forte que celle-ci n'impacte pas directement l'individu et, dans notre cas, les usagers des modes "lourds". Les mesures "pollueur-payeur" et de restriction de la mobilité sont les mesures les moins acceptées. La mise en place hypothétique d'un péage urbain est largement rejetée. Bien que les PCE restreignent eux-aussi l'usage des modes "lourds", la mesure de l'acceptabilité de cet instrument montre qu'ils offrent des perspectives prometteuses à la mobilité urbaine.

Une analyse économétrique rend compte des principaux déterminants influençant l'acceptabilité des PCE. Cette acceptabilité est bien plus influencée par les croyances relatives aux effets potentiels des PCE que par les caractéristiques socio-démographiques et la perception de chaque individu des événements quotidiens de mobilité. Il s'agit plus particulièrement des croyances concernant les effets qui affectent directement le bien-être individuel ou qui s'appliquent sur les externalités négatives pour lesquelles tout le monde s'accorde à dire qu'il est nécessaire d'agir. Une révision de ces croyances, même à la marge, entraîne une forte variation de la probabilité qu'un individu soit favorable à la mise en place des PCE. Il est alors nécessaire de mener des campagnes transparentes de communication relatives à ces croyances.

**Mots-clés** : mobilité urbaine durable, permis à circuler échangeables, acceptabilité, logit binomial, perceptions, croyances.

## Introduction

L'acceptabilité, selon l'Académie Française, est le "*caractère de ce qui est acceptable*". Ce caractère, pour un instrument de politique publique relatif aux problématiques de la mobilité urbaine, renvoie alors aux éléments individuels conditionnant l'accueil favorable de la mesure par les citoyens. Du point de vue des autorités publiques, il apparaît important de mesurer cette acceptabilité. Celle-ci est un indicateur de la variation du bien-être social suite lors de la mise en place de la mesure, par rapport à une situation de *statu quo*. La mesure de cette acceptabilité révèle alors les déterminants économiques et psychologiques qui expliquent les variations de bien-être entre les individus. Une réflexion doit être ensuite menée sur la potentielle mise en place de mesures ciblées vouées à améliorer l'acceptabilité de l'instrument.

La littérature scientifique fait état d'une acceptabilité des permis échangeables meilleure que celle de la taxation (e.g. Nordhaus & Danish (2003) [73]; Keppens & Vereeck (2003) [56]). De même, plusieurs études mesurant l'acceptabilité de quotas individuels d'émissions de carbone relatent une bonne acceptabilité des permis (e.g. Bristow et al. (2010) [12]; Wallace et al. (2010) [104]; Andersson et al. (2011) [3]; Harwatt et al. (2011) [48]). Sur les permis à la mobilité, le constat est le même : les permis sont une mesure jugée à la fois plus acceptable, plus incitative et plus positive que les mesures classiques telles qu'une taxe carbone ou une hausse du prix de l'essence (e.g. Verhoef et al. (1996) [98]; Mayeres & Proost (2002) [61]; Kockelman & Kalmanje (2005) [58]; Wadud et al. (2008) [103]; Dogterom et al (2018) [32]).

Une des dernières études parues a permis de comparer l'acceptabilité des PCE dans deux régions dont la culture, la perception des externalités négatives et le système institutionnel sont différents : Pékin et les Pays-Bas (Dogterom et al. (2018) [32]). Les résultats mettent en lumière une acceptabilité des PCE meilleure à Pékin

qu'aux Pays-Bas. Cela s'explique notamment par une perception plus marquée des phénomènes de congestion et de pollution dans la ville chinoise. La même étude montre que l'acceptabilité des PCE est meilleure que celle d'une taxe routière urbaine kilométrique pour les Pays-Bas. Elle est également meilleure que celle des restrictions actuelles sur l'immatriculation des véhicules pour Pékin. Concernant les déterminants de cette acceptabilité, celle-ci est d'autant plus forte que l'individu dispose d'un revenu disponible du ménage élevé dans les deux régions. Ce constat est le même pour un individu vivant dans un ménage de plus de deux personnes à Pékin. Être un individu de plus de 45 ans aux Pays-Bas et posséder au moins une voiture à Pékin réduit l'acceptabilité des PCE.

Il apparaît toutefois dans cette analyse que l'acceptabilité des permis s'explique essentiellement par la perception générale de l'instrument et de ses effets. Aux Pays-Bas, l'acceptabilité des PCE augmente lorsque l'individu (a) pense que les PCE auront un effet sur la diminution de la congestion automobile, (b) signale que les PCE auront un effet général bénéfique sur lui-même, (c) juge que les PCE sont une mesure plus juste et (d) plus efficace qu'un péage kilométrique. L'acceptabilité des PCE diminue à mesure que l'individu juge les PCE comme étant injustes (e). À Pékin, les effets des paramètres socio-démographiques sur l'acceptabilité des PCE sont atténués par l'effet positif sur l'acceptabilité des événements (a) et (d), et l'effet négatif de l'événement (e).

À la lumière de ces enseignements, étudions l'acceptabilité des PCE dans l'aire urbaine de Montpellier. L'acceptabilité des PCE a été mesurée à l'aide d'une question de type référendum. Les individus étaient invités à se prononcer favorablement ou défavorablement à la mise en place hypothétique des PCE dans la ville de Montpellier. La structure de l'enquête en annexe A que nous avons réalisée prévoyait, avant la ludification des PCE présentée dans le deuxième chapitre de cette thèse, de recueillir les perceptions des usagers sur quelques événements de mobilité pouvant

se dérouler avant, pendant et après des déplacements. Après la phase de ludification des PCE, l'enquête s'est poursuivie par un relevé des croyances sur les effets potentiels de cet instrument.

Nous avons évoqué, dans le chapitre précédent, le fait que les PCE sont méconnus de la population. Dans la première section de ce chapitre, nous proposons alors d'exposer, à l'aide de notre échantillon, les principales tendances de l'acceptabilité des instruments "classiques" de politique publique relatifs à la mobilité urbaine et connus de la population. Nous révélons, dans la deuxième section de ce chapitre, les croyances des individus sur les effets des PCE. Nous comparons ensuite l'acceptabilité des PCE à celle du péage urbain à l'aide d'un référendum hypothétique. L'ensemble des éléments obtenus dans cette section nous permettent, dans la troisième section de ce chapitre, de mettre en lumière les déterminants de l'acceptabilité des PCE à l'aide de méthodes économétriques. Nous quantifions l'effet de chacun des déterminants sur la probabilité que l'individu soit favorable à la mise en place des PCE. Nous proposons de définir, dans la dernière section de ce chapitre, ce qu'impliquent nos résultats dans la définition des politiques publiques.

# 1 Tendances principales sur l'acceptabilité des instruments de politique publique de mobilité urbaine

L'enquête révèle que plus de 95% des répondants n'ont jamais entendu parler des PCE. Au-delà d'une certaine prudence qui s'imposera lors de l'interprétation des résultats sur l'acceptabilité des PCE, nous avons décidé en amont d'étudier les tendances sur l'acceptabilité d'autres instruments de politique publique relatifs à la mobilité urbaine. Plus connus des citoyens, ces instruments permettent de contextualiser les résultats concernant l'acceptabilité des PCE.

Avant la ludification des PCE, il a été demandé aux individus d'attribuer une note entre 0 et 5 sur l'acceptabilité de plusieurs instruments. Les possibilités de réponses se situaient alors sur une échelle paire. De fait, chaque individu devait se positionner ailleurs que dans une situation de neutralité. Aucune possibilité n'était donnée à l'individu de se situer exactement au milieu du curseur. En revanche, la non-réponse était permise. Cette note était guidée par une seconde échelle, où une note de 0/5 correspondait au fait que l'individu n'était pas du tout favorable à la mise en place de l'instrument (modalité "Pas du tout favorable"). Une note de 5/5 correspondait au fait que l'individu était tout à fait favorable à la mise en place de l'instrument (modalité "Tout à fait favorable").

L'objectif de ces instruments est de combattre les nuisances causées par les déplacements de chacun. Nous allons étudier l'acceptabilité de ces instruments en les regroupant en trois catégories : les mesures cherchant à diminuer l'usage des véhicules polluants par la sensibilisation, la restriction et l'incitation ; les mesures "pollueur-payeur" et les mesures alternatives favorisant l'usage des transports collectifs. La loi

d'orientation des mobilités de 2019, ou LOM, prévoit d'ailleurs l'implémentation de certaines de ces mesures<sup>1</sup>.

Dans cette étude descriptive, nous n'excluons pas les réponses des individus écartés du jeu sérieux à cause de l'incohérence de leur disposition marginale à payer des PCE<sup>2</sup>. La raison est qu'il ne s'agit pas encore d'étudier l'acceptabilité des PCE.

Nous avons séparé notre échantillon d'individus en deux groupes : un groupe d'individus possédant au moins un mode "lourd" et un groupe d'individus ne possédant pas de mode "lourd". Les graphiques de répartition des notes en fonction de l'instrument et de la typologie des individus sont consignés en annexe K.

## **1.1 Acceptabilité des mesures de diminution de l'usage des véhicules polluants par la restriction, l'incitation et la sensibilisation**

Tous les répondants ont été conviés à se prononcer sur l'acceptabilité de quelques mesures cherchant à diminuer l'usage des véhicules polluants. Les leviers d'actions sont la restriction, l'incitation et la sensibilisation. Ces mesures sont les suivantes : l'interdiction de circuler aux véhicules les plus polluants, l'aide à l'achat de véhicules propres et l'information  $CO_2$ . D'un point de vue global, ces mesures sont d'autant plus appréciées que les individus ne possèdent pas de mode "lourd", puisqu'ils ne sont pas touchés par les mesures.

L'aide à l'achat de véhicules propres est la mesure considérée comme étant la plus acceptable parmi les trois mesures proposées : la proportion de "bonnes" notes est supérieure à celle des deux autres instruments. Cette mesure figure dans la LOM au titre de la prime à la conversion. Toutefois, nous nous interrogeons sur le fait que

---

1. <https://www.legifrance.gouv.fr/eli/loi/2019/12/24/2019-1428/jo/texte>

2. cf. Chapitre 2.

l'individu puisse assimiler cet instrument à une sorte de *statu quo*, où les individus de type "free-rider" peuvent poursuivre leurs mobilités non-soutenables sans être pénalisés.

L'interdiction de circuler pour les véhicules les plus polluants fait moins l'unanimité, surtout pour les individus possédant un mode "lourd". Cette mesure, aussi partie prenante de la LOM, empêche l'accès aux véhicules les plus polluants à une zone à circulation restreinte (ZCR), aussi connue sous le nom de zone à faible émission (ZFE). La vignette Crit'Air, catégorisant les véhicules selon leurs émissions de polluants atmosphériques, est utilisée pour caractériser les véhicules autorisés à pénétrer dans la ZFE. Bien que cet instrument soit proposé pour améliorer la qualité de l'air, un problème d'iniquité d'accès à la ville se pose. Les restrictions d'usage de ces véhicules, la plupart anciens, sont généralement imposées aux individus ayant des revenus relativement plus faibles et vivant dans des territoires périurbains moins bien desservis par un réseau de transport alternatif. L'usage du mode "lourd" est souvent nécessaire pour pouvoir effectuer des migrations pendulaires vers la ville. Un tel système oblige alors cette frange d'individus à recourir à des trajets multimodaux.

Enfin, la sensibilisation par l'information  $CO_2$  semble être une mesure assez bien reçue par les individus. Conformément au Code des Transports, cette information doit être obligatoirement délivrée à l'utilisateur depuis le 1<sup>er</sup> octobre 2013<sup>3</sup>. Suite à la loi relative à la transition énergétique pour la croissance verte<sup>4</sup>, depuis le 1<sup>er</sup> juin 2017, l'information délivrée doit concerner l'ensemble des gaz à effet de serre. Celle-ci procure un impact cognitif en vue de modifier les comportements de déplacement. Elle est pourtant peu utilisée ou bien souvent cachée sous une masse d'informations. Par rapport aux mesures restrictives, cette mesure a un impact moindre sur les choix de déplacement des individus. Nous pouvons nous questionner sur l'efficacité de cette

---

3. <https://www.legifrance.gouv.fr/jorf/id/JORFTEXT000025706344>

4. <https://www.legifrance.gouv.fr/jorf/id/JORFTEXT000034502581>

mesure à l'échelle du consommateur dans les zones urbaines, pour des déplacements réguliers. L'effet bénéfique de cette mesure, couplée à des normes injonctives, a été démontré pour des longs trajets (Raux et al. (2015) [82]).

## 1.2 Acceptabilité des mesures "pollueur-payeur"

Les mesures "pollueur-payeur" proposées dans l'enquête dans l'optique de réduire les nuisances collectives sont les suivantes : la hausse des prix du carburant, la hausse des prix du stationnement et le péage d'accès à la ville. Les résultats sont sans appel. Une large majorité des individus possédant un mode "lourd" n'est pas du tout favorable à la mise en place de ces instruments (61% de ces individus ont attribué une note de 0/5). Tout individu qui utilisera ces modes aura une composante qui impactera négativement son utilité. Nous pouvons assimiler cela à une augmentation du coût généralisé de déplacement.

Bien que les proportions soient plus faibles pour les individus ne possédant pas un mode "lourd", ceux-ci ne sont pas non plus favorables à la mise en place de ces instruments. Ces mesures ne les impactant pas directement, plusieurs explications peuvent être formulées. D'une part, ces individus craignent peut-être une augmentation des contributions fiscales permettant de mettre en place l'instrument et de l'utiliser. D'autre part, les individus peuvent signaler qu'en faisant recours à des services de transport alternatifs concernés par ces mesures, ces services répercuteront l'effet financier de ces mesures sur le prix du déplacement. Ensuite, ce résultat peut être le signal d'une perception négative de ces instruments quel que soit le contexte. Enfin, l'individu peut soutenir les membres de son entourage et des groupes sociaux dans lesquels il se reconnaît et qui sont directement concernés par ces mesures.

### **1.3 Acceptabilité des mesures alternatives favorisant l'usage des transports collectifs**

Nous avons proposé aux individus de s'exprimer sur trois mesures concernant les transports collectifs : l'amélioration du réseau urbain de transports collectifs, l'amélioration des différentes sources d'information sur les transports collectifs et la gratuité de ces transports financée par une augmentation des impôts. L'amélioration du réseau urbain serait très bien accueillie, tout comme une amélioration des différentes sources d'information du transport collectif. Ce phénomène est d'autant plus important que les individus ne possèdent aucun mode "lourd". La majorité des individus ont attribué une note de 4/5 ou de 5/5 à l'amélioration du réseau urbain de transport collectif et de ses différentes sources d'information. Il existe alors un réel besoin d'amélioration des composantes du transport collectif afin de combattre les nuisances collectives provoquées par la mobilité. Notons tout de même que ces politiques n'affectent pas non plus directement les déplacements en mode "lourd" des individus.

Enfin, la gratuité des transports collectifs est un enjeu fort rythmant les débats publics lors des différentes campagnes électorales. L'élément important à soulever dans notre enquête est que nous supposons le financement de cette gratuité par une augmentation des impôts. Le constat est alors mitigé. Si plus de 30% des individus sont très favorables à cette gratuité, cette mesure est loin de faire l'unanimité. Plus de 15% des individus possédant au moins un mode "lourd" ne sont effectivement pas du tout favorables à sa mise en place.

## 2 Approche descriptive de l'acceptabilité des PCE

### 2.1 Congestion, pollution, droit à la mobilité et effets-prix indirects : l'impact de l'usage des PCE selon les individus

Les perceptions des individus sur l'impact d'un instrument de politique publique, même si celles-ci peuvent être contredites par la littérature scientifique, détermineraient l'acceptabilité des PCE. Nous avons demandé aux individus si, selon eux, les PCE permettraient une baisse de la congestion, de la pollution atmosphérique, du prix du carburant et du stationnement. Il leur a aussi été demandé si les PCE remettraient en cause leur droit fondamental à la mobilité. Tous les individus ont été conviés à répondre à ces questions, à l'exception des 27 individus écartés du jeu sérieux par l'incohérence de leur DmP aux deux étapes de mesure<sup>5</sup> puisque les questions traitent des PCE.

Cinq questions ont été soumises aux 485 individus. Ils étaient invités à attribuer une note entre 0 et 5 quant à l'impact des PCE sur l'effet proposé. Les possibilités de réponses ne permettaient pas, avec cette échelle paire, le positionnement en situation de neutralité. La note était guidée par d'une seconde échelle. Il était signalé qu'une note nulle correspondait à un total désaccord avec la question posée (modalité "Pas du tout d'accord"). La note maximale correspondait alors à un accord complet avec la question posée (modalité "Tout à fait d'accord"). Dans la mesure où il pouvait être difficile d'apporter une réponse à ces questions, la non-réponse était permise. La figure 13 reporte les résultats à ces questions.

---

5. cf. Chapitre 2.

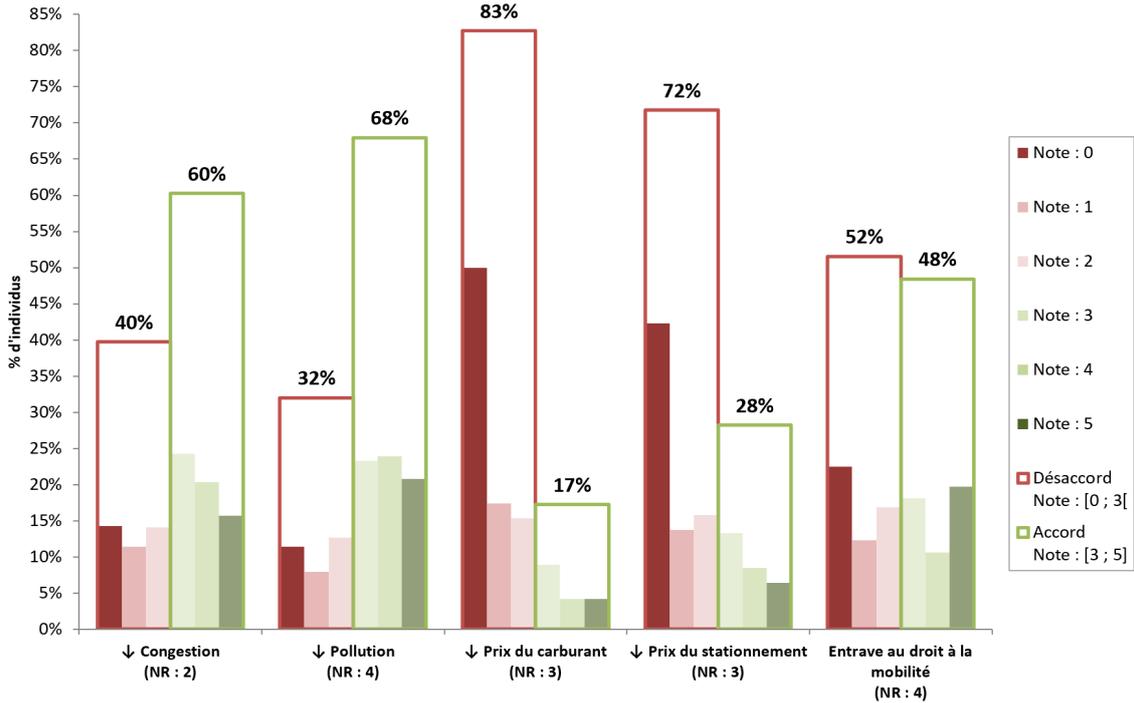


Figure 13 – Croyance des individus relatives aux différents impacts potentiels des PCE (N = 485 – NR : nombre de non-réponses)

0 : Pas du tout - 5 : Tout à fait

Deux premiers résultats sont indiscutables : selon les répondants, les PCE ne permettront pas une diminution du prix du stationnement. Ils permettront encore moins une diminution du prix du carburant. La réaction sur le prix du carburant est inscrite dans un contexte de tension sociale. Cette réaction est en adéquation avec l'effet qui devrait se réaliser puisque le prix du carburant se justifie par des raisons macroéconomiques et non pas par l'évolution des comportements de déplacement du particulier. En revanche, l'effet sur le prix du stationnement sur l'espace public peut être discuté puisque le prix est fixé à une échelle communale. Nous aurions pu envisager un permis à stationner (Verhoef et al. (1997) [99]) modulable et combiné au PCE. Toutefois, ce type de permis engendrerait une augmentation du nombre de véhicules-kilomètres afin de trouver une place de stationnement en dehors du périmètre géographique d'application des PCE.

Il est aussi intéressant de constater que les individus sont davantage convaincus d'un éventuel effet bénéfique des PCE sur la diminution de la pollution (68% des individus ont attribué une note de 3/5 à 5/5 à cette question) que sur la baisse de la congestion (60%). Nous pouvons l'expliquer de la manière suivante. La pollution est un phénomène diffus et moins observable. La congestion, quant à elle, est une problématique locale et observable à l'échelle de l'individu. Les phénomènes de congestion se constatent donc plus aisément que la pollution atmosphérique à l'échelle du citoyen<sup>6</sup>. Alors, ce résultat peut être une anticipation du biais de confirmation d'hypothèse.

Le dernier effet pour lequel les individus se sont exprimés est celui de la restriction de la liberté de mobilité. En effet, tout instrument de politique publique attaché à la mobilité cherche à rationner et rationaliser certains usages de la mobilité, ayant comme impact le fait de restreindre certains déplacements. Les deux notes les plus attribuées sont 0/5 et 5/5, soit les deux notes extrêmes. Bien que la majorité des individus déclarent que les PCE ne nuiront pas, ou nuiront peu, à leur droit à la mobilité (52% des individus ont attribué une note inférieure à 3/5), il n'est pas aisé de donner une tendance générale sur cette perception.

Il apparaît tout de même qu'une part non-négligeable d'individus ne possédant pas de mode "lourd" déclare que les PCE vont entraver leur droit à la mobilité. En effet, il y a plus d'individus qui ne possèdent pas de mode "lourd" que d'individus qui stipulent que les PCE ne nuiront pas à leur liberté de mobilité. Une analyse de discours, notamment au sujet de la possible hausse de la fréquentation des transports collectifs, aurait peut-être permis de trouver une explication à ce phénomène. Nous aurions peut-être distingué deux effets : un sentiment de promiscuité accru et un

---

6. À l'heure actuelle, aucune restriction de mobilité individuelle pour des problématiques de pollution n'a été mise en place dans la ville de Montpellier.

effet bénéfique dû à la potentielle réponse des AOM à améliorer les dessertes et les fréquences de passages.

## 2.2 PCE vs. Péage urbain : une réelle opposition ? Acceptabilité comparée des deux instruments

Grâce aux PCE, nous avons proposé de développer une analyse centrée sur une alternative au péage urbain et à la taxation des consommables. Pour la mobilité urbaine, les PCE s'opposent au péage urbain. Cette opposition a été formalisée par De Palma et al. (2018) [28] qui démontrent l'équivalence des deux instruments en termes de bien-être social. Cette démonstration s'effectue sous certaines conditions, notamment celle de l'efficacité de l'ajustement temporel à l'incertitude de la demande. Ils concluent par une potentielle meilleure acceptabilité des PCE. Celle-ci reste incertaine dans la mesure où les PCE sont soumis à des variations de prix qui peuvent être conséquentes et où la distribution des PCE peut être complexe. Nous l'avons dit, l'évolution favorable de l'usage des nouvelles technologies peut remédier à ces difficultés, ou du moins les atténuer.

Afin de mesurer l'acceptabilité des PCE par rapport à la mise en place d'un péage urbain, nous avons suggéré deux questions à la manière d'un référendum. Notons que l'individu avait la possibilité de ne pas se prononcer. La première question était la suivante : *"S'il devait y avoir un référendum pour la question suivante : "Seriez-vous pour ou contre la mise en place des permis à circuler échangeables dans la ville ?", répondriez-vous... "*. Trois modalités de réponse étaient proposées : *"Pour"*, *"Contre"* et *"Ne se prononce pas"*. La seconde question était similaire à la première, mais relative au péage urbain.

Nous excluons les individus écartés du jeu sérieux par l'illogisme de leur DmP aux deux étapes de mesure. 485 individus étaient invités à prendre part à cette mesure de l'acceptabilité. Les résultats figurent dans le tableau 13.

<b>Question</b>	<b><i>"Seriez-vous pour ou contre la mise en place des PCE dans la ville ?"</i></b>
Individus qui se sont prononcés	369 (76% des individus de l'échantillon)
Individus qui ne se sont pas prononcés	116 (24% des répondants)
Pour	225 (61% des individus qui se sont prononcés)
Contre	144 (39% des individus qui se sont prononcés)
<b>Question</b>	<b><i>"Seriez-vous pour ou contre la mise en place d'un péage d'accès à la ville ?"</i></b>
Individus qui se sont prononcés	436 (90% des individus de l'échantillon)
Individus qui ne se sont pas prononcés	49 (10% des individus de l'échantillon)
Pour	74 (17% des individus qui se sont prononcés)
Contre	362 (83% des individus qui se sont prononcés)

Tableau 13 – Résultats des référendums sur la mise en place hypothétique d'un système de PCE et d'un péage urbain dans la ville de Montpellier (N=485)

Ces éléments mettent en exergue deux résultats principaux. Le premier est la volonté franche de s'exprimer sur le péage urbain plutôt que sur les PCE. Cet événement a certainement pour but de manifester un mécontentement à l'égard de la mise en place hypothétique d'un péage urbain dans la ville de Montpellier. Le

prélèvement monétaire est alors jugé comme étant une mesure peu acceptable socialement dans l'échantillon (76% des individus de l'échantillon se prononcent contre la mise en place de la mesure), d'autant plus qu'aucune mesure de compensation complémentaire n'était proposée dans cette enquête.

Nous retrouvons également ce résultat dans une étude effectuée dans l'aire métropolitaine de Lyon (Souche - Le Corvec et al. (2016) [91]), où 67,5% des individus interrogés ne seraient pas favorables à la mise en place d'un péage urbain si un référendum leur était proposé. Dans une étude effectuée quelques années plus tôt dans la même métropole, il a cependant été montré qu'il existe plusieurs degrés de rejet (Souche et al. (2012) [92]). En effet, la mise en place d'un péage urbain aux heures de pointe est jugée comme étant la mesure la plus injuste parmi l'ensemble des mesures proposées dans l'étude. En revanche, la mise en place d'un péage urbain pour internaliser les externalités de pollution atmosphérique est jugé comme étant la mesure la moins injuste. Ceci reste valable même en intégrant une situation de laisser-faire.

Le second résultat de notre enquête montre une meilleure acceptabilité relative des PCE par rapport au péage urbain. 61% des individus qui se sont exprimés sont favorables à la mise en place, alors que cette proportion s'élève à 17% pour le péage urbain. Il faut tout de même utiliser ce résultat avec précaution dans la mesure où la plupart des individus venaient seulement de prendre connaissance de l'existence théorique des PCE par notre enquête.

Par ailleurs, essayons d'expliquer le non-prononcement à ces questions. D'une part, cette non-réponse peut être la volonté de ne pas déclarer sa préférence par crainte de constater à l'avenir l'implémentation de l'un de ces deux systèmes dans la ville de Montpellier. D'autre part, les individus peuvent manquer d'information pour se prononcer. Enfin, ce choix peut traduire un mécontentement vis-à-vis des

options considérées. Cet argument peut être illustré par certaines critiques au sujet des mesures de restriction de la mobilité. En effet, lors de la publication de l'enquête sur le réseau social Facebook, certains commentaires déposés dans le fil d'actualité de la publication furent ardents.

Dans le but d'affiner la préférence entre les PCE et le péage urbain, nous avons questionné les individus ayant choisi la même modalité aux deux premières questions. Une question subsidiaire leur a été ainsi posée : *"S'il devait y avoir un référendum pour la question suivante : "Quel instrument de politique publique préféreriez-vous que votre ville mette en place ?", répondriez-vous... "*. L'objectif était de déterminer leur préférence absolue entre les deux mesures. Le non-prononcement était permis. Le tableau 14 référence les résultats.

<b>Choix PCE - Choix péage</b>	<b>Préférence PCE</b>	<b>Préférence péage</b>	<b>NSPP</b>
Contre - Contre	23	6	100
Contre - Pour	0	11	2
Contre - NSPP	0	1	1
Pour - Contre	133	1	8
Pour - Pour	33	19	3
Pour - NSPP	26	0	2
NSPP - Contre	50	0	41
NSPP - Pour	0	5	1
NSPP - NSPP	1	1	17
<b>TOTAL</b>	<b>266 (86%<sup>a</sup>)</b>	<b>44 (14%<sup>a</sup>)</b>	<b>175</b>

Tableau 14 – Préférence des individus entre la mise en place d'un système de PCE et d'un péage urbain (N=485)

NSPP : ne se prononce pas - %<sup>a</sup> : % des individus qui se sont prononcés

Une discussion pourrait être engagée sur le fait d'avoir choisi uniquement ces deux instruments. Cela pouvait s'apparenter, pour certains répondants, à un choix entre la peste et le choléra. Néanmoins, puisqu'il existe cette certaine opposition entre PCE et péage urbain, deux instruments d'envergures analogues, ce choix nous a semblé cohérent.

Le résultat principal est le suivant : bien que 175 individus (soit 36% des répondants) n'expriment aucune de leur préférence, 86% des individus qui se sont exprimés sont plutôt en faveur des PCE. Parmi les 116 individus qui ne se sont pas exprimés au référendum initial sur les PCE (cf. Tableau 13), 51 individus sont plutôt en faveur des PCE. Il s'agit des 50 individus qui ne sont pas favorables à la mise en place d'un péage urbain et d'un individu qui ne s'est pas prononcé à propos du péage urbain. Enfin, les individus défavorables à la mise en place des deux instruments (modalité "Contre - Contre" du tableau 14) préfèrent la mise en place des PCE relativement à la mise en place d'un péage urbain. Il en est de même pour les individus favorables à la mise en place des deux instruments (modalité "Pour - Pour" du tableau 14). Cherchons à aller plus loin en essayant de trouver économétriquement les déterminants individuels qui expliquent l'acceptabilité des PCE.

### 3 Analyse économétrique de l'acceptabilité des PCE

Notre mesure de l'acceptabilité des PCE a été effectuée par l'intermédiaire d'une question de type référendum. Nous avons demandé aux individus s'ils étaient pour ou contre une mise en place hypothétique des PCE dans la ville. Trois modalités de réponses étaient proposées : "*Pour*", "*Contre*" et "*Ne se prononce pas*". Plusieurs résultats descriptifs ont été proposés à la sous-section précédente. Nous souhaitons à présent obtenir les éléments économiques pouvant guider les suffrages exprimés.

Dogterom et al. (2018) [32] ont mesuré l'acceptabilité des PCE à l'aide d'une échelle de Likert, puis régressé à l'aide de la méthode des moindres carrés ordinaires la variable ainsi construite avec deux groupes de variables exogènes. Le premier groupe de variables explicatives portait sur les caractéristiques socio-démographiques des individus. Le second groupe de variables caractérisait la perception des individus à l'égard des effets de la mesure. Il était question de l'équité et l'efficacité de la mesure, d'un point de vue global puis relatif à un autre instrument. Il était également question de la remise en cause de la liberté de déplacement, de l'attachement au véhicule particulier, de la congestion automobile, des problèmes environnementaux liés à l'usage de la voiture dans la région concernée et de l'effet général que procurerait un système de PCE sur le bien-être individuel. Les principaux résultats de cet article ont été énoncés en introduction. Cela dit, rappelons le résultat principal : l'acceptabilité des PCE est bien plus influencée par les perceptions des individus concernant les effets des PCE sur la mobilité urbaine que par les paramètres socio-démographiques.

Qu'en est-il dans notre échantillon ? Nous proposons de modéliser les déterminants de l'acceptabilité des PCE à l'aide de plusieurs modèles logit binomiaux.

Notre variable dépendante est la réponse à la question suivante : "*Seriez-vous pour ou contre la mise en place des PCE dans la ville ?*". En utilisant les 369 suffrages exprimés<sup>7</sup>, cette variable a deux modalités : "*Pour*" et "*Contre*". Afin de faciliter le traitement économétrique et informatique, nous avons transformé cette variable en une variable indicatrice. Elle prendra la valeur 0 si l'individu a répondu "*Contre*" et 1 si l'individu a répondu "*Pour*". À l'aide d'un logiciel économétrique, nous avons modélisé la probabilité que l'individu soit favorable à la mise en place des PCE.

Le recours à ce type de modèle est principalement justifié par la dichotomie de notre variable de réponse issue d'un référendum. Par ailleurs, notre variable de réponse est de nature qualitative et n'est pas continue. Par conséquent, la méthode des moindres carrés n'est pas adaptée à ce type de modélisation.

### 3.1 Sélection des variables explicatives

Trois groupes de variables peuvent, à notre sens, déterminer l'acceptabilité d'un instrument de politique publique de mobilité urbaine. Le premier groupe de variables est répandu dans les études économétriques en économie des transports. Ce groupe englobe l'ensemble des caractéristiques socio-démographiques des individus. La littérature suggère ensuite l'introduction d'un deuxième groupe de variables pouvant influencer l'acceptabilité. Il s'agit d'un groupe de variables traitant de l'ensemble des croyances concernant les effets de l'instrument sur la mobilité urbaine. Enfin, s'exprimer favorablement ou défavorablement à la mise en place d'une politique publique de mobilité urbaine peut dépendre de la perception que l'on a des événements de mobilité. Nous pouvons évoquer les externalités négatives engendrées par les déplacements de chacun. Ces perceptions des événements de la mobilité urbaine sont rassemblées dans le troisième groupe de variables.

---

7. L'étude du non-prononcement n'a donné aucun résultat probant.

Voici la liste des variables que nous allons introduire dans les modèles économétriques :

— **Les variables socio-démographiques de l'individu et de son ménage :**

- Le sexe de l'individu (variable indicatrice 0/1 : la variable prendra la valeur 1 si l'individu est un homme).
- L'âge de l'individu (variable quantitative).
- L'âge de l'individu au carré, afin de capter un potentiel effet non-linéaire de l'âge (variable quantitative).
- Le revenu disponible mensuel du ménage (en euros) au centre de la classe (variable quantitative).
- Le revenu disponible mensuel du ménage au centre de la classe, au carré, afin de capter un potentiel effet non-linéaire du revenu disponible des ménages (variable quantitative).
- Le nombre d'unités de consommation (UC) dans le ménage (variable quantitative - Le premier adulte du ménage compte pour 1 UC, les autres individus du ménage de 14 ans et plus comptent chacun pour 0,5 UC et les enfants de moins de 14 ans comptent chacun pour 0,3 UC).
- Le fait d'exercer un travail ou de faire des études, c'est-à-dire d'être relativement plus sujet à des migrations quotidiennes pendulaires (variable indicatrice 0/1 : la variable prendra la valeur 1 si l'individu est en activité).
- La possession d'un mode "lourd" (variable indicatrice 0/1 : la variable prendra la valeur 1 si l'individu possède au moins un mode "lourd" ( i.e. voiture, moto, scooter ... )).
- Le lieu d'habitation (variable indicatrice 0/1 : la variable prendra la valeur 1 si l'individu habite dans la ville de Montpellier).

- **Les variables sur la croyance individuelle des effets des PCE sur la mobilité urbaine.** L'individu est invité à mettre une note de 0 à 5 sur sa croyance quant à l'effet présenté. Cette note est guidée par une seconde échelle, où la note 0/5 signale un désaccord complet avec l'effet présenté (modalité "Pas du tout") et la note 5/5 s'apparente à un accord complet avec l'effet présenté (modalité "Tout à fait"). Voici les effets proposés :
  - Les PCE réduiront la congestion automobile.
  - Les PCE réduiront la pollution atmosphérique.
  - Les PCE diminueront le prix du carburant.
  - Les PCE diminueront le prix du stationnement.
  - Les PCE entraveront le droit à la mobilité.
- **Les variables sur la perception individuelle des événements pouvant se dérouler au cours des déplacements urbains.** L'individu est invité à mettre une note de 0 à 5 sur sa perception de l'effet présenté. Cette note est guidée par une seconde échelle, où la note 0/5 est attribuée lorsque l'individu ne perçoit pas l'événement (modalité "Jamais"). La note 5/5 est attribuée si l'individu perçoit l'événement dès lors qu'il se déplace dans la ville (modalité "Toujours"). Voici les événements proposés :
  - La perte de temps.
  - La pollution atmosphérique.
  - Le danger lié au comportement des autres citoyens qui se déplacent.
  - La difficulté d'être informé sur les conditions de déplacement.
  - La responsabilité individuelle dans les nuisances collectives.

Le tableau 15 référence l'ensemble des statistiques descriptives relatives aux caractéristiques socio-démographiques de notre sous-échantillon de 369 individus. Rappelons que 225 individus (61%) sont en faveur de la mise en place des PCE. L'individu caractéristique de cet échantillon est une femme active, âgée entre 18 et 24 ans, dont

le revenu disponible de son ménage n'excède pas 2000 € et ne vivant pas seule dans son ménage. C'est une femme n'ayant pas d'enfant de moins de 14 ans, possédant au moins un mode "lourd" et vivant dans la ville de Montpellier. Bien que notre échantillon souffre d'un manque de représentativité, cet individu caractéristique est similaire à l'individu caractéristique de l'aire urbaine de Montpellier (INSEE (2019) [52]).

Variable	Valeur	%	Variable	Valeur	%
<b>Sexe</b>			<b>Seul dans son ménage</b>		
Homme	162	43,9	Oui (UC = 1)	154	41,73
Femme	207	56,1	Non (UC > 1)	215	58,27
<b>Âge</b>			<b>Enfants de - de 14 ans</b>		
18-24 ans	152	41,19	Oui	64	17,34
25-39 ans	139	37,67	Non	305	82,66
40-64 ans	71	19,24	<b>Actif</b>		
65 ans et +	7	1,9	Oui	329	89,16
<b>Revenu</b>			Non	40	10,84
- de 2000 €	206	55,8	<b>Possession d'un mode "lourd"</b>		
]2000; 4000] €	101	27,37	Oui	224	60,7
]4000; 6000] €	49	13,28	Non	145	39,3
]6000; 8000] €	10	2,71	<b>Logement hors de la ville</b>		
]8000; 10000] €	1	0,27	Oui	100	27,1
+ de 10000 €	2	0,54	Non	269	79,9

Tableau 15 – Caractéristiques socio-démographiques – Acceptabilité des PCE (N=369)

L'annexe L référence l'ensemble des statistiques descriptives relatives aux variables de perception des effets des PCE et des événements de mobilité du quotidien. Nous proposons de dégager les principales tendances de choix à l'aide de l'analyse descriptive de la médiane, de la moyenne et de l'écart-type de chacune de ces variables explicatives. Le tableau 16 fait figurer l'ensemble de ces statistiques.

Les proportions concernant la perception des effets attendus des PCE et des externalités négatives urbaines sont relativement bien conservées dans ce sous-échantillon de 369 individus. Selon ces individus, les PCE ne vont pas diminuer le prix du stationnement, et encore moins celui du carburant. Les moyennes, les médianes et les faibles dispersions des réponses témoignent de cette affirmation. Par ailleurs, à la lecture des moyennes, les individus sont globalement davantage convaincus d'un effet bénéfique des PCE sur la diminution de la pollution atmosphérique que sur la baisse de la congestion. La note moyenne associée à la croyance d'un effet bénéfique des PCE sur la diminution de la pollution atmosphérique ( $2,99/5$ ) est supérieure à celle associée à la baisse de la congestion ( $2,67/5$ ). Enfin, à la question portant sur l'entrave au droit à la mobilité par les PCE, en se reportant à l'annexe L, nous pouvons constater que les deux modalités les plus choisies par ce sous-échantillon sont les deux modalités extrêmes. Par ce constat, interpréter les statistiques descriptives relatives à cette variable aurait peu de sens.

Abordons les statistiques descriptives sur la perception des externalités négatives engendrées par la mobilité urbaine. La perte de temps lors du déplacement est une externalité négative subie directement par les répondants. La note moyenne est de  $2,47/5$ . La pollution atmosphérique est quant à elle moins perçue. La note moyenne est de  $2,19/5$ . En effet, l'externalité de congestion est plus observable que la pollution atmosphérique dans ce type de ville du sud de la France. La difficulté d'être informé sur les conditions de déplacement est globalement plus constatée que la pollution atmosphérique. La note moyenne associée à cette difficulté est de  $2,3/5$ . Ceci s'explique sans doute par le caractère individuel de l'accès à l'information.

L'externalité négative la plus perçue par les individus pendant leurs déplacements est celle du danger lié au comportement des autres individus, quel que soit le mode de déplacement de ces derniers. La médiane ( $3/5$ ) et la moyenne ( $3,13/5$ ) de cette variable sont plus les plus fortes de l'ensemble des variables sur la perception des

événements quotidiens de mobilité. Enfin, la plupart des individus ne considèrent pas, ou considèrent peu, être responsables des nuisances collectives. Les deux derniers constats ne sont pas non plus surprenants et renvoient au rejet de la responsabilité des nuisances sur les autres individus.

Variable	Médiane	Moyenne	Écart-type
<b>Perception : effets des PCE</b>			
Baisse de la congestion automobile (N=368)	3	2,67	1,71
Baisse de la pollution atmosphérique (N=366)	3	2,99	1,66
Baisse du prix du carburant (N=367)	0	1,08	1,45
Baisse du prix du stationnement (N=367)	1	1,47	1,66
Entrave au droit à la mobilité (N=366)	2	2,42	1,87
<b>Perception : événements de mobilité</b>			
Perte de temps	2	2,47	1,49
Pollution atmosphérique	2	2,19	1,47
Danger lié au comportement des autres	3	3,13	1,50
Difficulté d'être informé	2	2,30	1,48
Resp. individuelle dans les nuisances collectives	2	1,75	1,39

Tableau 16 – Statistiques descriptives sur la perception des effets des PCE et des événements de mobilité (N=369, sauf mention contraire)

### 3.2 Modélisation économétrique

L'équation de la régression logistique binomiale modélisant la probabilité que l'individu soit favorable à la mise en place des PCE (i.e.  $P(Y = 1)$ ) est, en fonction du produit matriciel de la matrice  $X$  des variables explicatives  $X_j$  avec la matrice-colonne  $\beta$  des paramètres  $\beta_j$  :

$$\ln\left(\frac{P(Y = 1)}{1 - P(Y = 1)}\right) = X\beta = \beta_0 + \sum^j \beta_j X_j \quad (1)$$

Dans ce modèle, la probabilité estimée que l'individu soit favorable à la mise en place hypothétique des PCE (i.e.  $\hat{P}(Y = 1)$ ) est, en fonction de la matrice-colonne  $\hat{\beta}$  des paramètres estimés  $\hat{\beta}_j$  :

$$\hat{P}(Y = 1) = \frac{e^{X\hat{\beta}}}{1 + e^{X\hat{\beta}}} = \frac{e^{\hat{\beta}_0 + \sum^j \hat{\beta}_j X_j}}{1 + e^{\hat{\beta}_0 + \sum^j \hat{\beta}_j X_j}}$$

Nous estimons un premier modèle (Modèle 1) dans lequel nous considérons uniquement les variables socio-démographiques comme étant les variables explicatives de la probabilité d'acceptabilité des PCE. Ce modèle est proposé par anticipation d'un modèle où les effets des variables socio-démographiques disparaîtraient au profit des effets des variables relatives à la croyance individuelle des effets des PCE sur la mobilité urbaine. Le deuxième modèle (Modèle 2) intègre les variables relatives aux croyances individuelles des effets des PCE sur la mobilité urbaine en tant que variables explicatives, en supplément de l'ensemble des variables socio-démographiques du modèle 1. Le troisième et dernier modèle (Modèle 3) est un modèle global. Il intègre les variables relatives aux perceptions individuelles des événements pouvant se dérouler au cours des déplacements urbains en tant que variables explicatives, en supplément de l'ensemble des variables des modèles 1 et 2. Les variables exogènes qui entretiennent un lien statistique avec la variable dépendante ont été sélectionnées à l'aide d'une procédure d'élimination descendante des variables explicatives<sup>8</sup>, au seuil de probabilité critique de 10 % sur la significativité des estimateurs.

Il s'avère que les variables suivantes n'ont pas été sélectionnées pour expliquer la probabilité d'acceptabilité des PCE, quel que soit le modèle considéré : le sexe, l'âge sous sa forme linéaire et quadratique, le revenu disponible des ménages sous sa

---

8. Dans cette procédure, le premier modèle estimé est celui qui comprend l'ensemble des variables explicatives à notre disposition. Après cette estimation, nous supprimons la variable explicative la moins significative parmi celles qui ne sont pas significativement différentes de zéro. Nous réestimons ensuite le modèle sans cette variable. Ces opérations sont répétées jusqu'à ce que l'ensemble des variables explicatives restantes dans le modèle soient significatives, au seuil de probabilité critique que nous spécifions.

forme linéaire, le nombre d'unités de consommation dans le ménage, le fait d'habiter dans la ville de Montpellier, la croyance sur une baisse du prix du carburant par la mise en place des PCE, et l'ensemble des variables sur la perception individuelle des événements pouvant se dérouler au cours des déplacements urbains. La difficulté d'être informé sur les conditions de déplacement fait office d'exception.

Les résultats des différentes estimations sont consignés dans le tableau 17. Le modèle 1 suggère l'existence d'une relation entre l'acceptabilité des PCE, le revenu disponible des ménages sous sa forme quadratique, le fait d'exercer un travail et la possession un mode "lourd". Le modèle 2 rend compte d'une relation statistique entre l'acceptabilité des PCE et l'ensemble des variables modélisant la perception des effets attendus des PCE, à l'exception d'une baisse du prix du carburant. Le modèle 3 expose une relation entre l'acceptabilité des PCE, la difficulté d'être informé pendant les déplacements et l'ensemble des variables significatives du modèle 2.

Le test du rapport de vraisemblance indique que, quel que soit le modèle considéré, l'intégration des variables exogènes apporte de l'information sur la probabilité d'acceptabilité des PCE. Ces modèles sont alors préférables à un modèle où seule une constante expliquerait la probabilité d'acceptabilité des PCE.

3. Analyse économétrique de l'acceptabilité des PCE

Variables indépendantes	Modèle 1 (N=369)		Modèle 2 (N=363)		Modèle 3 (N=363)	
	$\hat{\beta}$ ( $\hat{\sigma}_{\hat{\beta}}$ )	Prob.	$\hat{\beta}$ ( $\hat{\sigma}_{\hat{\beta}}$ )	Prob.	$\hat{\beta}$ ( $\hat{\sigma}_{\hat{\beta}}$ )	Prob.
Constante	0,4590 (0,3548)	0,196	-0,6230 (0,3680)	0,090	0,0476 (0,4937)	0,923
<b>VARIABLES SOCIO-DÉMOGRAPHIQUES</b>						
Revenu <sup>2</sup> dispo. mensuel du ménage	-1,4.10 <sup>-8</sup> (8,12.10 <sup>-9</sup> )	0,084	<i>n.s.</i>		<i>n.s.</i>	
Actif	0,6982 (0,3468)	0,044	<i>n.s.</i>		<i>n.s.</i>	
Possession d'un mode "lourd"	-0,8031 (0,2359)	0,001	<i>n.s.</i>		<i>n.s.</i>	
<b>PERCEPTION : EFFETS DES PCE</b>						
Baisse de la congestion automobile	-		0,4572 (0,1916)	0,017	0,4497 (0,1989)	0,024
Baisse de la pollution atmosphérique	-		0,4432 (0,2013)	0,028	0,4353 (0,2070)	0,035
Baisse du prix du stationnement	-		0,4306 (0,1130)	<0,001	0,4042 (0,1136)	<0,001
Entrave au droit à la mobilité	-		-0,7843 (0,1058)	<0,001	-0,7963 (0,1079)	<0,001
<b>PERCEPTION : ÉVÉNEMENTS DE MOBILITÉ</b>						
Difficulté d'être informé	-		-		-0,2385 (0,1161)	0,040
<b>INDICATEURS</b>						
Log-vraisemblance	-236,04		-127,98		-125,82	
Test du rapport de vraisemblance (Probabilité critique du test)	21,54 (0,0001)		231,66 (<0,0001)		235,98 (<0,0001)	
Pseudo-R <sup>2</sup> - Efron	0,058		0,551		0,556	
% de prévisions correctes	64,5		86,23		86,23	
Sensibilité (%)	95,11		90,41		91,32	
Spécificité (%)	16,67		79,86		78,47	
AIC	480,07		265,95		263,64	
BIC	495,72		285,42		287	

Tableau 17 – Résultats économétriques - Acceptabilité des PCE

*n.s.* : paramètre de l'estimation non-significatif

- : variable non-intégrée dans le modèle

Il existe, dans le premier modèle, un lien statistique entre l'acceptabilité des PCE, le revenu disponible des ménages sous sa forme quadratique, la possession d'au moins un mode "lourd" et le fait d'être actif. Posséder un mode "lourd" influence négativement la probabilité qu'un individu soit favorable à la mise en place des PCE (**-0,8031**<sup>9</sup>). À l'inverse, le fait d'être actif influence positivement cette même probabilité (**0,6982**). Ces effets sont assez intuitifs. Le mode "lourd" est impacté par le rationnement de la mobilité par les PCE. Les individus possédant au moins un mode "lourd" seront donc moins enclins à accepter la mise en place des PCE relativement à une situation de *statu quo*. Les individus actifs sont les plus sujets aux migrations pendulaires et quotidiennes, et sont ainsi davantage confrontés aux externalités négatives que les autres individus. Ils auront donc tendance à être favorables à la mise en place des PCE pour améliorer leurs déplacements.

L'acceptabilité des PCE est aussi expliquée par un effet non-linéaire du revenu, quadratique et concave. Son estimateur n'est pas significatif lorsque la variable associée au revenu n'est pas élevée au carré. Par conséquent, le revenu impacte négativement la probabilité de choix en faveur des PCE en tout point (**-1,4.10<sup>-8</sup>**). L'impact négatif du revenu sur l'acceptabilité des PCE sera d'autant plus important que le revenu augmentera, par la concavité de l'effet non-linéaire. Par conséquent, plus un individu dispose d'un revenu élevé, plus le degré de rejet de la mesure est fort. Ce résultat renvoie à la première AFD du chapitre précédent, dans laquelle nous constatons un refus des individus disposant d'un revenu élevé à payer davantage pour pouvoir se déplacer. La proportion de détenteurs d'au moins un mode "lourd" étant croissante avec la classe de revenu, cet effet renvoie indirectement à un autre effet évoqué précédemment : celui de la possession d'un mode "lourd" sur la pro-

---

9. Les valeurs en gras correspondent à la valeur de l'estimateur de la variable explicative considérée. Le signe de l'estimateur donne le sens du lien statistique entre la variable explicative et la probabilité d'acceptabilité des PCE. Une étude comparative de la valeur de chacun des estimateurs peut rendre compte de l'intensité relative de l'effet d'une variable explicative sur la probabilité d'acceptabilité des PCE.

babilité d'être favorable à la mise en place des PCE. Nous déduisons alors que, toutes choses égales par ailleurs, l'acceptabilité des PCE d'un individu est maximale lorsque le revenu de l'individu appartient à la classe la plus faible, c'est-à-dire pour un revenu de moins de 2000 €.

Le deuxième modèle suggère d'expliquer l'acceptabilité des PCE à l'aide de l'ensemble des variables modélisant les croyances concernant les effets des PCE, excepté la croyance relative à une baisse du prix du carburant. La procédure de sélection des variables explicatives a exclu de ce modèle l'ensemble des variables explicatives socio-démographiques. Le pouvoir explicatif du deuxième modèle (Pseudo- $R^2$ (Efron)<sup>10</sup> = 0,551 et % de prévisions correctes<sup>11</sup> = 86,23) bien plus important que celui du premier modèle (Pseudo- $R^2$ (Efron) = 0,058 et % de prévisions correctes = 64,5). Tout comme dans Dogterom et al. (2018) [32], l'acceptabilité des PCE est mieux expliquée par les variables relatives aux croyances des individus sur les effets des PCE que par leurs caractéristiques socio-démographiques. Ces nouvelles variables évincent l'effet du revenu dans le modèle.

L'acceptabilité des PCE augmente à mesure que l'individu signale que les PCE permettront de diminuer la congestion automobile (**0,4572**), la pollution atmosphérique (**0,4432**) et le prix du stationnement (**0,4306**). Le plus grand effet individuel de cette régression est toutefois l'impact négatif de la croyance selon laquelle les PCE représenteront une entrave aux déplacements (**-0,7843**). Par conséquent, plus l'individu stipule que les PCE entraveront ses déplacements, moins l'individu est favorable à la mise en place des PCE. Les effets exposés ne sont pas contraires aux intuitions économiques classiques.

---

10. Tout comme le coefficient de détermination d'un modèle estimé par la méthode des moindres carrés ordinaires, le pseudo- $R^2$  d'Efron est une mesure de la qualité de l'ajustement du modèle logit.

11. Le pourcentage de prévisions correctes est le rapport entre le nombre d'observations correctement classées *ex post* par le modèle logit et l'ensemble des observations.

Dans le troisième modèle, l'acceptabilité des PCE est expliquée par l'ensemble des variables significatives du deuxième modèle, ainsi que par la variable portant sur la difficulté d'être informé sur les conditions de déplacement. La procédure de sélection des variables explicatives a alors exclu l'ensemble des variables socio-démographiques des individus. La variable modélisant la croyance d'un effet des PCE sur la baisse du prix du carburant et l'ensemble des variables concernant la perception des événements de mobilité urbaine ont été également exclus. La difficulté d'être informé sur les conditions de déplacement est l'exception. Les liens statistiques entre les effets des variables portant sur la perception des effets des PCE et la probabilité d'acceptabilité des PCE sont identiques au deuxième modèle. La perception des principales externalités négatives liées à la mobilité urbaine n'influence pas cette probabilité. Ce résultat est similaire à Dogterom et al. (2018) [32] pour les Pays-Bas. Nous pouvons expliquer ce constat par le fait que les externalités négatives sont moins observables aux Pays-Bas et dans l'aire urbaine de Montpellier que dans certaines villes asiatiques comme Pékin.

La difficulté d'être informé sur les conditions de déplacement implique une incertitude sur les conditions de déplacement. Cette difficulté influence négativement la probabilité en faveur des PCE (**-0,2385**). Il existe un coût informationnel supplémentaire d'accès à un instrument méconnu pour la grande majorité de la population. Toutefois, l'impact de cette variable est relativement moins important dans la régression que celui des autres variables significatives. La valeur moins élevée de son estimateur relativement aux autres estimateurs et la faible variation du pouvoir explicatif du modèle 3 (Pseudo- $R^2$ (Efron) = 0,556 et % de prévisions correctes = 86,23) par rapport au modèle 2 (Pseudo- $R^2$ (Efron) = 0,551 et % de prévisions correctes = 86,23) en témoignent.

Nous avons obtenu quelques indicateurs économétriques nous permettant de sélectionner un modèle raisonnable rendant compte des déterminants de l'acceptabi-

lité des PCE. Ceux-ci vont nous aider à poursuivre notre analyse. Au regard du pseudo- $R^2$  d'Efron et de la proportion de prédictions correctes, le pouvoir explicatif du premier modèle semble faible, comparativement aux deux autres modèles. Ce modèle a une bonne capacité de prédiction des individus qui sont effectivement favorables à la mise en place des PCE (Sensibilité =  $P(\hat{Y} = 1|Y = 1) = 95,11\%$ ) mais prédit mal le résultat des individus qui ne sont pas favorables à la mise en place des PCE (Spécificité =  $P(\hat{Y} = 0|Y = 0) = 16,67\%$ ). Ces constats sont accompagnés d'une valeur élevée des critères d'information d'Akaike (AIC) et bayésien (BIC)<sup>12</sup>, relativement aux deux autres modèles. L'ensemble de ces considérations nous amène à éliminer le premier modèle.

L'ajout des variables modélisant la perception des événements de mobilité quotidienne dans le troisième modèle n'augmente pas la proportion de prévisions correctes par rapport au deuxième modèle. Les deux modèles ont une bonne capacité de prédiction des individus qui sont effectivement favorables à la mise en place des PCE (Sensibilité = 90,41% pour le modèle 2, 91,32% pour le modèle 3) et des individus qui ne sont pas favorables à la mise en place des PCE (Spécificité = 79,86% pour le modèle 2, 78,47% pour le modèle 3). Le pseudo- $R^2$  d'Efron varie peu entre les deux modèles. Les critères d'information d'Akaike et bayésien des deux modèles sont relativement proches. Le critère d'information bayésien, pénalisant davantage l'incorporation de nouvelles variables explicatives, suggère la sélection du deuxième modèle. Alors, dans ce modèle sélectionné, compte-tenu des données à notre disposition, les perceptions individuelles sur les effets des PCE seront les meilleurs prédicteurs de l'acceptabilité des PCE. Nous proposons d'analyser plus finement le

---

12. Ces critères permettent de mesurer la qualité d'un modèle statistique estimé par la méthode du maximum de vraisemblance, comme par exemple le modèle logit, et de sélectionner un modèle parmi un ensemble de modèles qui cherchent à expliquer un même phénomène. Parmi cet ensemble, le modèle retenu sera celui où le critère d'information étudié est le plus faible.

modèle 2 en quantifiant l'effet des variables explicatives sur la probabilité d'acceptabilité des PCE.

### 3.3 Effets marginaux et élasticités sur la probabilité d'acceptabilité des PCE

À partir des résultats économétriques du tableau 17 et de l'équation 1, nous pouvons présenter l'estimation du logit de la probabilité d'acceptabilité des PCE du modèle 2 pour un individu  $i$  :

$$\begin{aligned} \ln\left(\frac{\hat{P}(Y=1)}{1-\hat{P}(Y=1)}\right) &= X\hat{\beta} \\ &= \hat{\beta}_0 + \hat{\beta}_1 \text{cong}_i + \hat{\beta}_2 \text{pollu}_i + \hat{\beta}_3 \text{statio}_i + \hat{\beta}_4 \text{nuire}_i \\ &= -0,6230 + 0,4572 \text{cong}_i + 0,4432 \text{pollu}_i + 0,4306 \text{statio}_i - 0,7843 \text{nuire}_i \end{aligned}$$

La variable  $\text{cong}_i$  représente la note que l'individu  $i$  attribue à sa perception de l'effet hypothétique des PCE sur la baisse de la congestion,  $\text{pollu}_i$  sur la diminution de la pollution atmosphérique,  $\text{statio}_i$  sur la baisse du prix du stationnement et  $\text{nuire}_i$  sur l'entrave au droit à la mobilité.

Le tableau 18 donne les effets marginaux et les élasticités au point moyen  $\bar{X}$  de notre échantillon. Ces éléments indiquent l'évolution de la probabilité d'être favorable à la mise en place des PCE lors d'une variation d'une des variables explicatives du modèle, toutes choses égales par ailleurs.

La probabilité d'être favorable à la mise en place des PCE au point moyen de l'échantillon est :

$$\hat{P}(Y = 1|\bar{X}) = \frac{e^{\bar{X}\hat{\beta}}}{1 + e^{\bar{X}\hat{\beta}}}$$

Au point moyen  $\bar{X}$  de l'échantillon, la probabilité que l'individu soit favorable à la mise en place des PCE est de 66%. Cette valeur est assez proche des proportions contenues dans la variable explicative (61%).

L'effet marginal est défini ici comme étant la variation (en point de pourcentage) de la probabilité d'être favorable à la mise des PCE lors d'une variation unitaire de la note relative à une croyance des effets des PCE, toutes choses égales par ailleurs. Nous calculons ces effets au point moyen de l'échantillon.

L'effet marginal au point moyen de la variable  $X_j$  sur la probabilité d'acceptabilité des PCE ( $P(Y = 1)$ ) est alors :

$$Em_{X_j} = \frac{\partial \hat{P}(Y = 1|\bar{X})}{\partial X_j} = \hat{P}(Y = 1|\bar{X}) \frac{\hat{\beta}_j}{1 + e^{\bar{X}\hat{\beta}}}$$

L'élasticité est définie ici comme étant la variation (en pourcentage) de la probabilité d'acceptabilité des PCE si la note relative à une des croyances des effets des PCE augmente de 1%, toutes choses égales par ailleurs.

L'élasticité de la probabilité d'acceptabilité des PCE est, au point moyen de l'échantillon et selon la variation de la variable explicative  $X_j$  :

$$\varepsilon_{X_j} = \frac{\frac{\partial \hat{P}(Y=1|\bar{X})}{\partial X_j}}{\frac{\hat{P}(Y=1|\bar{X})}{X_j}} = Em_{X_j} \frac{X_j}{\hat{P}(Y = 1|\bar{X})}$$

Variable	Point moyen de l'échantillon	Effet marginal	Élasticité
<b>Baisse de la congestion automobile</b>	2,6942	0,1024	0,42
<b>Baisse de la pollution atmosphérique</b>	2,9945	0,099	0,45
<b>Baisse du prix du stationnement</b>	1,4738	0,0965	0,22
<b>Entrave au droit à la mobilité</b>	2,427	-0,1757	-0,65

Tableau 18 – Effets marginaux et élasticités sur la probabilité d'acceptabilité des PCE au point moyen de l'échantillon (Modèle 2, N=363)

En termes d'effets marginaux, une augmentation unitaire de la note sur la croyance d'un effet des PCE sur la baisse de la congestion augmente de 10,24 points de pourcentage (*p.p*) la probabilité d'acceptabilité des PCE, toutes choses égales par ailleurs au point moyen de l'échantillon. De même, une augmentation unitaire de la note sur la croyance d'un effet des PCE sur la baisse de la pollution atmosphérique (resp. du prix du stationnement) augmente la probabilité d'acceptabilité des PCE de 9,9 *p.p* (resp. 9,65 *p.p*). À l'inverse, une diminution unitaire de la note sur la croyance d'un effet des PCE sur l'entrave au droit à la mobilité augmente de 17,57 *p.p* la probabilité d'acceptabilité des PCE. Nous observons à nouveau, avec les variables à notre disposition, que la croyance selon laquelle les PCE nuisent au droit à la mobilité est celle qui a le plus d'influence sur la probabilité d'acceptabilité des PCE.

En termes d'élasticités, une augmentation de 1% de la note sur la croyance d'un effet des PCE sur la baisse de la congestion (resp. la pollution automobile et le prix du stationnement) augmente de 0,42% (resp. 0,45% et 0,22%) la probabilité d'acceptabilité des PCE, toutes choses égales par ailleurs au point moyen de l'échantillon. Une diminution de 1% de la note sur la croyance d'un effet des PCE sur l'entrave au droit à la mobilité augmente de 0,65% la probabilité d'acceptabilité des PCE.

## 4 Quelles implications pour la définition des politiques publiques ?

### 4.1 Dynamique de la probabilité d'acceptabilité des PCE

Avant de rendre compte des implications de nos résultats pour la définition des politiques publiques, intéressons-nous à la dynamique suivante. Compte-tenu de la forme fonctionnelle de la fonction de probabilité, il existe une dynamique des effets marginaux et des élasticités de la probabilité d'acceptabilité des PCE. La figure 14 représente ces dynamiques.

Nous retrouvons, pour chacune des variables explicatives, la forme d'une courbe logistique. Le sens de variation des probabilités en fonction de la note attribuée sur la croyance d'un effet des PCE est adéquat avec le modèle de régression. Nous constatons que, dans notre intervalle de validité de la note (i.e.  $[0; 5]$ ), une petite variation de la note associée à une croyance entraîne une forte variation de la probabilité d'acceptabilité des PCE, toutes choses égales par ailleurs au point moyen de l'échantillon.

On voit, parmi les variables influençant positivement la probabilité d'acceptabilité des PCE, que l'évolution de la probabilité est plus forte lorsque qu'il s'agit des effets bénéfiques potentiels des PCE sur les externalités négatives que sont la congestion automobile et la pollution atmosphérique. En effet, dans notre domaine de validité, les courbes logistiques sont plus pentues pour ces deux variables que pour les autres variables qui procurent un effet positif sur la probabilité. L'évolution de la probabilité est relativement moins importante pour une croyance relative à une baisse du prix du stationnement. Lorsque l'individu n'adhère pas du tout à une croyance des effets des PCE sur les externalités négatives, c'est-à-dire lorsqu'il attribue une note de 0/5

à cette croyance, il sera plus probable que l'individu soit défavorable à la mise en place des PCE (i.e. la probabilité d'acceptabilité des PCE est inférieure à 50%, toutes choses égales par ailleurs). Enfin, la probabilité d'acceptabilité des PCE est surtout sensible à la croyance selon laquelle les PCE nuiront au droit à la mobilité. La forte pente de la courbe logistique associée à cette variable en témoigne. La variation de la probabilité dans le domaine de validité est la plus importante du modèle.

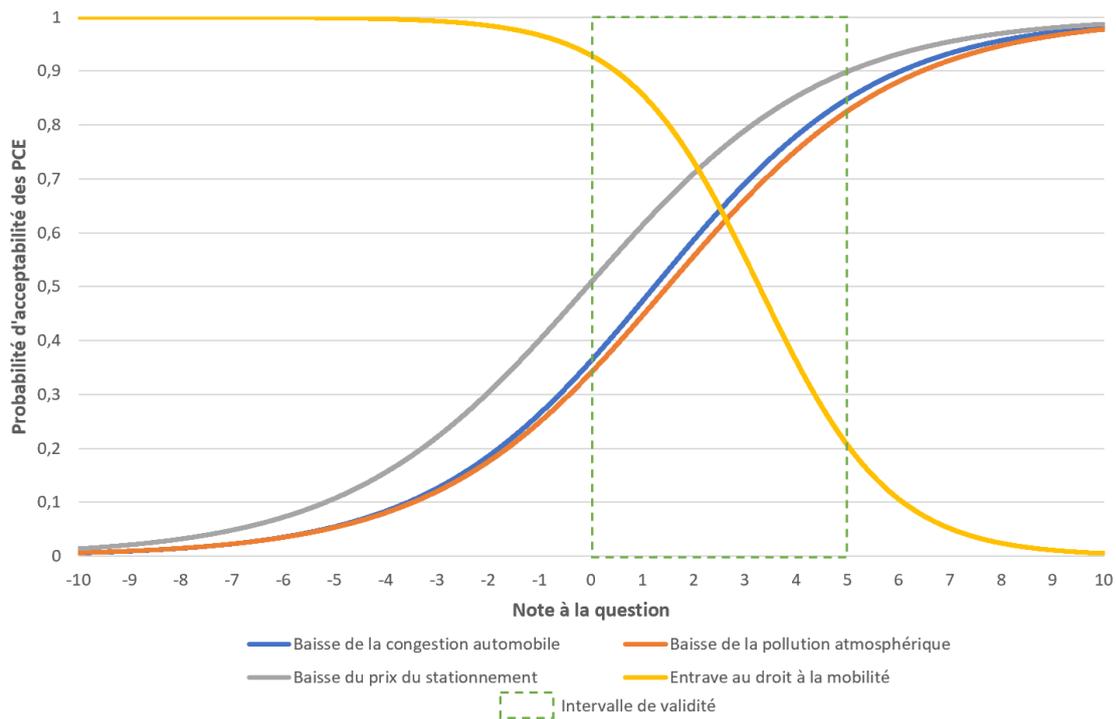


Figure 14 – Évolution de la probabilité d'acceptabilité des PCE, toutes choses égales par ailleurs au point moyen de l'échantillon

Nous constatons par ailleurs que les courbes d'évolution de la probabilité d'un choix favorable à la mise en place des PCE selon la croyance d'un effet sur la baisse de la congestion et de la pollution atmosphérique s'écartent. Ceci laisse supposer une vitesse de l'évolution de la probabilité plus importante lorsqu'il s'agit d'une variation de la note sur l'effet hypothétique d'une baisse de la congestion.

## 4.2 Implications pour la définition des politiques publiques

L'acceptabilité des PCE est principalement fondée sur les croyances des individus relatives aux effets potentiels des PCE sur la mobilité urbaine. Les caractéristiques socio-démographiques des individus s'effacent au profit de ces croyances individuelles dans la modélisation des déterminants de l'acceptabilité des PCE. Une croyance a d'autant plus d'effet sur l'acceptabilité des PCE que celle-ci est fondée (1) sur un effet hypothétique observable impactant directement le coût généralisé des futurs déplacements de l'individu (entrave au droit à la mobilité, baisse de la congestion automobile, baisse du prix du stationnement) et (2) sur un effet hypothétique non-quantifiable directement mais évoqué par tous. La pollution atmosphérique n'est guère quantifiable par un individu à un instant donné, mais tout le monde s'accorde à dire qu'un instrument de politique publique relatif à la mobilité urbaine permettra de résorber ce phénomène.

Les résultats économétriques montrent indirectement le lien qu'il y aurait entre les messages d'une campagne de communication sur les PCE et ses impacts sur l'acceptabilité de l'instrument. Si la campagne se focalise sur un effet individuel et qui concerne, peu ou prou, l'ensemble des individus (entrave au droit à la mobilité, congestion automobile), alors l'acceptabilité des PCE sera plus grande. Dans une moindre mesure, l'acceptabilité des PCE sera aussi améliorée si la campagne se focalise sur un effet diffus inobservable aisément ou qui concerne moins d'individus (prix du stationnement, pollution atmosphérique).

Toutefois, une telle politique de communication sur les effets bénéfiques des PCE n'est clairement pas suffisante. En effet, au-delà des considérations positives des effets des PCE, une croyance aura d'autant plus d'influence sur la probabilité que celle-ci impacte directement et négativement l'individu. C'est le cas de la croyance sur l'entrave au droit à la mobilité. Trois pistes sont envisageables pour que cette

croyance s'atténue. La première, directe, vise à démontrer au travers d'une campagne de communication que les PCE ne nuiront pas aux droits à la mobilité. La deuxième, bien plus coûteuse mais certainement plus efficace, consiste à améliorer le réseau de transport alternatif afin que la transition vers une mobilité plus durable se fasse sereinement. La dernière piste relève plutôt d'une hypothèse optimiste : nous pouvons penser que l'entrave au droit à la mobilité est temporaire. Elle pourrait être marquée lors de la mise en place des PCE et s'amenuiser lorsque l'individu aura adapté ses comportements de mobilité. Le volontarisme, le pragmatisme et la communication transparente des autorités au sujet des PCE peuvent laisser des perspectives prometteuses à l'instrument.

## Conclusion

Il est important, pour les pouvoirs publics, de recueillir l'avis des citoyens concernant la mise en place hypothétique d'un instrument de politique publique relatif aux problématiques de la mobilité urbaine. Ces projets eux-mêmes peuvent conditionner la popularité des autorités publiques et, partant, la conduite ou la reconduite d'une équipe politique. Il est possible, à l'aide d'une enquête, de connaître l'acceptabilité des citoyens sur la mise en place d'un projet et d'en analyser ses composantes. Des mesures complémentaires et ciblées à des groupes d'individus pourront ainsi être identifiées afin d'améliorer socialement l'acceptabilité d'un projet.

Un des volets de notre enquête a pour objectif de mesurer l'acceptabilité des PCE et de déterminer les facteurs influençant cette acceptabilité. La première section de ce chapitre montre globalement qu'un instrument de politique publique est d'autant plus acceptable que celui-ci n'est pas restrictif sur l'usage du mode "lourd". Dans la deuxième section de ce chapitre, nous montrons que les PCE sont bien plus acceptables que les autres instruments cherchant à restreindre les déplacements en mode "lourd".

Une analyse économétrique a permis de mettre en lumière la nécessité d'informer les usagers sur les effets des PCE sur la mobilité urbaine. La perception des effets hypothétiques de cet instrument sont les meilleurs prédicteurs de la probabilité qu'un individu soit favorable à la mise en place des PCE. Cette information aura d'autant plus d'impact sur l'acceptabilité des PCE que celle-ci portera sur des effets individuels observables par les individus. Ces effets individuels, s'ils émergent véritablement, amélioreront la désutilité que représente le coût généralisé de déplacement. L'autorité publique se doit alors de quantifier les effets hypothétiques des PCE sur les composantes individuelles de la mobilité urbaine et d'en informer les individus.

La principale limite de notre travail de recherche est le manque de représentativité de notre échantillon. Il apparaît toutefois que les tendances de l'acceptabilité des PCE figurant dans la littérature scientifique sont en adéquation avec les résultats obtenus à l'aide de notre échantillon. Ce travail de recherche permet de donner un premier cadre d'analyse rigoureux des tendances et des déterminants de l'acceptabilité des PCE dans l'aire urbaine de Montpellier.

En suivant la même méthodologie, un futur travail de recherche pourrait se consacrer à analyser plus finement l'acceptabilité des PCE sur un échantillon représentatif de la population. Cette analyse se traduirait par une mesure de l'acceptabilité des PCE en fonction du type de PCE que l'autorité souhaiterait hypothétiquement implémenter, de la méthode d'allocation de ces PCE, du type de prélèvement et de la définition du périmètre géographique. Une enquête traitée à l'aide de la méthode des choix discrets pourrait nous éclairer sur les préférences des individus vis-à-vis de situations hypothétiques de mise en place des PCE. Les effets des PCE sur le bien-être des individus seraient identifiés et quantifiés. Il serait d'ailleurs intéressant d'observer l'impact d'assertions positives au sujet de ces effets sur l'acceptabilité des PCE.

Enfin, la réussite sociale d'un tel projet va de pair avec la mise en place d'un réseau de transport alternatif de qualité, ainsi que de mesures favorisant l'usage de ces alternatives. Ces éléments doivent aussi être pris en compte afin d'améliorer l'acceptabilité des PCE et des autres instruments.

# Conclusion générale - Trente recommandations à destination des décideurs publics

Les permis à circuler échangeables sont une alternative crédible aux instruments classiques de gestion directe de la mobilité urbaine. Cet instrument incite à adopter des comportements de déplacement plus vertueux. Il contraint en revanche les usages excessifs des modes "lourds" par le prix. En effet, l'individu doit acheter des permis supplémentaires sur un marché s'il souhaite se déplacer au-delà de ce qu'il lui est permis de faire, avec l'allocation attribuée par les autorités publiques.

Ces permis sont définis comme étant une quantité non-monnaire allouée puis prélevée à l'utilisateur afin qu'il exerce des déplacements dans un périmètre espace-temps-mode contraint par les autorités publiques. Un objectif quantitatif collectif est fixé dans ce périmètre, afin de diminuer les effets externes issus de la mobilité des individus et des biens. Cet objectif se traduit en un nombre de permis, que l'on appelle également quotas. Ces permis sont ensuite ventilés et distribués à tous les individus du périmètre et de ses environs. Cette quantité de permis sensibilise, incite et implique directement les individus à l'accomplissement de l'objectif de mobilité urbaine durable.

L'individu peut consommer ses permis pour se déplacer dans le périmètre espace-temps-mode considéré. Il peut aussi vendre une partie de ses PCE sur un marché encadré par les autorités publiques, et offrir ainsi des déplacements aux autres individus. Dans ce cas, l'individu se déplace avec d'autres modes de déplacement ne nécessitant pas de PCE, utilise les modes de déplacement soumis au prélèvement de PCE à des périodes ou dans des zones géographiques ne nécessitant pas la consommation de PCE, ou annule ses déplacements. Si l'individu ne consomme pas ou ne vend pas ses permis, alors il les perdra à la date de fin de validité. Les individus qui n'ont plus suffisamment de permis pour se déplacer pourront alors se rendre sur le marché des permis et en acquérir. Nous pouvons qualifier ces permis d'instrument hybride, alliant restriction des déplacements collectivement nuisibles, pollution-paiement aux autres usagers contribuant à l'effort environnemental, et incitation financière individuelle à adopter des comportements plus vertueux.

Dans un premier chapitre, la littérature scientifique nous a aidé à apporter des éclairages théoriques au sujet de cet instrument. Nous avons développé le rôle des nouvelles technologies dans ce système. Des progrès considérables ont été faits sur ces technologies en matière de fluidification et d'individualisation des échanges-mobilité. Ces progrès nous permettent maintenant d'envisager la mise en place des PCE et du marché virtuel sous-jacent dans nos villes. Nous avons aussi présenté un modèle économique rendant compte de l'importance de l'allocation initiale des PCE sur les choix modaux.

Dans un deuxième chapitre, nous avons étudié les résultats d'un jeu sérieux issu d'une enquête en ligne proposée aux habitants de l'aire urbaine de Montpellier. Ce jeu avait pour objectif de rendre compte des effets d'un marché hypothétique de PCE sur les déplacements des individus. Nous avons montré qu'il était possible d'avoir une mobilité urbaine plus soutenable sans toutefois peser financièrement sur le budget

des ménages. Nous avons aussi mis en évidence les critères de retrait volontaire ou d'exclusion du marché en tant qu'acheteur.

Dans un troisième chapitre, nous avons mesuré économétriquement l'acceptabilité des PCE. Nous avons comparé celle-ci à l'acceptabilité du péage urbain. L'acceptabilité des PCE est supérieure à celle du péage urbain. Elle est bien plus influencée par les croyances des individus relatives aux effets hypothétiques de l'instrument sur la mobilité urbaine que par les caractéristiques socio-démographiques individuelles.

L'ensemble des analyses empiriques que nous avons menées et la synthèse de la littérature scientifique mettent en exergue plusieurs caractéristiques universelles relatives à la structure et au fonctionnement de l'ensemble du système de PCE et des mobilités associées. Notre thèse en sciences économiques est ainsi vouée à éclairer le regard des autorités publiques sur cet instrument. Nous proposons, en guise de conclusion générale, un guide de bonnes pratiques pour la création d'un système de PCE. Nos recommandations prennent la forme de trente assertions, réparties en six catégories.

**Premièrement, la création d'un système de PCE exige la fixation du périmètre espace-temps-mode d'application. Elle exige également la définition des externalités négatives sur lesquelles les autorités publiques veulent lutter. Cette définition est assortie d'un objectif quantitatif collectif à ne pas dépasser. Conformément à cet objectif, une quantité de PCE est allouée initialement à chaque individu pour qu'il puisse se déplacer.**

(I). La sélection du périmètre géographique, temporel et modal des PCE est lié à l'identification des nuisances urbaines principalement ciblées. La performance des PCE dépendra alors de la définition claire de ce périmètre.

(II). Une fois les nuisances ciblées, le nombre total de PCE alloué à la population doit être calculé sur la base de l'objectif quantitatif collectif à ne pas dépasser (e.g. des émissions de CO<sub>2</sub> quotidiennes ou un nombre de véhicules en un espace et un temps donné).

(III). Les PCE doivent être alloués gratuitement et de manière uniforme, de telle sorte à ce que cet instrument conserve l'essence-même de son avantage face à la taxation des ressources et au péage urbain.

(IV). Il est nécessaire de pondérer l'allocation initiale des PCE en fonction de la taille et de la composition du ménage, car le besoin en déplacement dépend aussi de ces facteurs.

(V). Une réflexion doit être menée sur le traitement des usagers vivant hors du périmètre d'application des PCE. Si aucune allocation initiale ne leur est attribuée, ces individus devront se procurer des PCE sur le marché. Contrairement au péage urbain, la recette des achats de PCE de ces usagers bénéficiera directement aux usagers locaux vendeurs de PCE.

<b>Deuxièmement, il convient de détailler les modalités de fonctionnement des PCE.</b>
--

(VI). Le type de PCE à privilégier pour la mobilité urbaine et la lutte contre des nuisances locales est celui qui fera varier le taux de prélèvement des PCE selon un ou plusieurs facteurs, notamment les suivants : l'heure du déplacement, le nombre de déplacements dans un périmètre géographique considéré, la norme de pollution lors de la production du véhicule, le taux d'occupation du véhicule, la distance parcourue et la qualité du service de transport alternatif du point de départ au point d'arrivée.

(VII). Les PCE doivent être millésimés. Ils auront une durée de validité restreinte (pas de *banking*) et seront non-empruntables (pas de *borrowing*). Ces conditions sont

nécessaires pour protéger ce titre de toute spéculation financière indésirable et de tout arbitrage intertemporel de déplacement : "*Use it or lose it*" (Musso et al. (2006) [68]).

(VIII). Afin d'éviter toute spéculation indésirable, un individu ne pourra acheter de PCE supplémentaires que s'il n'en dispose plus suffisamment pour effectuer un déplacement. Nous pouvons par exemple envisager la règle suivante : tout PCE acheté dans le marché ne pourra pas être revendu plus tard.

(IX). Afin d'éviter la naissance d'un marché-tiers incontrôlable, les individus ne doivent pas pouvoir céder directement leurs PCE à d'autres individus sans passer par le marché des PCE.

(X). Deux structures doivent être mises en place. Une première structure, technique, assurera la mise en place et le bon fonctionnement du système. Une seconde structure, physique et numérique, sera un guichet unique accessible aux usagers. Ces usagers s'y reporteront afin d'effectuer les futures opérations courantes (e.g. création d'un compte-usager, échange de PCE, assistance technique et foire aux questions).

**Troisièmement, nous savons que les nouvelles technologies actuelles répondent, sans conteste, aux défis de la faisabilité technique de l'instrument. Les liens qu'elles doivent entretenir avec le système de PCE sont multiples.**

(XI). La virtualité du PCE est une condition initiale nécessaire aux assertions (VII) à (X). Elle assurera la bonne connexion et la fluidité des échanges entre l'Autorité Organisatrice des Mobilités et les usagers. La fluidité et l'intensité des échanges sont une clé du succès du marché des PCE. Les nouvelles technologies apparaissent alors nécessaires pour la création d'une plateforme immatérielle efficace. Cette plateforme permettra à l'individu de s'informer et d'accéder au marché n'importe où et à n'importe quel instant.

(XII). Du côté des autorités, les dispositifs numériques doivent permettre d'informer l'ensemble des citoyens, d'identifier les usagers qui circulent et de prélever les PCE en temps-réel selon un algorithme de tarification (e.g. en fonction du taux d'occupation du véhicule, de l'heure de passage et/ou de la distance parcourue).

(XIII). Du côté des usagers, les dispositifs numériques doivent permettre d'accéder à cette mobilité réglementée, de s'informer sur le fonctionnement du système, de gérer le panier de PCE, d'échanger des PCE sur le marché et de faciliter l'interopérabilité des trajets multimodaux.

(XIV). La numérisation du système ne doit pas laisser pour compte les individus concernés par l'illectronisme et/ou qui ne disposent pas de moyens numériques. Des bureaux-mobilité et/ou des dispositifs dans les commerces de proximité seront nécessaires pour combler cette inégalité. Ils accompagneront sereinement l'ensemble des individus vers cette mobilité urbaine plus soutenable.

(XV). Les nouvelles technologies doivent permettre la stimulation du marché, la gestion automatisée du système, la fluidification et la sécurisation des échanges, mais aussi la modulation des mobilités quotidiennes.

**Quatrièmement, l'échange de permis à circuler est possible dans un marché contrôlé par les autorités compétentes. Les individus doivent pouvoir acheter davantage de permis lorsque leur allocation initiale est consommée. Plusieurs éléments sont à prendre en compte lors de la création du marché.**

(XVI). Le grand nombre d'usagers est une condition favorable à la mise en place d'un marché des PCE. Les PCE doivent donc être alloués dans un périmètre géographique suffisamment large. L'hétérogénéité des agents, notamment de leur valeur du temps et de leur besoin en déplacement dans le périmètre espace-temps-mode restreint, pourra rendre les échanges de permis mutuellement profitables.

(XVII). Le prix des PCE sera d'autant plus dynamique que le nombre d'individus dans le marché sera important, à la condition que ces individus soient actifs sur ce marché. Cette dynamique est conditionnée par la rareté des PCE et conditionnera la spéculation "*désirable et naturelle*" (Brands et al. (2020) [10]) basée sur les anticipations des agents. La quantité allouée de PCE ne devra donc pas être excessive pour qu'il puisse y avoir des échanges sur le marché.

(XVIII). La quantité initiale de PCE à allouer à l'ensemble des individus est pour l'instant difficilement estimable. Nous ne disposons pas de retours d'expériences puisque le système n'a pas encore vu le jour dans nos villes. Cette quantité de PCE devra tout de même être suffisante pour que les individus exercent leur droit à la mobilité minimale.

(XIX). Dans une première phase, celle d'apprentissage du marché, il conviendra de minimiser les erreurs d'anticipation. La quantité globale de PCE détenue par les usagers pour une période déterminée sera maîtrisée par les autorités publiques. Ces dernières ajusteront le prix du PCE sur le marché. Si le nombre de PCE est supérieur à ce qu'il sera nécessaire de consommer pour ne pas dépasser l'objectif quantitatif collectif, alors les autorités décideront d'augmenter le prix des PCE afin de ralentir l'achat de PCE et d'inciter à la vente.

(XX). Dans une seconde phase, celle de maturité du marché, le prix du PCE sera guidé par les lois de l'offre et de la demande de PCE. Les autorités pourront toutefois agir indirectement sur le prix du PCE en modulant la quantité de PCE sur le marché si elles estiment cela nécessaire (e.g. un déséquilibre trop important de l'offre et de la demande de PCE ou une modification de la feuille de route politique guidant la trajectoire de durabilité de la mobilité urbaine).

Cinquièmement, les coûts de transaction – c’est-à-dire de recherche, d’information, de négociation, de décision, de contractualisation, de contrôle et de suivi – sont non-négligeables dans un système de permis (Stavins (1995) [94]). 25 ans après la rédaction de l’article de Stavins, ce constat est toujours d’actualité : nous ne disposons pas de retours d’expériences relatifs au système de PCE. L’évolution des nouvelles technologies nous amène cependant à envisager une baisse de ces coûts.

(XXI). Malgré les bénéfices sociaux du système de PCE par rapport à celui d’un péage urbain, le système de PCE engendre des coûts administratifs plus importants (Dobes (1999) [31]). Avec les PCE, des barrières de péages et une plateforme d’information ne suffisent pas à organiser la mobilité.

(XXII). Les coûts administratifs augmentent d’autant plus que la fréquence d’allocation des PCE est élevée (e.g. quotidienne, hebdomadaire ou mensuelle), le système complexe, le périmètre espace-temps-mode large et flexible, le nombre de receveurs important et les transactions nombreuses (Fan & Jiang (2013) [37]). Cette gestion complexe doit être facilitée par les plateformes numériques qui apporteront automatisation et fluidité dans le fonctionnement courant du système.

(XXIII). La recherche de standards réduira les coûts de mise en place du système et facilitera le déploiement des PCE dans d’autres villes. Les dispositifs techniques devront être applicables à n’importe quelle ville d’un État. Par exemple, un usager lillois et un usager montpelliérain accéderont par le même chemin à la plateforme d’échange mais n’interviendront pas sur le même marché local de PCE.

**Sixièmement, la réussite économique et sociale d'une telle politique est soumise à l'acceptabilité de l'instrument par les usagers, mais aussi par les acteurs économiques de la ville. Des politiques d'accompagnement doivent être menées pour pallier les failles et les déséquilibres du système.**

(XXIV). L'acceptabilité et la faisabilité sociale des PCE sont supérieures à celles du péage urbain en raison du caractère incitatif des PCE. Cette dimension doit être prise en compte en cas d'arbitrage entre les deux instruments.

(XXV). Les PCE sont un instrument méconnu par l'ensemble de la population. Plusieurs campagnes de communication seront nécessaires pour expliquer les bienfaits de la mesure. Il faudra absolument se détacher de la logique de rationnement, renvoyant aux tickets de rationnement du siècle dernier.

(XXVI). Les croyances individuelles relatives aux effets hypothétiques des PCE sur la mobilité urbaine jouent un rôle fondamental dans l'acceptabilité de l'instrument. Une croyance aura d'autant plus d'influence sur l'acceptabilité des PCE que celle-ci concernera une nuisance directement observable par l'individu (e.g. baisse de la congestion). La logique est la même pour une nuisance inobservable, mais où tout le monde s'accordera à dire qu'un instrument de politique publique permettra de résorber cette nuisance (e.g. pollution atmosphérique). Les campagnes de communication doivent donc être ciblées sur les effets bénéfiques des PCE concernant la réduction de ces nuisances.

(XXVII). Les effets d'apprentissage du système permettront de résorber progressivement les paramètres qui détériorent cette acceptabilité, notamment la croyance selon laquelle les PCE nuiront aux déplacements des individus. Cet apprentissage sera alors d'autant plus rapide que le fonctionnement du système de PCE sera simple et que l'information sera délivrée rapidement aux usagers par l'ensemble des supports à leur disposition.

(XXVIII). La restriction des déplacements urbains peut nuire à l'activité économique des centres-villes. Un potentiel effet de relocalisation des activités peut apparaître. Afin que les centres-villes ne soient pas désertés par les entreprises, il est nécessaire que des mesures incitatives combinant consommation des PCE et promotion de l'activité de ces zones soient développées.

(XXIX). Les individus disposant de conditions socioéconomiques favorables ont une propension plus forte à se mettre volontairement à l'écart du marché et à ne pas accepter la mesure. Une attention particulière doit être accordée à ce groupe d'individus afin qu'il puisse continuer à profiter des aménités de la ville et, de fait, à faire profiter de leur consommation à l'économie de la ville.

(XXX). Enfin, et non des moindres, la réussite économique et sociale des PCE est liée à l'existence d'un système de transports alternatifs suffisamment développé et à l'encouragement à la mobilité partagée. Il sera nécessaire de mettre en place des mesures compensatoires en cas d'iniquité (e.g. personnes en situation de handicap nécessitant l'usage de la voiture, véhicules d'urgence, faibles revenus exclus du marché des PCE en tant qu'acheteur, mais aussi habitants excentrés de la ville pour qui il est moins facile pour eux de vendre des permis, relativement aux habitants des centres-villes (Raux & Marlot (2005) [84]).

Les permis à circuler échangeables sont, en quelque sorte, un outil de *Yield Management* de la mobilité. Cet outil s'utilise de la même manière que celui utilisé par les analystes afin d'optimiser le taux de remplissage des trains, des avions ou encore des chambres d'hôtels. Ces analystes régulent l'offre de service par le prix. Nous proposons avec cette thèse de réguler les externalités négatives de la mobilité urbaine par une unité non-monnaire qui rationne les déplacements collectivement nuisibles.

Il existe une prise de conscience collective à l'égard des perspectives pessimistes sur le climat et sur notre planète. Cette conscience écologique occupe un espace grandissant. La victoire des mouvements écologistes dans certaines grandes villes françaises lors des élections municipales de 2020 peuvent en témoigner. Malgré cela, une résistance empêche véritablement le changement des pratiques de mobilité urbaine. La préférence des individus pour le *statu quo* est forte (Raux et al. (2015) [83]). La régulation de la mobilité urbaine par des permis à circuler échangeables devra alors faire l'objet d'une stratégie volontariste des pouvoirs publics en place. Les échéances économiques différeront des échéances politiques.

En définitive, le monde fait face à une crise sanitaire majeure à l'heure de la rédaction de cette conclusion. La pandémie de COVID-19 a contraint certains États à adopter des mesures fortes, notamment en obligeant les citoyens à rester confiner chez eux pour ralentir la propagation du virus et éviter un engorgement des hôpitaux. Une logique de répartition de quotas domestiques non-échangeables de déplacement pourrait réguler les déplacements des individus. Cette planification des déplacements éviterait de mettre à nouveau l'activité économique à l'arrêt si nous devons faire face à une recrudescence de la pandémie. Au-delà de la régulation des effets externes "classiques" de la mobilité urbaine nuisant à la collectivité, une forme hybride de nos permis à circuler pourrait alors répondre à des situations exceptionnelles, comme celle d'une pandémie générant des externalités de contamination.

# Annexes

A Enquête en ligne (1<sup>ère</sup> partie) - Caractéristiques socio-démographiques, profil de mobilité, perception des événements et des politiques publiques de mobilité urbaine



## Enquête : mobilité urbaine et nouvelles technologies

**Madame, Monsieur,**

**Nous vous remercions de votre collaboration à cette enquête. Celle-ci s'inscrit dans le projet MUSE, un projet de recherche d'excellence de l'Université de Montpellier, en partenariat avec Montpellier Méditerranée Métropole, sur le rôle des nouvelles technologies et des plateformes numériques dans les choix de déplacement urbain.**

**Dans le contexte inquiétant du réchauffement climatique, l'objectif de cette enquête est de déterminer les conditions d'acceptabilité de différentes mesures visant à réduire les nuisances collectives telles que les émissions de polluants, la congestion, le bruit, etc.**

**L'enquête, de 10 minutes environ, est composée d'un questionnaire et d'un jeu. Les données de cette enquête seront traitées en toute confidentialité.**

**Quel est votre sexe?**

**\***

Homme

Femme

**Quel âge avez-vous?**

**\***

**Dans quelle catégorie socio-professionnelle vous situez-vous?**

**\***

Agriculteur, exploitant

Artisan, commerçant, chef d'entreprise, profession libérale

Cadre, profession intellectuelle supérieure

Agent de maîtrise, profession intermédiaire

Employé, personnel de service

Ouvrier

Retraité

Etudiant, élève du second degré

Sans emploi

**Quelle est la composition de votre ménage?**



Un ménage est défini comme étant l'ensemble des personnes (apparentées ou non) qui partagent de manière habituelle un même logement et qui ont un budget en commun.

Nombre de personnes de plus de 14 ans, vous y compris	-- ▼
Nombre de personnes de moins de 14 ans	-- ▼

---

**Dans quelle tranche de revenu net mensuel se situe votre ménage ?**

Moins de 2000€

De 2000€ à 4000€

De 4001€ à 6000€

De 6001€ à 8000€

De 8001€ à 10000€

Plus de 10000€

---

**Avez-vous des contraintes familiales de mobilité au quotidien (Déposer les enfants à l'école, son conjoint au travail, ...) ?**



Oui

Non

**Où se situe votre logement?**

**\***

Dans le cœur de ville de Montpellier (Ecusson)

Dans la ville de Montpellier, hors du cœur de ville

Autour de la ville de Montpellier, dans la métropole de Montpellier

Autre

**Où se situe votre lieu de travail ou d'étude?**

**\***

Dans le cœur de ville de Montpellier (Ecusson)

Dans la ville de Montpellier, hors du cœur de ville

Autour de la ville de Montpellier, dans la métropole de Montpellier

Autre

**Quelle distance sépare votre domicile de votre travail / lieu d'étude ?**

**\***

En kilomètres. Pour 500 mètres, vous pouvez écrire 0,5

**Comment jugez-vous vos horaires de travail / d'étude?**

★

**Fixes**

**Flexibles**

**0**

**1**

**2**

**3**

**4**

**5**

**Pour aller à mon travail / à mon lieu d'étude, je varie mes modes de déplacement (voiture, bus, tramway, vélo, transports collectifs, ...) :**

★

**Jamais**

**Tous les jours**

**0**

**1**

**2**

**3**

**4**

**5**

**Quels sont ces modes de déplacement?**

★

Plusieurs réponses possibles.

Voiture particulière

Moto, scooter, ... de moins de 50 cm<sup>3</sup>

Moto, scooter, ... de plus de 50 cm<sup>3</sup>

Transports collectifs urbains

Vélo, trottinette, rollers, ....

Je marche à pied

Train

**Quels modes de déplacement possédez-vous ?**

★

Plusieurs réponses possibles.

<input type="checkbox"/> Voiture personnelle essence, GPL ou diesel
<input type="checkbox"/> Voiture personnelle hybride
<input type="checkbox"/> Voiture personnelle électrique
<input type="checkbox"/> Moto, scooter, ... de moins de 50 cm <sup>3</sup>
<input type="checkbox"/> Moto, scooter, ... de plus de 50 cm <sup>3</sup>
<input type="checkbox"/> Vélo, trottinette, rollers, hoverboard, gyroroue, ...
<input type="checkbox"/> Je n'ai aucun de ces modes de déplacement

**J'utilise ma voiture personnelle...**

★

Jamais					Tous les jours
0	1	2	3	4	5
<input type="radio"/>					

**J'utilise ma moto ou mon scooter...**

★

Jamais					Tous les jours
0	1	2	3	4	5
<input type="radio"/>					

**J'utilise mon vélo, ma trottinette, mes rollers, mon hoverboard, ma gyroroue...**

**★**

**Jamais**

**Tous les jours**

**0**

**1**

**2**

**3**

**4**

**5**

**J'utilise les transports collectifs du réseau TaM de Montpellier...**

**★**

**Jamais**

**Tous les jours**

**0**

**1**

**2**

**3**

**4**

**5**

**Lorsque vous vous déplacez à Montpellier et sa métropole, ressentez-vous :**

**★**

---

	Jamais			Toujours		
	0	1	2	3	4	5
Une perte de temps	<input type="radio"/>					
Une pollution atmosphérique	<input type="radio"/>					
Un danger lié aux comportements des autres citoyens (piétons, cyclistes, motards, automobilistes...)	<input type="radio"/>					
Des difficultés à être informé sur les conditions de déplacement	<input type="radio"/>					
Une responsabilité dans les nuisances collectives	<input type="radio"/>					

---

**Afin de lutter contre les nuisances causées par les déplacements de chacun, seriez-vous favorable à la mise en place des politiques publiques suivantes ?**

	Pas du tout favorable			Tout à fait favorable		
	0	1	2	3	4	5
L'interdiction de circuler aux véhicules les plus polluants	<input type="radio"/>					
Le péage d'accès à une ville	<input type="radio"/>					
La hausse des prix du stationnement	<input type="radio"/>					
La hausse des prix du carburant	<input type="radio"/>					
L'aide à l'achat de véhicules propres	<input type="radio"/>					
L'information CO2	<input type="radio"/>					
L'amélioration du réseau de transport collectif urbain	<input type="radio"/>					
L'amélioration des différentes sources d'information du transport collectif	<input type="radio"/>					
La gratuité des transports collectifs financée par une augmentation des impôts	<input type="radio"/>					

**Si les transports collectifs étaient gratuits, je me ★  
déplacerais en transports collectifs...**

Beaucoup plus, au détriment de l'usage de tous les autres modes

Un peu plus, au détriment de l'usage de tous les autres modes

Autant qu'avant

Un peu moins qu'avant

Beaucoup moins qu'avant

Je ne sais pas

---

**B Enquête en ligne (2<sup>nde</sup> partie) -  
Ludification des PCE, acceptabi-  
lité et croyances sur leurs effets**

Voici à présent un jeu. La municipalité vous donne une quantité de jetons électroniques pour une semaine. Ces jetons vous permettent de circuler en automobile, moto ou scooter à Montpellier.

Le nombre de jetons à utiliser est différent selon le jour de la semaine. Les jetons utilisés permettent de circuler en ville **toute la journée**.

Vous pouvez consommer ou revendre vos jetons à la municipalité. Vous pouvez aussi lui en acheter davantage.

Tout jeton non-consommé ou invendu est définitivement perdu **au bout de deux semaines**.

Le fait d'utiliser un tout autre mode de déplacement (Transports collectifs, vélo, . . .) ne nécessite pas l'utilisation de jetons.

Ce principe est connu sous le nom de **permis à circuler échangeables**.

**En avez-vous déjà entendu parler ?**

**\***

Oui

Non

Pour mieux comprendre le fonctionnement de ces jetons, nous vous présentons TaMara, cheffe d'entreprise dans le centre-ville de Montpellier et résidant à l'extérieur de Montpellier.

**Si TaMara décide de se déplacer dans la ville de Montpellier...**

- ... **du lundi au vendredi** en automobile, moto ou scooter, cela lui coûtera 2 jetons pour la journée.
- ... **samedi** en automobile, moto ou scooter, cela lui coûtera 1 jeton pour la journée.
- ... **dimanche** en automobile, moto ou scooter, elle n'aura aucun jeton à dépenser.
- ... à pied, en transports collectifs, en vélo, en trottinette, etc., elle n'aura aucun jeton à dépenser **quel que soit le jour de déplacement**.

A la mise en place de ce système, la municipalité alloue **7 jetons** à chacun des usagers.

Voici une semaine-type de TaMara :

Jour de la semaine	Motif de déplacement	Mode de déplacement	Jetons à consommer
Lundi	Travail	Voiture	2
Mardi	Travail	Voiture	2
Mercredi	Travail	Transports collectifs	0
Jeudi	Travail	Voiture	2
Vendredi	Travail	Voiture	2
Samedi	Shopping en famille	Voiture	1
Dimanche	Repas en famille	Aucun	0

TaMara a donc besoin de 9 jetons dans la semaine pour se déplacer. Sachant qu'elle ne possède que 7 jetons, elle peut acheter les deux jetons qui lui manquent, ou bien modifier ses comportements de mobilité (Changer de moyen de déplacement, aller ailleurs que dans la ville de Montpellier pour faire des achats le samedi, ...).

*Voici un petit test afin de voir si vous avez compris les principes du jeu.*

**Pour se rendre à son lieu de travail, TaMara décide d'utiliser les transports collectifs. Elle devra alors utiliser :** ★

Aucun jeton

Un jeton

Deux jetons

**Jeudi, TaMara décide d'utiliser sa voiture. Elle devra alors utiliser :** ★

Aucun jeton

Un jeton

Deux jetons

**Samedi, TaMara décide d'utiliser sa voiture. Elle devra alors utiliser :** ★

Aucun jeton

Un jeton

Deux jetons

**A la fin de la première semaine, il reste à TaMara deux jetons. Elle peut les utiliser :** ★

Jusqu'à la fin de la semaine suivante

Jusqu'à la fin du mois en cours

Jusqu'à la fin de l'année

Voici un rappel de la règle de prélèvement des jetons en fonction du jour où l'utilisateur souhaite circuler en automobile, moto ou scooter dans la ville de Montpellier :

Du lundi au vendredi	2 jetons par jour
Samedi	1 jeton pour la journée
Dimanche	0 jeton pour la journée

Si l'utilisateur décide de se déplacer par un autre moyen (Marche, tramway, bus, vélo, trottinette, ...), aucun jeton n'est nécessaire quel que soit le jour du déplacement.

**A vous !**

**Afin de conserver vos propres habitudes de déplacement, ★  
combien de jetons par semaine auriez-vous besoin pour  
vous déplacer dans la ville de Montpellier?**

---

0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
<input type="radio"/>											

---

**Supposons qu'il vous manque un jeton pour conserver ★  
vos habitudes de déplacement pour toute une semaine.**

**Êtes-vous prêt à payer 1,60€ le jeton, ce prix étant  
équivalent au ticket pour un voyage en transports  
collectifs sur tout le réseau de la TaM?**

<input type="radio"/> Oui
<input type="radio"/> Non

---

**Êtes-vous prêt à payer 3€ le jeton ?**

**\***

Oui

Non

---

**Êtes-vous prêt à payer 4,30€ le jeton, ce prix correspondant au ticket permettant de se déplacer de manière illimitée sur le réseau TaM pour une journée ?**

**\***

Oui

Non

---

**Êtes-vous prêt à payer 1€ le jeton ?**

**\***

Oui

Non

---

**Êtes-vous prêt à payer 0,50€ le jeton, ce prix correspondant au tarif d'une heure de vélo en libre-service Velomagg ?**

**\***

Oui

Non

---

**Êtes-vous prêt à payer pour acquérir le jeton qui vous manque ? \***

Oui

Non

---

**Combien êtes-vous prêt à payer le jeton qui vous manque ? \***

En euros. Pour 25 centimes, vous pouvez écrire 0,25.

À cette page, nous prenons l'exemple d'un individu ayant une DmP égale à 1,60€.

Nous sommes en hiver. La météo annonce une semaine froide et pluvieuse. Beaucoup d'usagers veulent acheter des jetons, ce qui implique une hausse du prix du jeton. Le prix d'un jeton est maintenant de 3,60€. \*

**Vous ne pouvez pas reporter les événements de votre semaine, et il vous manque un seul jeton pour conserver vos habitudes de déplacement.**

**Que faites-vous?**

- J'achète le jeton me permettant de conserver mes habitudes de déplacement
- Je n'achète pas le jeton qu'il me faut et j'opte pour les transports collectifs, le vélo, la marche à pied....
- Je profite de cette hausse du prix pour vendre des jetons

**Dans ce cas, combien de jetons vendez-vous? \***

(en jetons)

**Maintenant, vous avez un jeton en trop que vous pouvez vendre.** \*

**Êtes-vous prêt à le céder pour 1,60€, ce prix étant équivalent au ticket pour un voyage en transports collectifs sur le réseau de la TaM?**

Oui

Non

---

**Êtes-vous prêt à le céder pour 1€ ?** \*

Oui

Non

---

**Êtes-vous prêt à le céder pour 0,50€, ce prix correspondant au tarif d'une heure de vélo en libre-service Velomag ?** \*

Oui

Non

---

**Êtes-vous prêt à donner le jeton à titre gratuit ?** \*

Oui

Non

---

**Êtes-vous prêt à le céder pour 3€ ?** \*

Oui

Non

**Êtes-vous prêt à le céder pour 4,30€, ce prix **\***  
correspondant au ticket permettant de se déplacer de  
manière illimitée sur le réseau TaM pour une journée ?**

Oui

Non

---

**Êtes-vous prêt à céder le jeton pour un montant plus **\***  
élevé ?**

Oui

Non

---

**Pour quel montant êtes-vous prêt à céder le jeton en trop? **\*****

En euros. Pour 25 centimes, vous pouvez écrire 0,25.

---

À cette page, nous prenons l'exemple d'un individu ayant une DmR égale à 5€.

Nous sommes au printemps. La météo annonce un temps ensoleillé. Peu d'utilisateurs achètent des jetons, ce qui implique une baisse de prix du jeton. Le prix d'un jeton s'élève maintenant à la moitié de 5 €. \*

Vous ne pouvez pas reporter les événements de votre semaine, et vous possédez ce jeton en trop.

Que faites-vous ?

- Je vends mon jeton en trop maintenant
  - J'attends la semaine prochaine pour le consommer ou le vendre, au risque de le vendre moins cher (ou plus cher)
  - Je profite de la baisse du prix pour acheter davantage de jetons.
-

**Si le système de permis à circuler échangeables existait à Montpellier... \***

Déplacez les curseurs pour répondre, la position 5 étant la position neutre.

	Beaucoup moins					Beaucoup plus						
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
Je pratiquerais le covoiturage urbain afin de partager la dépense de jetons						<input type="checkbox"/>						
J'utiliserais ma voiture, ma moto ou mon scooter pendant la semaine						<input type="checkbox"/>						
J'utiliserais ma voiture, ma moto ou mon scooter pendant le week-end						<input type="checkbox"/>						
J'utiliserais les transports collectifs						<input type="checkbox"/>						
Je marcherais et/ou j'utiliserais mon vélo, ma trottinette, ...						<input type="checkbox"/>						

**Hormis dans un cadre professionnel ou scolaire, si un tel système existait, je viendrais à Montpellier... \***

Déplacez le curseur pour répondre.

Beaucoup moins

Beaucoup plus

**Pensez-vous que les permis à circuler échangeables puissent...**

	Pas du tout				Tout à fait	
	0	1	2	3	4	5
Réduire la congestion automobile	<input type="radio"/>					
Réduire la pollution atmosphérique	<input type="radio"/>					
Diminuer le prix du carburant	<input type="radio"/>					
Diminuer le prix du stationnement	<input type="radio"/>					
Nuire à votre droit à la mobilité	<input type="radio"/>					

**S'il devait y avoir un référendum pour la question suivante** ★  
**: "Seriez-vous pour ou contre la mise en place des permis à circuler échangeables dans la ville", répondez-vous :**

- Pour
- Contre
- Ne se prononce pas

**S'il devait y avoir un référendum pour la question suivante** ★  
**: "Seriez-vous pour ou contre la mise en place d'un péage d'accès à la ville", répondez-vous :**

- Pour
- Contre
- Ne se prononce pas

**S'il devait y avoir un référendum pour la question suivante \*  
: "Quel instrument de politique publique préférez-vous  
que votre ville mette en place", répondriez-vous :**

Les permis à circuler échangeables

Le péage d'accès à la ville

Ne se prononce pas

---

**Nous vous remercions d'avoir répondu à ce questionnaire !**

# C Présentation de l'échantillon de l'enquête en ligne

## C.1 Profil socio-démographique des individus

Variable	Valeur	Variable	Valeur
<b>Sexe</b>		<b>Catégorie socioprofessionnelle</b>	
Homme	40%	Agriculteur exploitant	1%
Femme	60%	Artisan, commerçant . . .	3%
<b>Âge</b>		Cadre, PI+	24%
18-24	43%	PI intermédiaire	5%
25-39	36%	Employé	15%
40-54	14%	Ouvrier	1%
55-64	5%	Retraité	3%
65 et +	2%	Etudiant	40%
<b>Composition moyenne du ménage</b>		Sans emploi	8%
+ 14 ans	1.77		
- 14 ans	0.30		

Profil socio-démographique des individus (N=512)

PI : professions intellectuelles ; PI+ : professions intellectuelles supérieures

Le tableau ci-dessus expose les caractéristiques socio-démographiques des 512 individus de notre échantillon. L'échantillon est composé majoritairement de femmes, dans des proportions relativement proches de celles que l'on peut trouver dans les chiffres de l'INSEE pour la métropole de Montpellier (INSEE (2019) [51]) ou l'aire urbaine de Montpellier (INSEE (2020) [52]). La taille du ménage est d'environ 2 personnes. Cette statistique est également proche de celle de la population pour les deux zones précédemment indiquées.

Le panorama des âges de la population de la métropole et de l'aire urbaine de Montpellier n'est pas reflété dans notre échantillon. Un test de représentativité de l'échantillon n'est pas utile pour se rendre compte du phénomène. Toutefois, notre échantillon présente une des caractéristiques populaires de la ville de Montpellier : une population jeune et étudiante. Ce fait observable dans notre enquête peut être

lié au fait que l'enquête fut uniquement diffusée en ligne, sur des canaux majoritairement et plus fréquemment utilisés par les jeunes générations.

## C.2 Profil de localisation & mobilité des individus

### C.2.1 Profil de localisation

La localisation des individus a été divisée en 4 zones :

- **L'Écusson.** C'est le centre historique de la ville de Montpellier. On y retrouve les 4 lignes de tramway et les principales lignes de bus de la ville. La gare de Montpellier St-Roch se situe à la périphérie de cette zone, tout comme deux parkings municipaux. Cette zone est dominée par les modes "doux" et les transports collectifs. L'usage de la voiture particulière y est très contraignant.
- **La ville de Montpellier, à l'exception de l'Écusson.** La zone est délimitée au nord par le parc zoologique de la ville, au sud par la zone d'aménagement concerté (ZAC) Tournezy, à l'ouest par le quartier Mosson / La Paillade, et à l'est par le quartier Millénaire-Grammont et la zone commerciale Odysseum.
- **L'ensemble de la métropole de Montpellier (Montpellier Méditerranée Métropole - M3M), à l'exception de la ville de Montpellier.** Créée en janvier 2015, M3M est composée de 31 communes. La ville de Montpellier en est le siège. 30 communes sont donc réparties autour de cette ville.
- **Toute autre localisation n'appartenant pas aux 3 zones précédentes.** La métropole de Montpellier attire des actifs au-delà de ses frontières par son influence économique. Nous pouvons évoquer des agglomérations proches et de plus petite taille, telles que Sète, Nîmes, Agde, etc. Des communes très proches de la ville de Montpellier, mais dans des communautés d'agglomération différentes de M3M, sont également considérées : Palavas-les-Flots, La

Grande Motte, Aigues-Mortes, Le Grau-du-Roi, Mauguio, Frontignan, Lunel, etc.

Le tableau ci-dessous indique les proportions d'individus selon leur lieu de domicile. Les individus ayant répondu à l'enquête vivent, pour la plupart, dans la ville de Montpellier (74 %). Parmi eux, environ 84% vivent en dehors de l'Écusson. D'un point de vue global, 93% des individus vivent dans M3M. Les individus vivant ailleurs (7%) résident dans les départements de l'Hérault et du Gard, dans un rayon de 50 km autour de la ville de Montpellier.

<b>Variable</b>	<b>Valeur</b>
<b>Localisation</b>	
Dans le cœur de ville de Montpellier (Écusson)	12%
Dans la ville de Montpellier, hors de l'Écusson	62%
Dans M3M, hors de la ville de Montpellier	19%
Ailleurs	7%

Profil de localisation des individus (N=512)  
M3M : Montpellier Méditerranée Métropole

### C.2.2 Taux de possession et usage de véhicules

Le tableau suivant indique le taux de possession des modes de déplacement des individus de notre échantillon. En deçà de l'équipement automobile moyen des ménages (INSEE (2019) [51]; INSEE (2020) [52]), le taux de possession de la voiture particulière gravite autour des 60%. La prédominance d'individus jeunes et étudiants dans la base de données est un facteur explicatif de ce faible taux de possession de la voiture particulière. Cette catégorie de la population se distingue actuellement par son aisance à l'usage des technologies et son intérêt à l'accès plutôt qu'à la possession de moyens matériels. Partant, ces jeunes, pour la majorité vivant dans la zone urbaine, retardent leur date de passage du permis de conduire (DRIEA (2010) [30]).

Leur mobilité devient ainsi servicielle. Elle redevient, sous certains aspects, individuelle. Cet effet s'explique par la possibilité d'accès à différents modes individuels de déplacement au travers de plateformes supportées par les NTIC. Il n'est donc pas surprenant que 27% des individus de notre base de données ne possèdent aucun mode de déplacement. Ces aspects de modernité, ici dans la mobilité, sont l'un des principaux caractères de ce que qualifient Colin & Verdier (2012) [19] de "*Nouvel Art de la Guerre Economique*".

Modes	Valeur
<b>Voiture personnelle</b>	
– Essence, GPL, diésel	60%
– Electrique	1%
– Hybride	1%
<b>Moto, scooter ...</b>	
– ... de moins de 50 cm <sup>3</sup>	1%
– ... de plus de 50 cm <sup>3</sup>	5%
<b>Vélo, trottinette, rollers, hoverboard, gyroroue ...</b>	38%
<b>Aucun</b>	27%

Taux de possession des modes de déplacement des individus de l'échantillon  
(N=512)

À l'aide du tableau suivant, nous remarquons que la captivité pour la voiture personnelle n'est pas plus forte que la captivité vis-à-vis des autres modes. Les transports collectifs sont plus fréquemment utilisés que les autres modes de déplacement. Ce mode de déplacement est le seul qui est accessible à l'ensemble de la population pour effectuer des trajets que la marche-à-pied ne saurait couvrir durablement. Par ailleurs, la configuration du centre-ville de Montpellier contraint fortement l'usage et

le stationnement de la voiture individuelle. Cette contrainte rend nécessaire l'usage des autres modes de déplacement pour des trajets urbains.

La captivité à l'usage des modes "doux" alternatifs (i.e. vélo, trottinette, rollers ...) est également forte. Les raisons peuvent être une prise de conscience écologique, une incitation économique ou un effet de mode relatif aux nouveaux modes de transport alternatifs.

Modes	Valeur
Voiture personnelle	2,81
Moto, scooter ...	2,37
Vélo, trottinette, rollers ...	2,87
Transports collectifs	2,91

Captivité moyenne à un mode de déplacement (N=512)  
Échelle allant de 0 (pas d'utilisation) à 5 (utilisation quotidienne)

### C.2.3 Profil de mobilité des travailleurs

Logement \ Travail					
	Écusson	Ville hors Écusson	M3M hors Mtp.	Ailleurs	Total
Écusson	3%	7%	2%	0%	12%
Ville hors Écusson	9%	40%	10%	3%	62%
M3M hors Mtp.	2%	9%	6%	1%	19%
Ailleurs	1%	3%	2%	1%	7%
Total	15%	59%	21%	5%	100%

Proportion des trajets domicile/travail (N=457)  
M3M : Montpellier Méditerranée Métropole; Mtp. : Montpellier

Le tableau ci-dessus rend compte du fait que la majorité des individus de l'échantillon travaille dans la ville de Montpellier, en dehors de l'Écusson (59%). C'est dans cette même zone que les travailleurs vivent en majorité (62%). C'est aussi là que les trajets domicile-travail intra-urbains sont les plus fréquents (40%). Parmi les répon-

dants qui vivent ailleurs, une large partie travaille à Montpellier ou M3M (environ 86%).

Enfin, nous constatons une forte inertie modale des déplacements dans le tableau ci-dessous. 62% utilisent toujours, ou presque, le même mode de déplacement dans la ville de Montpellier. Bien que les nouvelles technologies apportent de manière pléthorique de l'information aux individus pour optimiser leur mobilité, leurs choix de déplacement restent guidés par les habitudes. En effet, les repères dans l'espace et dans le temps sont d'importants facteurs explicatifs à propos de l'utilisation d'un mode de déplacement. Farag et Lyons (2012) [38] ont stipulé que l'information-mobilité est davantage utilisée lorsque le trajet n'est pas habituel pour l'utilisateur. Il en est de même pour les trajets habituels, à la condition qu'un incident survienne sur le trajet ou bien qu'un projet infrastructurel voie le jour. L'optimisation des trajets habituels n'est donc pas effectuée lors de chaque déplacement.

<b>Variable</b>	<b>Valeur</b>
0-1	62%
2-3	23%
4-5	15%

Variété de l'usage des différents modes de déplacement (N=457)  
Échelle allant de 0 (Pas de variété) à 5 (Variété quotidienne)

# D Dispositions marginales à payer - Ludification des PCE

DmP	Nombre d'individus	Demande cumulée partielle (A)	Individus toujours acheteurs à DmP + 2€	Individus toujours acheteurs à DmP + 2€ (en %, par niveau de prix)	Individus supplémentaires par niveau de prix (B)	Demande affinée (A) + (B)
- €	68	277	27	40%	-27	250
0,01 €	1	209	0	0%	0	209
0,20 €	1	208	0	0%	0	208
0,25 €	1	207	0	0%	0	207
0,50 €	17	206	7	41%	0	206
0,80 €	0	189			7	196
1,00 €	30	189	5	17%	7	196
1,50 €	0	159			12	171
1,60 €	120	159	42	35%	12	171
2,00 €	0	39			54	93
2,15 €	0	39			54	93
2,50 €	0	39			54	93
3,00 €	22	39	11	50%	47	86
3,60 €	0	17			53	70
4,30 €	1	17	1	100%	11	28
4,50 €	1	16	0	0%	12	28
4,60 €	0	15			12	27
5,00 €	6	15	3	50%	12	27
6,00 €	2	9	2	100%	4	13
6,30 €	0	7			6	13
7,00 €	1	7	1	100%	5	12
8,00 €	0	6			3	9
8,30 €	0	6			1	7
9,00 €	0	6			1	7
10,00 €	3	6	3	100%	0	6
12,00 €	0	3			3	6
15,00 €	1	3	1	100%	0	3
17,00 €	0	2	2	100%	1	3
25,00 €	2	2	2	100%	0	2
27,00 €	0	0			2	2
30,00 €	0	0			0	0

NB : la valeur dans la cellule blanche renvoie au retrait, dans l'ensemble du jeu sérieux, des individus allant à l'encontre de la logique cognitive.

**E Dispositions marginales à recevoir**  
**- Ludification des PCE**

DmR	Nombre d'individus	Offre cumulée partielle (A)	Individus toujours vendeurs à 0,5xDmR	Individus toujours vendeurs à 0,5.DmR (en %, par niveau de prix)	Individus supplémentaires par niveau de prix (B)	Offre affinée (A) + (B)
- €	61	61	x	x	0	61
0,01 €	0	61			0	61
0,20 €	0	61			0	61
0,25 €	0	61			7	68
0,50 €	30	91	7	23%	19	110
0,80 €	0	91			34	125
1,00 €	54	145	19	35%	15	160
1,50 €	0	145			16	161
1,60 €	49	194	15	31%	1	195
2,00 €	0	194			1	195
2,15 €	0	194			1	195
2,50 €	0	194			1	195
3,00 €	16	210	1	6%	0	210
3,60 €	0	210			0	210
4,30 €	6	216	0	0%	0	216
4,50 €	0	216			0	216
4,60 €	0	216			0	216
5,00 €	1	217	0	0%	0	217
6,00 €	0	217			0	217
6,30 €	0	217			0	217
7,00 €	0	217			0	217
8,00 €	0	217			0	217
8,30 €	0	217			0	217
9,00 €	0	217			0	217
10,00 €	4	221	0	0%	0	221
12,00 €	0	221			0	221
15,00 €	0	221			0	221
17,00 €	0	221			0	221
25,00 €	0	221			0	221
27,00 €	0	221			0	221
30,00 €	0	221			0	221

# F Effets des PCE sur le trafic routier

## - Ludification des PCE

Prix PCE	Demande affinée	Offre affinée	PCE vendus (A)	Nombre de voyages avant la mise en place des PCE (B)	Nombre de voyages après la mise en place des PCE (C) (C) = (B)-(250-(A))	Annulation de déplacements en mode "lourd" 1 - (C/B)
- €	250	61	61	876	687	21,58%
0,01€	209	61	61	876	687	21,58%
0,20€	208	61	61	876	687	21,58%
0,25€	207	68	68	876	694	20,78%
0,50€	206	110	110	876	736	15,98%
0,80€	196	125	125	876	751	14,27%
1,00€	196	160	160	876	786	10,27%
1,50€	171	161	161	876	787	10,16%
1,53€	171	171	171	876	797	9,02%
1,60€	171	195	171	876	797	9,02%
2,00€	93	195	93	876	719	17,92%
2,15€	93	195	93	876	719	17,92%
2,50€	93	195	93	876	719	17,92%
3,00€	86	210	86	876	712	18,72%
3,60€	70	210	70	876	696	20,55%
4,30€	28	216	28	876	654	25,34%
4,50€	28	216	28	876	654	25,34%
4,60€	27	216	27	876	653	25,46%
5,00€	27	217	27	876	653	25,46%
6,00€	13	217	13	876	639	27,05%
6,30€	13	217	13	876	639	27,05%
7,00€	12	217	12	876	638	27,17%
8,00€	9	217	9	876	635	27,51%
8,30€	7	217	7	876	633	27,74%
9,00€	7	217	7	876	633	27,74%
10,00€	6	221	6	876	632	27,85%
12,00€	6	221	6	876	632	27,85%
15,00€	3	221	3	876	629	28,20%
17,00€	3	221	3	876	629	28,20%
25,00€	2	221	2	876	628	28,31%
27,00€	2	221	2	876	628	28,31%
30,00€	0	221	0	876	626	28,54%

NB : les valeurs dans les cellules vertes ont été obtenues par interpolation linéaire.

G Population de 15 ans et plus par sexe, âge et catégorie socioprofessionnelle dans l'aire urbaine de Montpellier (INSEE (2020) - Recensement de la population de 2016)

Femmes	Agriculteurs exploitants	Artisans, commerçants, chefs d'entreprise	Cadres et professions intellectuelles supérieures	Professions intermédiaires	Employés	Ouvriers	Retraités	Autres personnes sans activité professionnelle	Total
15 à 19 ans	0	49	10	252	1232	252	0	19032	20829
20 à 24 ans	10	178	957	3391	6540	975	0	15994	28046
25 à 39 ans	74	1645	10383	18651	20316	2068	4	10027	63170
40 à 54 ans	190	2605	10365	16434	20039	2054	300	7361	59348
55 à 64 ans	119	935	4256	5843	8095	880	10463	5935	36525
65 ans et plus	29	189	359	404	428	66	52639	4518	58632
<b>Total</b>	<b>423</b>	<b>5602</b>	<b>26331</b>	<b>44976</b>	<b>56649</b>	<b>6295</b>	<b>63406</b>	<b>62868</b>	<b>266550</b>

Hommes	Agriculteurs exploitants	Artisans, commerçants, chefs d'entreprise	Cadres et professions intellectuelles supérieures	Professions intermédiaires	Employés	Ouvriers	Retraités	Autres personnes sans activité professionnelle	Total
15 à 19 ans	20	61	25	322	551	1420	0	18239	20638
20 à 24 ans	37	343	1192	3022	3111	4210	0	14205	26119
25 à 39 ans	195	4338	12408	15189	9323	13681	13	6222	61368
40 à 54 ans	475	6797	14010	12656	6374	11525	163	4005	56005
55 à 64 ans	364	2684	6333	4400	2062	3209	9191	2401	30645
65 ans et plus	85	390	973	374	131	260	40758	641	43612
<b>Total</b>	<b>1175</b>	<b>14613</b>	<b>34942</b>	<b>35962</b>	<b>21552</b>	<b>34305</b>	<b>50124</b>	<b>45713</b>	<b>238387</b>

Ensemble	Agriculteurs exploitants	Artisans, commerçants, chefs d'entreprise	Cadres et professions intellectuelles supérieures	Professions intermédiaires	Employés	Ouvriers	Retraités	Autres personnes sans activité professionnelle	Total
15 à 19 ans	20	110	36	574	1783	1672	0	37271	41467
20 à 24 ans	47	521	2150	6413	9651	5185	0	30199	54165
25 à 39 ans	270	5983	22791	33840	29639	15749	17	16249	124538
40 à 54 ans	665	9402	24375	29090	26413	13579	463	11366	115353
55 à 64 ans	483	3619	10589	10243	10156	4089	19655	8336	67170
65 ans et plus	114	579	1332	778	559	326	93397	5159	102244
<b>Total</b>	<b>1598</b>	<b>20214</b>	<b>61273</b>	<b>80938</b>	<b>78201</b>	<b>40600</b>	<b>113531</b>	<b>108582</b>	<b>504937</b>

# H Poids des individus - Généralisation des résultats de la ludification

	<b>n</b>	<b>N</b>	<b>p</b>		<b>n</b>	<b>N</b>	<b>p</b>
<b>011</b>	1	0	0	<b>051</b>	2	1232	616
<b>012</b>	0	10	0	<b>052</b>	13	6540	503
<b>013</b>	1	74	74	<b>053</b>	24	20316	846
<b>014</b>	0	190	0	<b>054</b>	8	20039	2504
<b>015</b>	0	119	0	<b>055</b>	4	8095	2023
<b>016</b>	0	29	0	<b>056</b>	0	428	0
<b>021</b>	0	49	0	<b>061</b>	0	252	0
<b>022</b>	1	178	178	<b>062</b>	0	975	0
<b>023</b>	3	1645	548	<b>063</b>	1	2068	2068
<b>024</b>	2	2605	1302	<b>064</b>	1	2054	2054
<b>025</b>	1	935	935	<b>065</b>	0	880	0
<b>026</b>	0	189	0	<b>066</b>	0	66	0
<b>031</b>	0	10	0	<b>071</b>	0	0	0
<b>032</b>	6	957	159	<b>072</b>	0	0	0
<b>033</b>	24	10383	432	<b>073</b>	0	4	0
<b>034</b>	10	10365	1036	<b>074</b>	0	300	0
<b>035</b>	3	4256	1418	<b>075</b>	3	10463	3487
<b>036</b>	0	359	0	<b>076</b>	5	52639	10527
<b>041</b>	0	252	0	<b>081</b>	21	19032	906
<b>042</b>	1	3391	3391	<b>082</b>	96	15994	166
<b>043</b>	7	18651	2664	<b>083</b>	33	10027	303
<b>044</b>	2	16434	8217	<b>084</b>	3	7361	2453
<b>045</b>	1	5843	5843	<b>085</b>	2	5935	2967
<b>046</b>	0	404	0	<b>086</b>	0	4518	0

**n** : nombre d'individus dans l'échantillon  
**N** : nombre d'individus dans la population  
**p** = (N/n) : poids d'un individu de l'échantillon

**Variable : Sexe**

**0xx** : Femme  
**1xx** : Homme

**Variable : CSP**

**x1x** : Agriculteurs exploitants  
**x2x** : Artisans, commerçants, chefs d'entreprise  
**x3x** : Cadres et professions intellectuelles supérieures  
**x4x** : Professions intermédiaires  
**x5x** : Employés  
**x6x** : Ouvriers  
**x7x** : Retraités  
**x8x** : Autres personnes sans activité professionnelle

**Variable : Âge**

**xx1** : de 15 à 19 ans  
**xx2** : de 20 à 24 ans  
**xx3** : de 25 à 39 ans  
**xx4** : de 40 à 54 ans  
**xx5** : de 55 à 64 ans  
**xx6** : 65 ans et plus

	<b>n</b>	<b>N</b>	<b>p</b>		<b>n</b>	<b>N</b>	<b>p</b>
<b>111</b>	0	20	0	<b>151</b>	0	551	0
<b>112</b>	0	37	0	<b>152</b>	3	3111	1037
<b>113</b>	0	195	0	<b>153</b>	9	9323	1035
<b>114</b>	0	475	0	<b>154</b>	5	6374	1274
<b>115</b>	0	364	0	<b>155</b>	0	2062	0
<b>116</b>	0	85	0	<b>156</b>	0	131	0
<b>121</b>	0	61	0	<b>161</b>	0	1420	0
<b>122</b>	1	343	343	<b>162</b>	2	4210	2105
<b>123</b>	3	4338	1446	<b>163</b>	0	13681	0
<b>124</b>	0	6797	0	<b>164</b>	1	11525	11525
<b>125</b>	1	2684	2684	<b>165</b>	0	3209	0
<b>126</b>	0	390	0	<b>166</b>	0	260	0
<b>131</b>	0	25	0	<b>171</b>	0	0	0
<b>132</b>	5	1192	238	<b>172</b>	0	0	0
<b>133</b>	38	12408	326	<b>173</b>	0	13	0
<b>134</b>	26	14010	538	<b>174</b>	1	163	163
<b>135</b>	2	6333	3166	<b>175</b>	1	9191	9191
<b>136</b>	0	973	0	<b>176</b>	6	40758	6793
<b>141</b>	0	322	0	<b>181</b>	11	18239	1658
<b>142</b>	1	3022	3022	<b>182</b>	42	14205	338
<b>143</b>	3	15189	5063	<b>183</b>	21	6222	296
<b>144</b>	7	12656	1808	<b>184</b>	0	4005	0
<b>145</b>	1	4400	4400	<b>185</b>	2	2401	1200
<b>146</b>	0	374	0	<b>186</b>	0	641	0

**n** : nombre d'individus dans l'échantillon

**N** : nombre d'individus dans la population

**p** = (N/n) : poids d'un individu de l'échantillon

**Variable : Sexe**

**0xx** : Femme

**1xx** : Homme

**Variable : CSP**

**x1x** : Agriculteurs exploitants

**x2x** : Artisans, commerçants, chefs d'entreprise

**x3x** : Cadres et professions intellectuelles

supérieures

**x4x** : Professions intermédiaires

**x5x** : Employés

**x6x** : Ouvriers

**x7x** : Retraités

**x8x** : Autres personnes sans activité professionnelle

**Variable : Âge**

**xx1** : de 15 à 19 ans

**xx2** : de 20 à 24 ans

**xx3** : de 25 à 39 ans

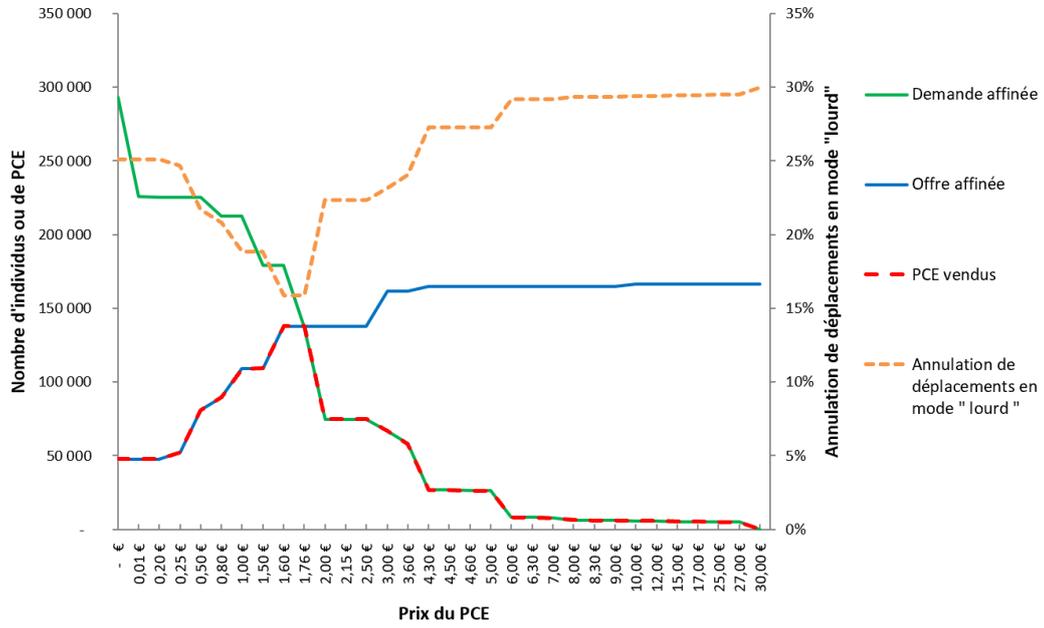
**xx4** : de 40 à 54 ans

**xx5** : de 55 à 64 ans

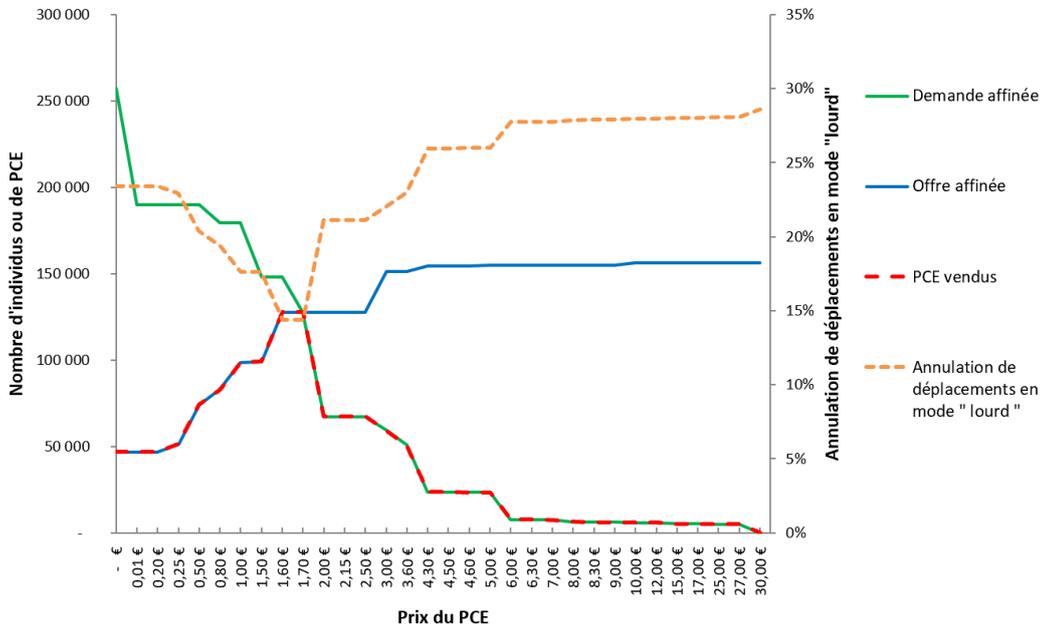
**xx6** : 65 ans et plus

# I Simulations des courbes d'offre et de demande - Généralisation des résultats de la ludification

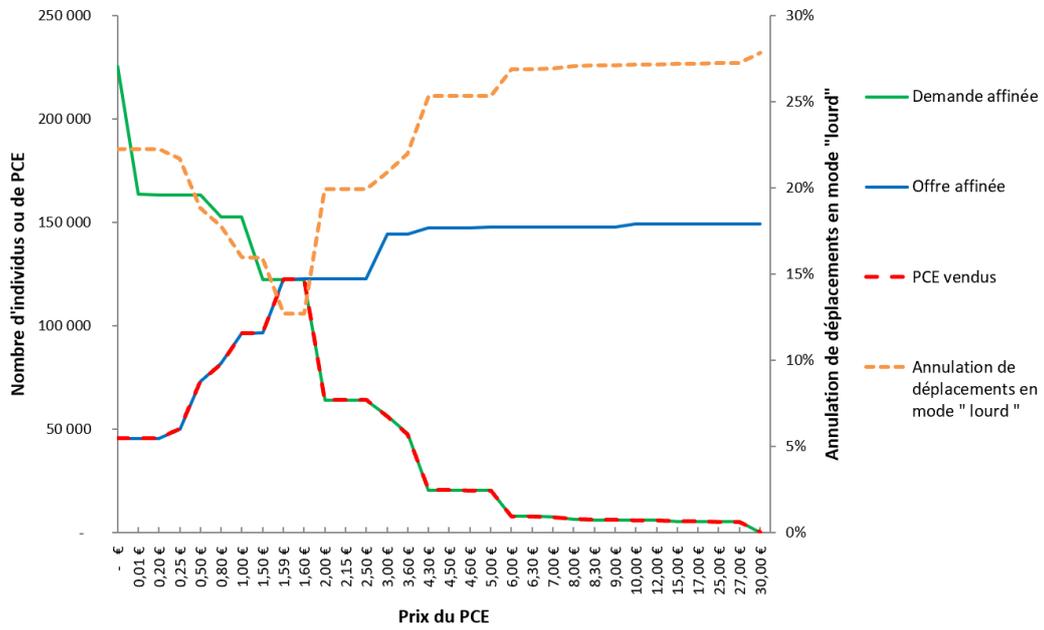
### Simulation 1



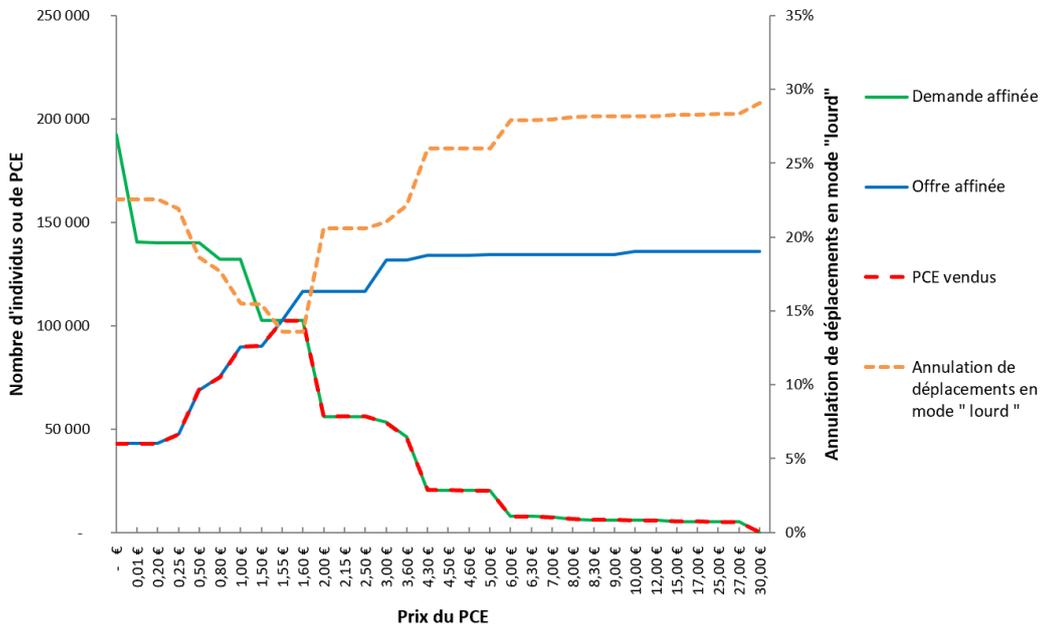
### Simulation 2



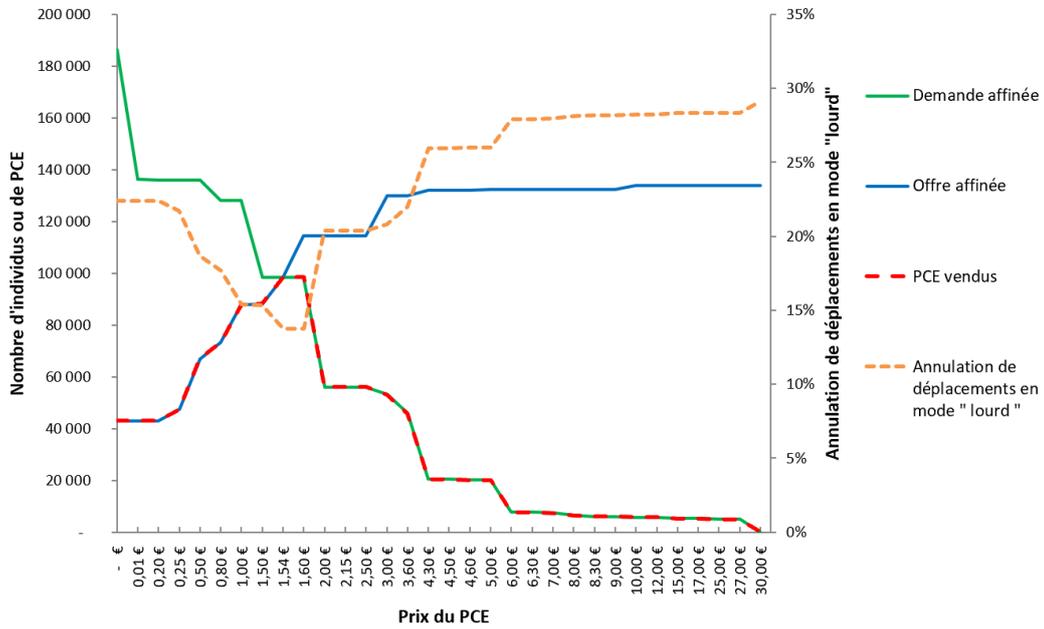
### Simulation 3



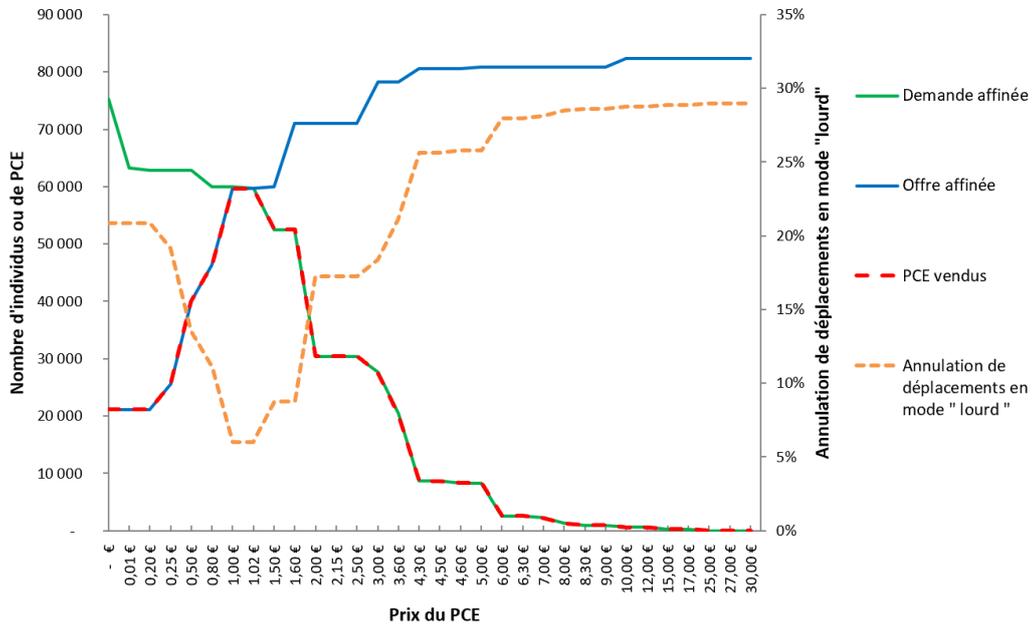
### Simulation 4



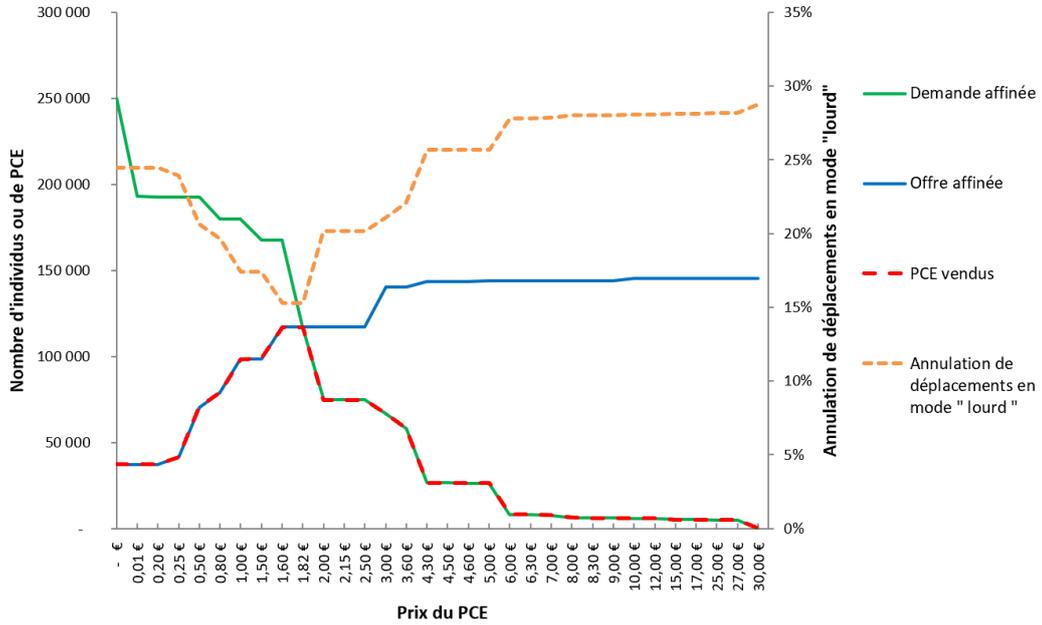
### Simulation 5



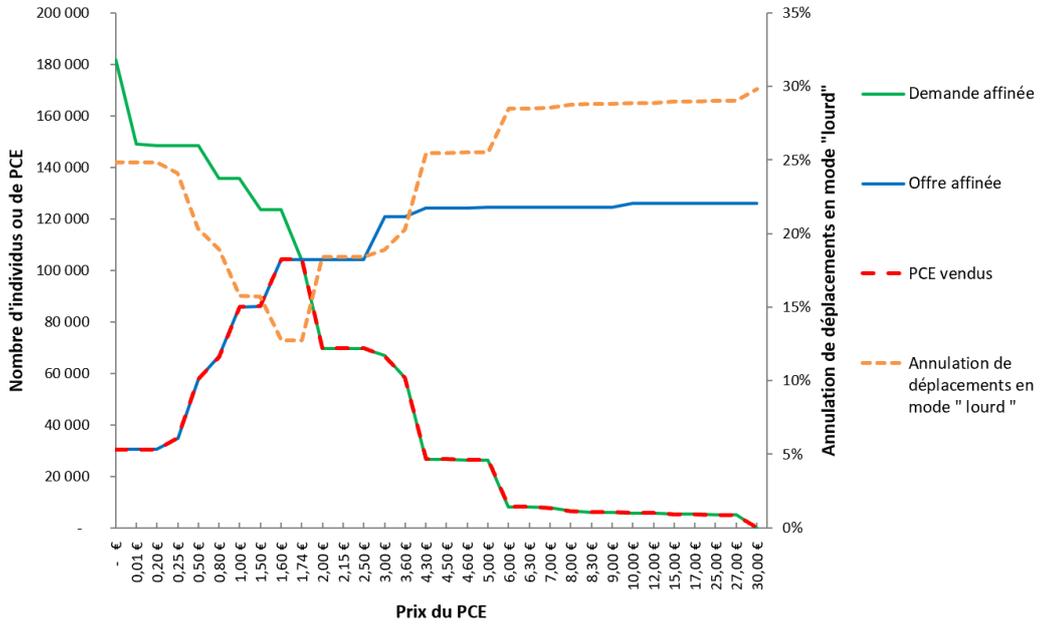
### Simulation 6



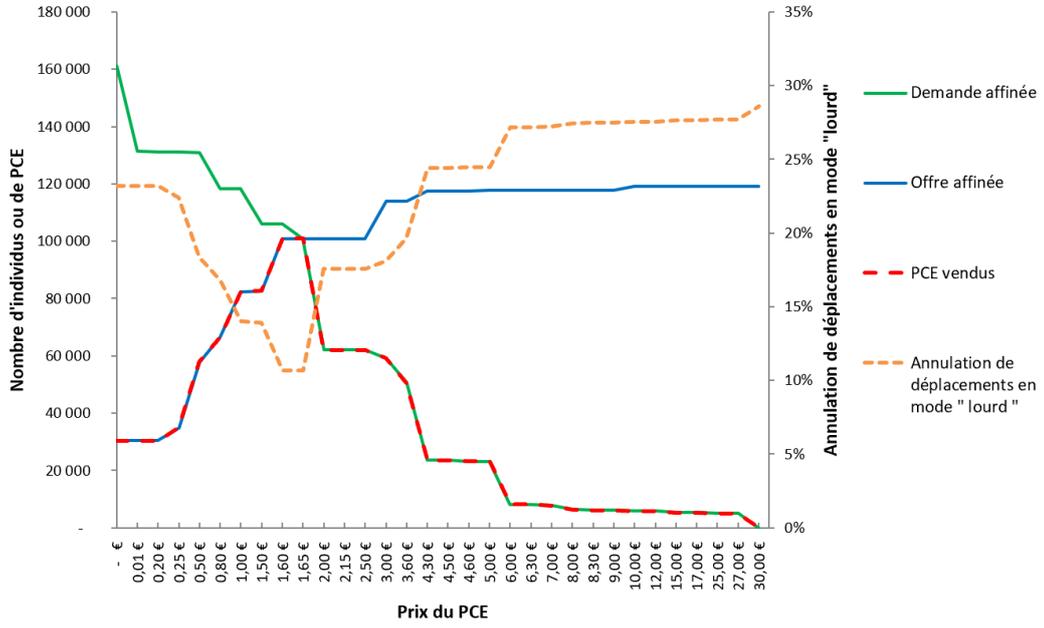
### Simulation 7



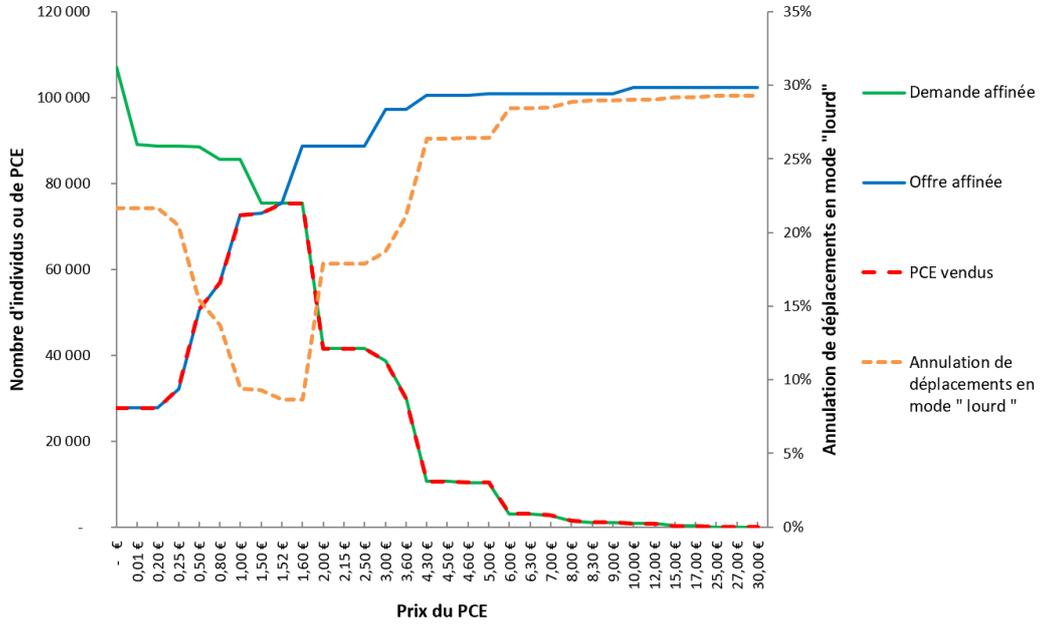
### Simulation 8



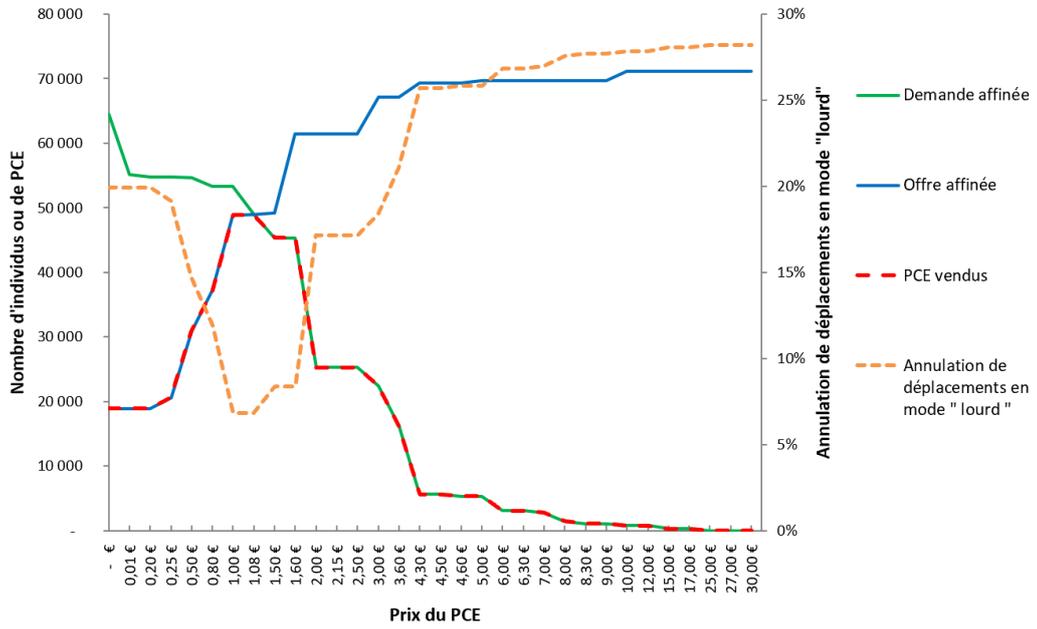
### Simulation 9



### Simulation 10

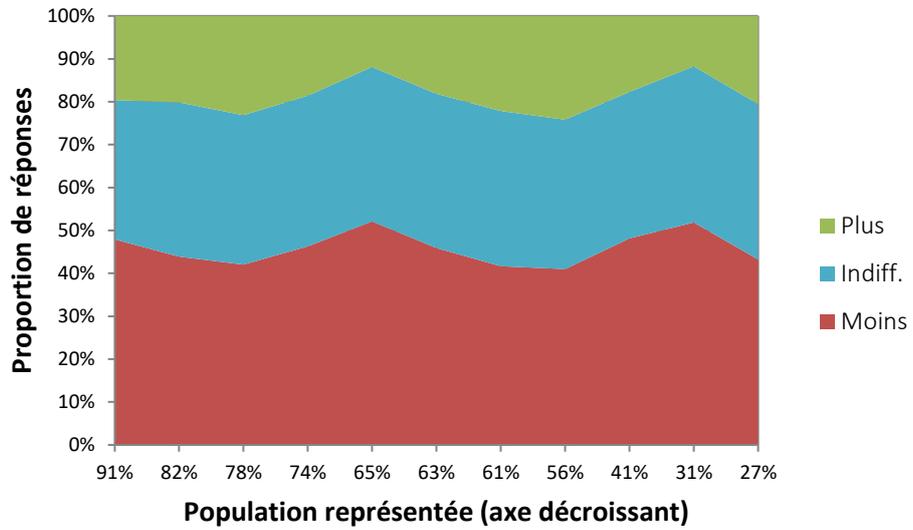


### Simulation 11

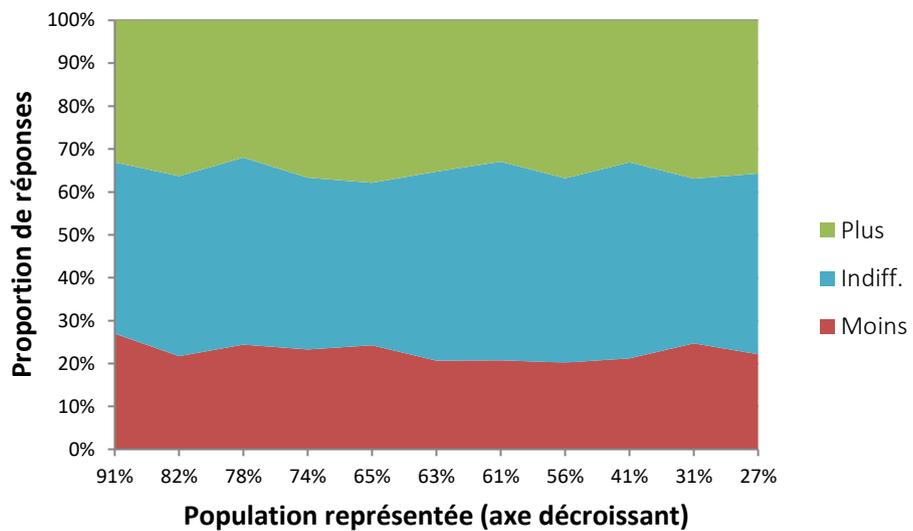


**J Effets des PCE sur le choix modal  
et de destination - Généralisation  
des résultats de la ludification**

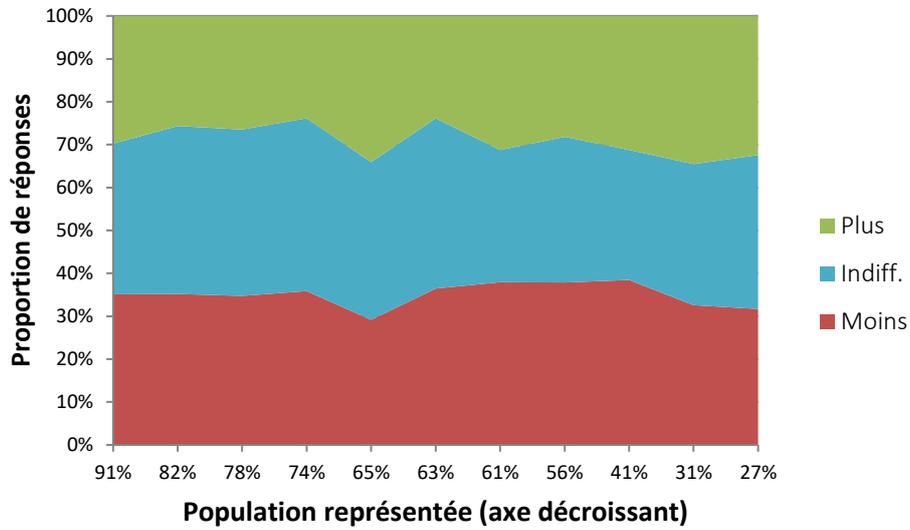
***Si le système de PCE existait à Montpellier, j'utiliserais ma voiture, ma moto ou mon scooter pendant la semaine...***



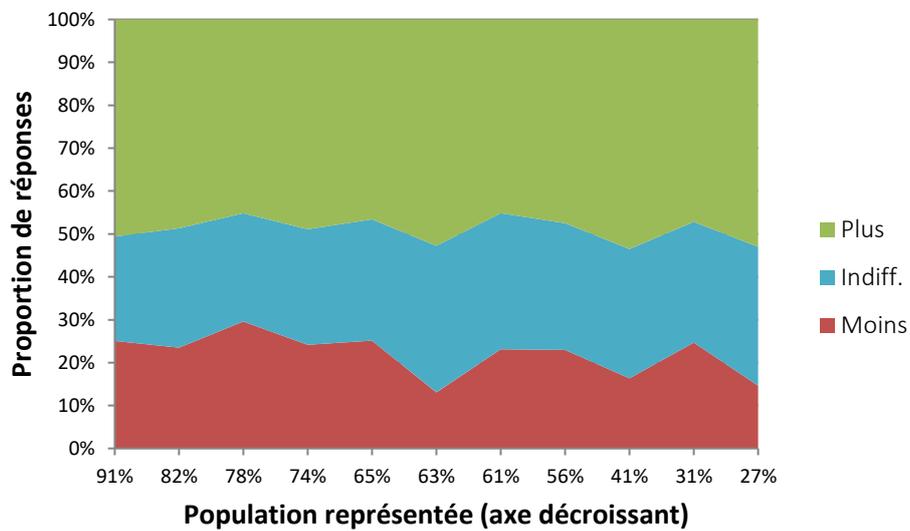
***Si le système de PCE existait à Montpellier, j'utiliserais ma voiture, ma moto ou mon scooter pendant le week-end...***



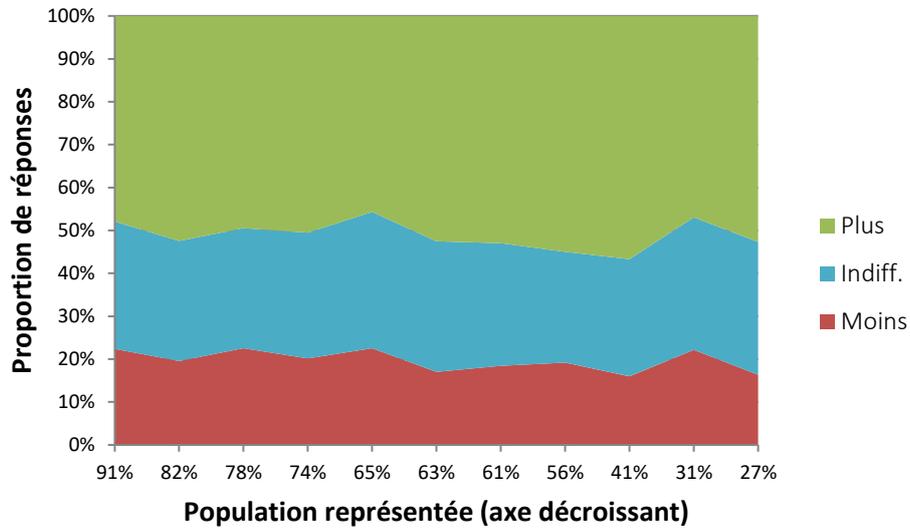
***Si le système de PCE existait à Montpellier, je pratiquerais le covoiturage urbain afin de partager la dépense de jetons...***



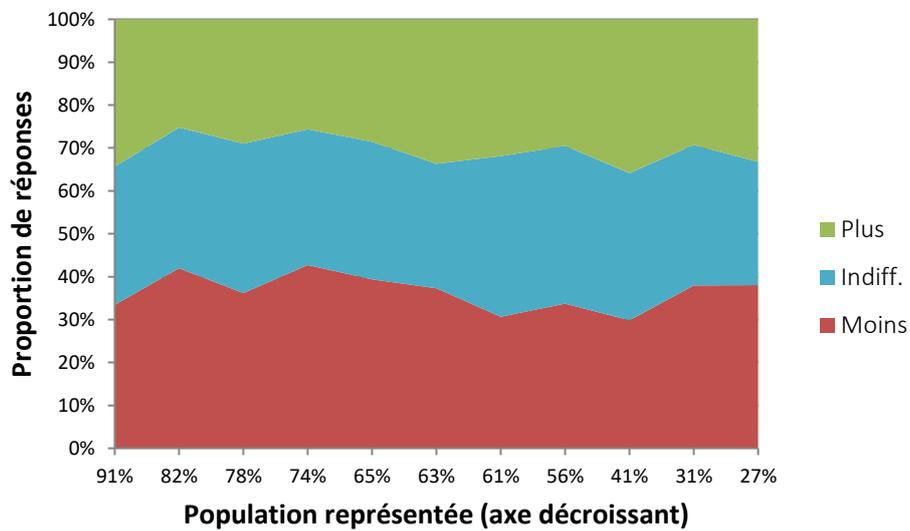
***Si le système de PCE existait à Montpellier, j'utiliserais les transports collectifs...***



***Si le système de PCE existait à Montpellier, je marcherais et/ou j'utiliserais mon vélo, ma trottinette...***

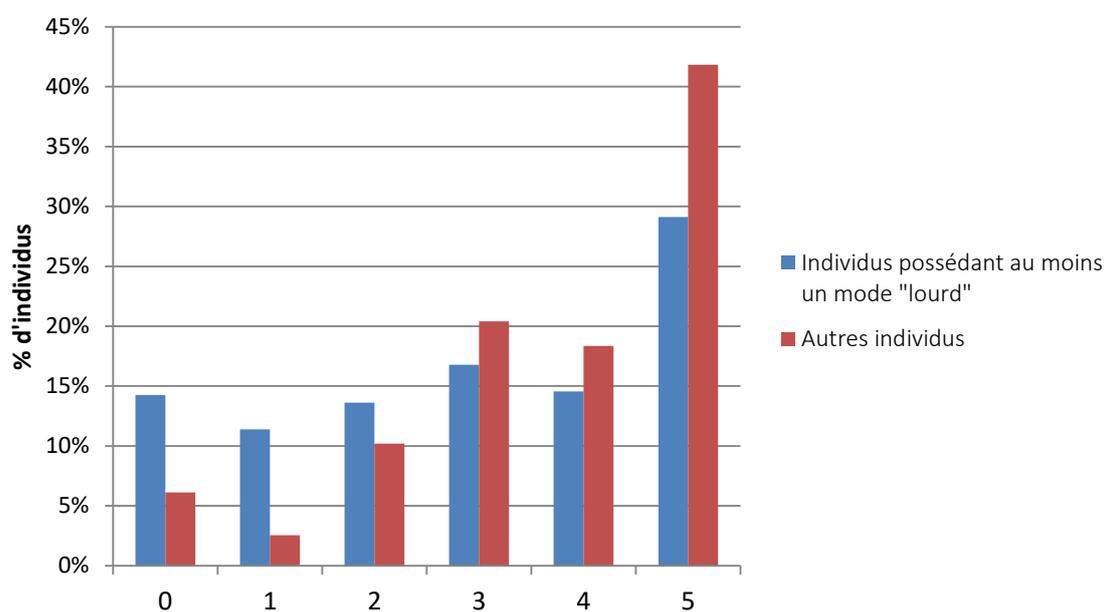


***Hormis dans un cadre professionnel ou scolaire, si un tel système existait, je viendrais à Montpellier... (pour les individus ne vivant pas dans la ville de Montpellier)***

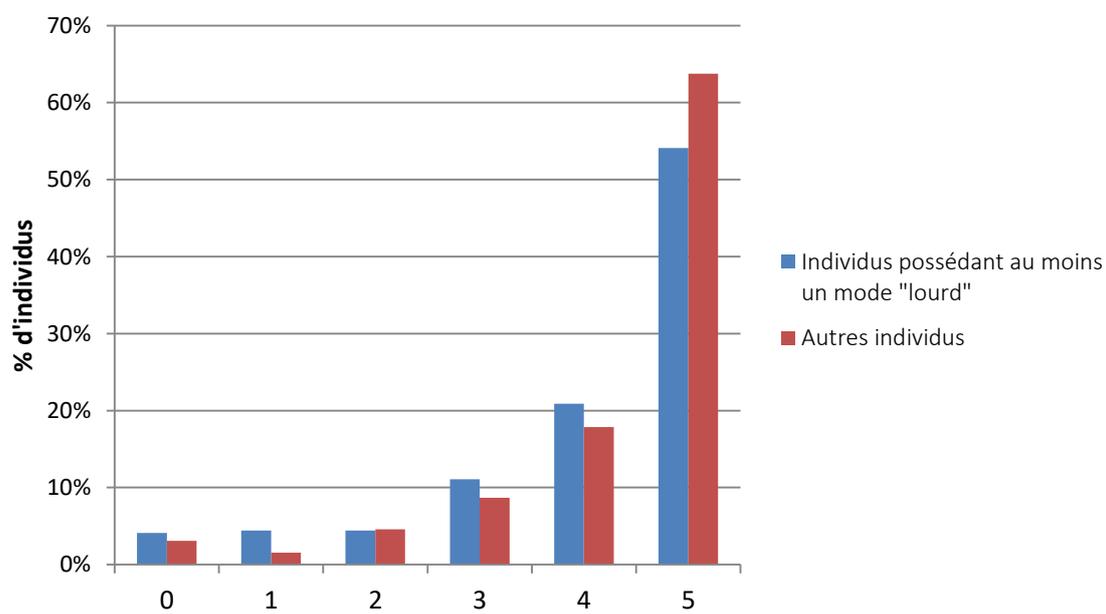


# K Acceptabilité de différents instruments de mobilité

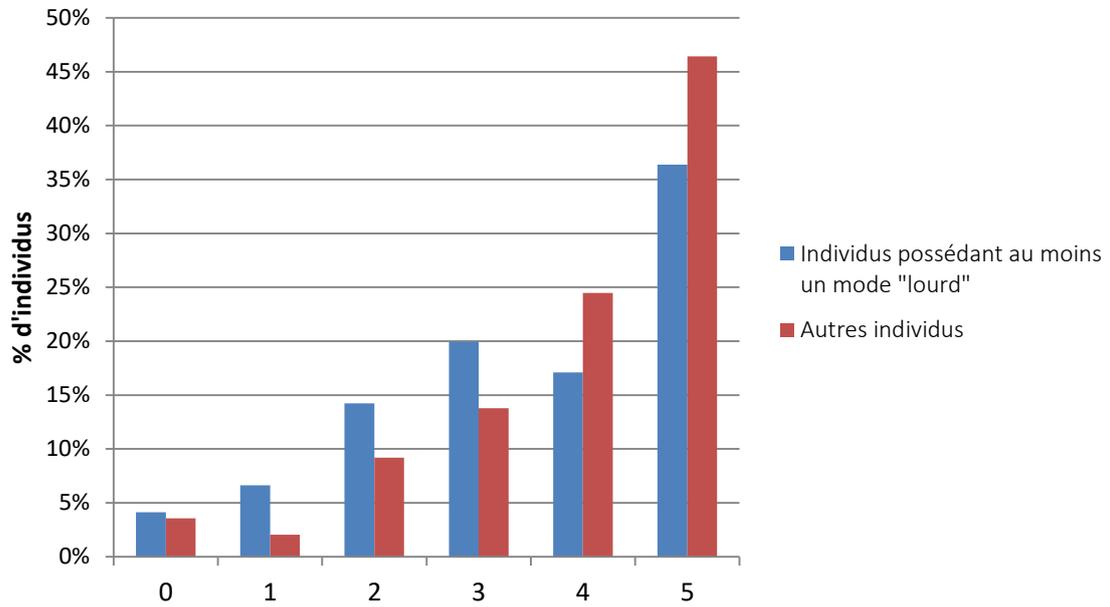
### Interdiction de circuler aux véhicules les plus polluants (2 non-réponses)



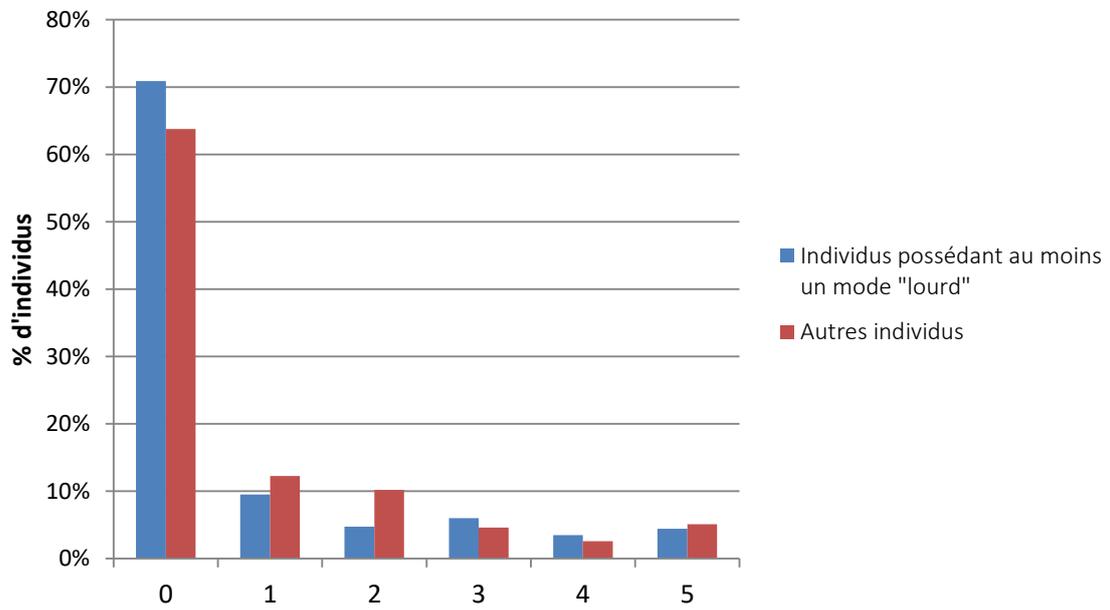
### Aide à l'achat de véhicules propres (4 non-réponses)



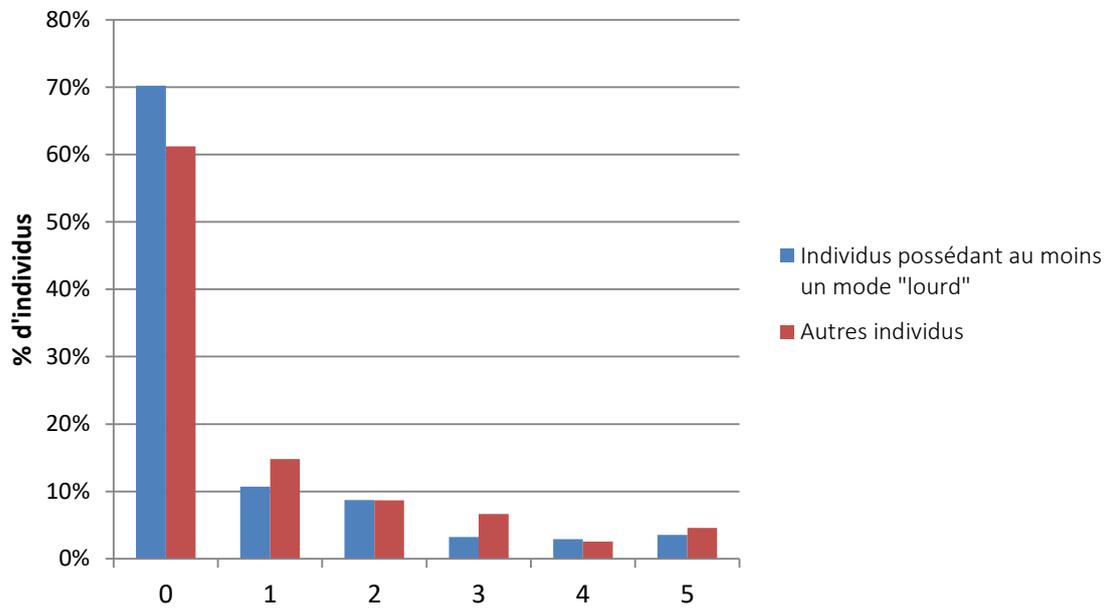
**Information CO<sub>2</sub>**  
(6 non-réponses)



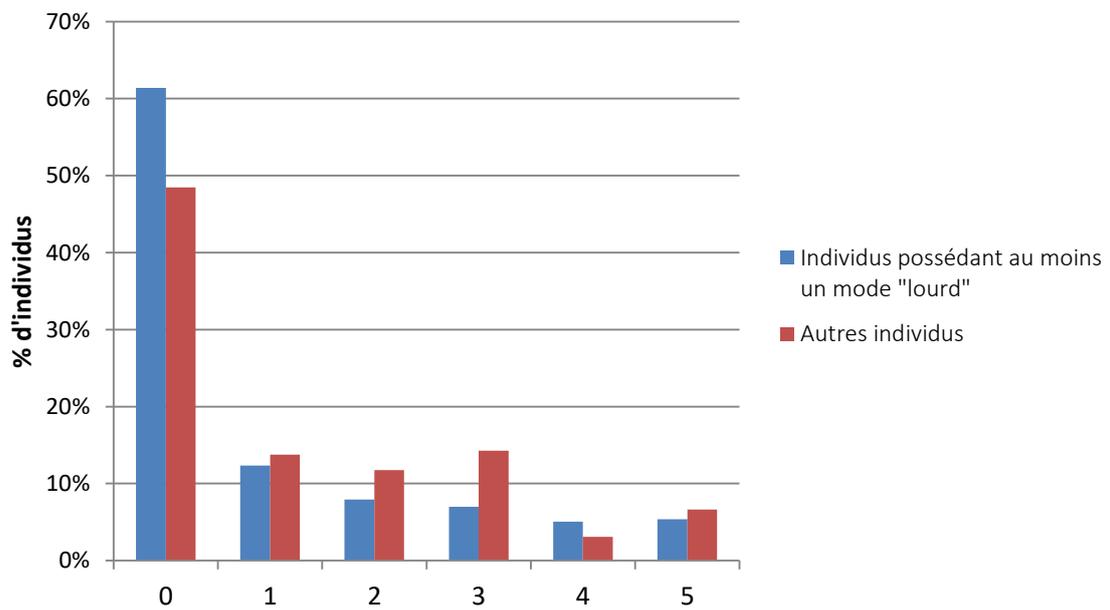
**Hausse des prix du carburant**  
(6 non-réponses)



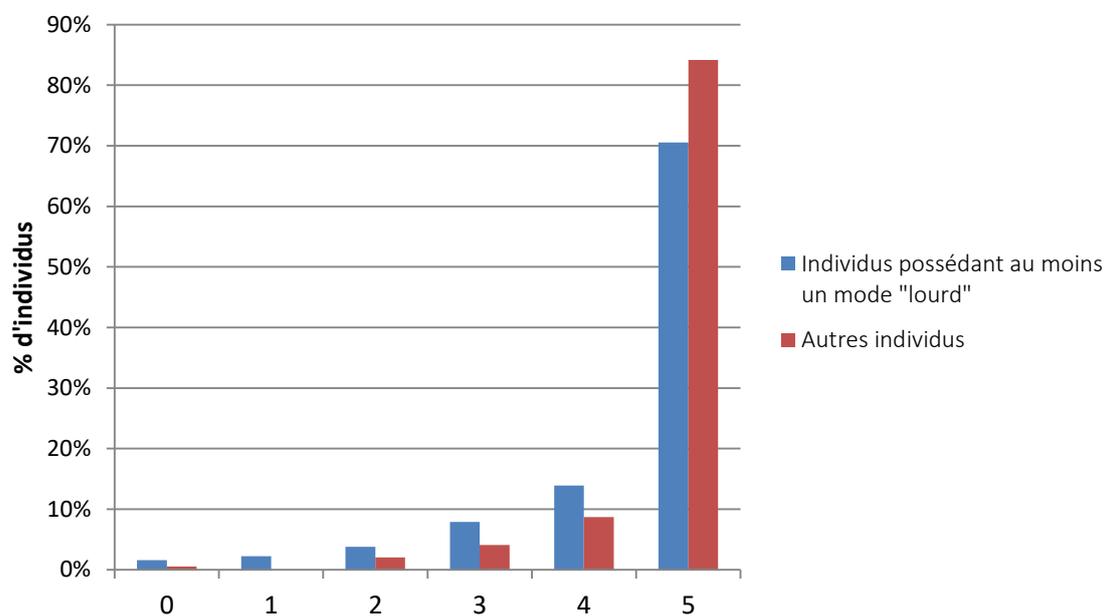
### Hausse des prix du stationnement (5 non-réponses)



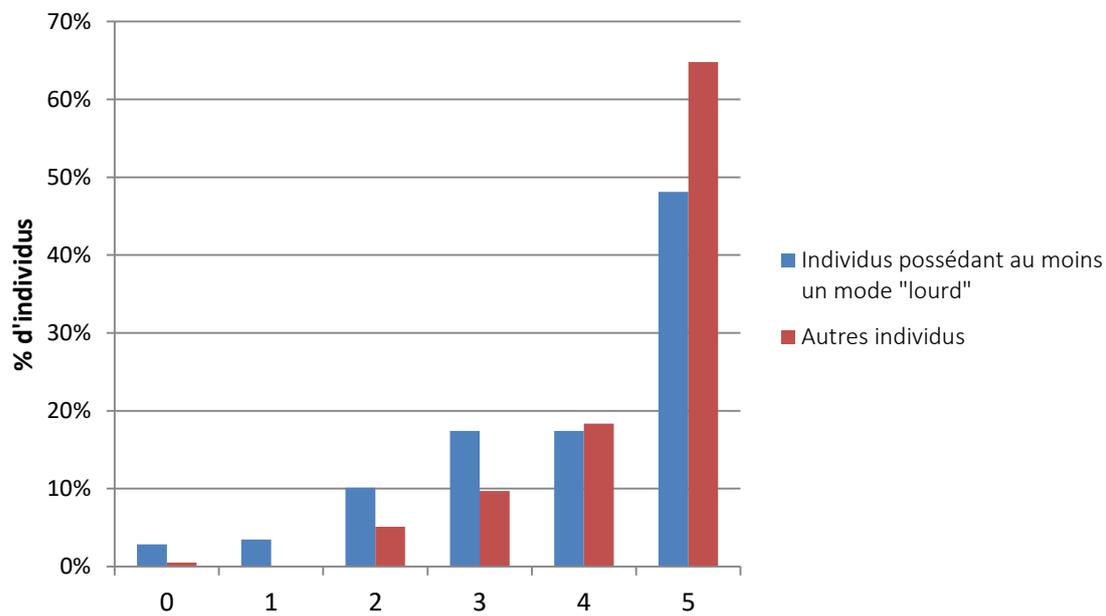
### Péage d'accès à une ville (7 non-réponses)



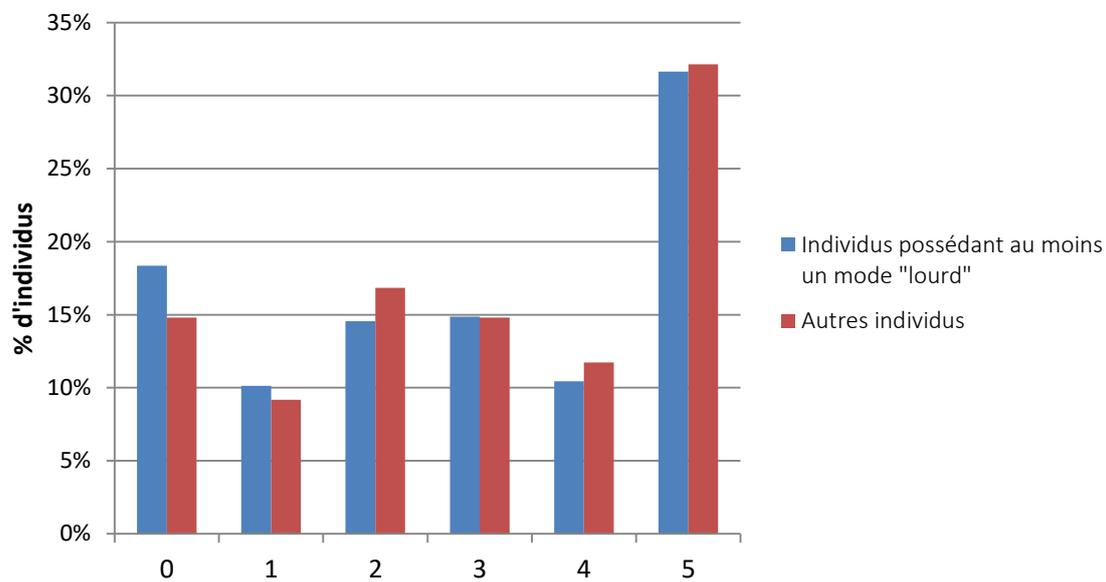
**Amélioration du réseau urbain de transport collectif**  
(1 non-réponse)



**Amélioration des différentes sources d'information du transport collectif**  
(5 non-réponses)



**Gratuité des transports collectifs financée par une augmentation des impôts**  
(4 non-réponses)



# L Statistiques descriptives - Accep- tabilité des PCE

Variable	Valeur	%	Variable	Valeur	%
<b>↓ congestion automobile (NR = 1)</b>			<b>↓ prix du stationnement (NR = 2)</b>		
0	64	17,39	0	167	45,5
1	39	10,6	1	46	12,53
2	48	13,04	2	50	13,62
3	80	21,74	3	48	13,08
4	74	20,11	4	31	8,45
5	63	17,12	5	25	6,81
<b>↓ pollution atmosphérique (NR = 3)</b>			<b>Entrave au droit à la mobilité (NR = 3)</b>		
0	49	13,39	0	89	24,32
1	28	7,65	1	47	12,84
2	45	12,3	2	50	13,66
3	79	21,58	3	62	16,94
4	85	23,22	4	38	10,38
5	80	21,86	5	80	21,86
<b>↓ prix du carburant (NR = 2)</b>					
0	191	52,04			
1	67	18,26			
2	48	13,08			
3	28	7,63			
4	16	4,36			
5	17	4,63			

Statistiques descriptives sur la perception individuelle des effets des PCE sur la mobilité urbaine – Acceptabilité des PCE (N = 369 – NR : nombre de non-réponses)

Variable	Valeur	%	Variable	Valeur	%
<b>Perte de temps</b>			<b>Difficulté d'être informé</b>		
0	40	10,84	0	48	13,01
1	66	17,89	1	71	19,24
2	81	21,95	2	91	24,66
3	85	23,04	3	73	19,78
4	57	15,45	4	54	14,63
5	40	10,84	5	32	8,67
<b>Pollution atmosphérique</b>			<b>Responsabilité individuelle</b>		
0	50	13,55	0	83	22,49
1	86	23,31	1	96	26,02
2	79	21,41	2	80	21,68
3	83	22,49	3	66	17,89
4	41	11,11	4	30	8,13
5	30	8,13	5	14	3,79
<b>Danger lié aux autres citoyens</b>					
0	22	5,96			
1	40	10,84			
2	61	16,53			
3	71	19,24			
4	94	25,47			
5	81	21,95			

Statistiques descriptives sur la perception individuelle des événements pouvant se dérouler au cours des déplacements urbains – Acceptabilité des PCE (N = 369)

# Bibliographie

- [1] AKAMATSU, T. (2007). A system of tradable bottleneck permits for general networks. *JSCE Journal of Infrastructure Planning and Management*, Vol. 63, N°3, pp. 287 – 301.
- [2] AKAMATSU, T. ET WADA, K. (2017). Tradable network permits : A new scheme for the most efficient use of network capacity. *Transportation Research Part C : Emerging Technologies*, Vol. 79, pp. 178 – 195.
- [3] ANDERSSON, D., LÖFGREN, A. ET WIDERBERG, A. (2011). Attitudes to Personal Carbon Allowances. *Working papers in economics - University of Gothenburg*, N°505.
- [4] BAGLOEE, S. A., TAVANA, M., WITHERS, G., PATRIKSSON, M. ET ASADI, M. (2019). Tradable mobility permit with Bitcoin and Ethereum - A Blockchain application in transportation. *Internet of Things*, Vol. 8, pp. 100 – 103.
- [5] BAO, Y., GAO, Z., XU, M. ET YANG, H. (2014). Tradable credit scheme for mobility management considering travelers' loss aversion. *Transportation Research Part E : Logistics and Transportation Review*, Vol. 68, pp. 138 – 154.
- [6] BAUMOL, W. J. (1982). Contestable markets : An uprising in the theory of industry structure. *The American Economic Review*, Vol. 72, N°1, pp. 1 – 15.

- 
- [7] BAUMOL, W. J. ET OATES, W. (1988). *The theory of environmental policy*. 2<sup>nde</sup> éd., Cambridge University Press.
- [8] BEAUD, M., BLAYAC, T. ET STÉPHAN, M. (2012). Value of travel time reliability : Two alternative measures. Dans *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, Vol. 54, pp. 349 – 356.
- [9] BERTA, N. (2010). Les marchés de permis négociables de SO<sub>2</sub> et CO<sub>2</sub> : des premiers pas délicats. *Revue Française de Socio-Économie*, Vol. 5, N°1, pp. 185 – 204.
- [10] BRANDS, D. K., VERHOEF, E. T., KNOCKAERT, J. ET KOSTER, P. R. (2020). Tradable permits to manage urban mobility : Market design and experimental implementation. *Transportation Research Part A : Policy and Practice*, Vol. 137, pp. 34 – 46.
- [11] BRISBOIS, X. (2010). *Le processus de décision dans le choix modal : importance des déterminants individuels, symboliques et cognitifs*. Thèse de doctorat, Université Pierre Mendès-France, Grenoble II.
- [12] BRISTOW, A. L., WARDMAN, M., ZANNI, A. M. ET CHINTAKAYALA, P. K. (2010). Public acceptability of personal carbon trading and carbon tax. *Ecological Economics*, Vol. 69, N°9, pp. 1824 – 1837.
- [13] BUITELAAR, E., VAN DER HEIJDEN, R. ET ARGIOLOU, R. (2007). Managing traffic by privatization of road capacity : A property rights approach. *Transport Reviews*, Vol. 27, N°6, pp. 699 – 713.
- [14] BULTEAU, J. (2012). Tradable emission permit system for urban motorists : The neo-classical standard model revisited. *Research in Transportation Economics*, Vol. 36, N°1, pp. 101 – 109.
- [15] CABRERA-ARANA, G., VELÁSQUEZ-OSORIO, N. ET OROZCO-ARBELÁEZ, A. (2015). Movilidad : aporte para su discusión. *Revista Facultad Nacional*

- de Salud Pública*, Vol. 33, N°3, pp. 429 – 434.
- [16] CAPSTICK, S. B. ET LEWIS, A. (2010). Effects of personal carbon allowances on decision-making : Evidence from an experimental simulation. *Climate Policy*, Vol. 10, N°4, pp. 369 – 384.
- [17] CHIN, A. ET SMITH, P. (1997). Automobile ownership and government policy : The economics of Singapore’s vehicle quota scheme. *Transportation Research Part A : Policy and Practice*, Vol. 31, N°2, pp. 129 – 140.
- [18] COASE, R. H. (1960). The problem of social cost. *Journal of Law and Economics*, Vol. 3, pp. 1 – 44.
- [19] COLIN, N. ET VERDIER, H. (2012). *L’Âge de la multitude : entreprendre et gouverner après la révolution numérique*. 2<sup>nde</sup> éd., Armand Colin.
- [20] CONVERY, F. J. ET REDMOND, L. (2007). Market price developments in the European Union emissions trading scheme. *Review of Environmental Economics and Policy*, Vol. 1, N°1, pp. 88 – 111.
- [21] COSTELLO, C., GAINES, S. D. ET LYNHAM, J. (2008). Can catch shares prevent fisheries collapse? *Science*, Vol. 321, N°5896, pp. 1678 – 1681.
- [22] CROCKER, T. D. (1966). The structuring of atmospheric pollution control systems. *The economics of air pollution*, Vol. 61, pp. 81 – 84.
- [23] CROZET, Y. (2019). Economie des rythmes urbains. *EspacesTemps.net [En ligne]*.
- [24] DAGANZO, C. F. (1995). A pareto optimum congestion reduction scheme. *Transportation Research Part B : Methodological*, Vol. 29, N°2, pp. 139 – 154.
- [25] DALES, J. H. (1968). Land, water, and ownership. *Canadian Journal of Economics*, Vol. 1, N°4, pp. 791 – 804.
- [26] DALES, J. H. (1968). *Pollution, Property and Prices : An essay in policy making and economics*. University of Toronto Press.

- 
- [27] DAVIS, R. K. (1964). The value of big game hunting in a private forest. Dans *Transactions of the Twenty-Ninth North American Wildlife Conference*.
- [28] DE PALMA, A., PROOST, S., SESHADRI, R. ET BEN-AKIVA, M. (2018). Congestion tolling - dollars versus tokens : A comparative analysis. *Transportation Research Part B : Methodological*, Vol. 108, pp. 261 – 280.
- [29] DE WIT, J. ET BURGHOUWT, G. (2008). Slot allocation and use at hub airports, perspectives for secondary trading. *European Journal of Transport and Infrastructure Research*, Vol. 8, N°2.
- [30] DIRECTION RÉGIONALE ET INTERDÉPARTEMENTALE DE L'ÉQUIPEMENT ET DE L'AMÉNAGEMENT (DRIEA) (2010). Enquête Globale Transport. *Archives de Données Issues de la Statistique Publique du Centre Maurice Halbwachs (ADISP-CMH)*.
- [31] DOBES, L. (1999). Kyoto : Tradable greenhouse emission permits in the transport sector. *Transport Reviews*, Vol. 19, N°1, pp. 81 – 97.
- [32] DOGTEROM, N., BAO, Y., XU, M. ET ETTEMA, D. (2018). Acceptability of a tradable driving credit scheme in the Netherlands and Beijing. *Case Studies on Transport Policy*, Vol. 6, N°4, pp. 499 – 509.
- [33] DOGTEROM, N., ETTEMA, D. ET DIJST, M. (2017). Tradable credits for managing car travel : A review of empirical research and relevant behavioural approaches. *Transport Reviews*, Vol. 37, N°3, pp. 322 – 343.
- [34] DOWNS, A. (1962). The law of peak-hour expressway congestion. *Traffic Quarterly*, Vol. 16, N°3.
- [35] DZIEKAN, K. ET VERMUELEN, A. (2006). Psychological effects of and design preferences for real-time information displays. *Journal of Public Transportation*, Vol. 9, N°1, pp. 1 – 19.

- 
- [36] EREV, I. ET BARRON, G. (2005). On adaptation, maximization, and reinforcement learning among cognitive strategies. *Psychological Review*, Vol. 112, N°4, pp. 912 – 931.
- [37] FAN, W. ET JIANG, X. (2013). Tradable mobility permits in roadway capacity allocation : Review and appraisal. *Transport Policy*, Vol. 30, pp. 132 – 142.
- [38] FARAG, S. ET LYONS, G. (2012). To use or not to use ? An empirical study of pre-trip public transport information for business and leisure trips and comparison with car travel. *Transport Policy*, Vol. 20, pp. 82 – 92.
- [39] FAWCETT, T. (2004). Carbon rationing and personal energy use. *Energy & Environment*, Vol. 15, N°6, pp. 1067 – 1083.
- [40] FENTON, P. D. (2016). Sustainable mobility in the sustainable city : A study of 11 large municipalities in Sweden. *Linköping University Press*. Project 15-549.
- [41] FIORELLO, D., FERMI, F., MAFFII, S. ET MARTINO, A. (2010). Mobility right for urban road pricing : A modelling analysis with a system dynamics approach. Dans *The 12th World Conference on transport Research*.
- [42] FLEMING, D. (1996). Stopping the traffic. *Country Life*, Vol. 140, N°19, pp. 62 – 65.
- [43] FLONNEAU, M. (1999). Georges Pompidou, président conducteur, et la première crise urbaine de l'automobile. *Vingtième Siècle*, N°61, pp. 30 – 43.
- [44] FUKUI, H. (2010). An empirical analysis of airport slot trading in the United States. *Transportation Research Part B : Methodological*, Vol. 44, N°3, pp. 330 – 357.
- [45] GODARD, O. ET HENRY, C. (1998). Les instruments des politiques internationales de l'environnement : la prévention du risque climatique et les mécanismes de permis négociables. *Fiscalité de l'environnement*, pp. 83 – 174.

- 
- [46] GODDARD, H. C. (1997). Using tradeable permits to achieve sustainability in the world's large cities : Policy design issues and efficiency conditions for controlling vehicle emissions, congestion and urban decentralization with an application to Mexico City. *Environmental and Resource Economics*, Vol. 10, N°1, pp. 63 – 99.
- [47] GRAYLING, T., GIBBS, T. ET CASTLE, B. (2006). Tailpipe trading : How to include road transport in the EU Emissions Trading Scheme (EU ETS). *Institute for Public Policy Research, Low Carbon Road Transport Challenge*.
- [48] HARWATT, H., TIGHT, M., BRISTOW, A. L. ET GÜHNEMANN, A. (2011). Personal Carbon Trading and fuel price increases in the transport sector : An exploratory study of public response in the Uk. *European Transport*, Vol. 47, N°16, pp. 47 – 70.
- [49] HE, J. ET ZHANG, B. (2018). Projection bias in decision-making : Daily air pollution and willingness to pay for better air quality. *Cahiers de recherche 18-03, Département d'Économie de l'École de gestion à l'Université de Sherbrooke*, N°18-03.
- [50] HUH, S. Y., WOO, J., LIM, S., LEE, Y. G. ET KIM, C. S. (2015). What do customers want from improved residential electricity services ? Evidence from a choice experiment. *Energy Policy*, Vol. 85, pp. 410 – 420.
- [51] INSTITUT NATIONAL DE LA STATISTIQUE ET DES ÉTUDES ÉCONOMIQUES (INSEE) (2019). *Dossier complet Intercommunalité - Métropole de Montpellier Méditerranée Métropole (243400017)*.
- [52] INSTITUT NATIONAL DE LA STATISTIQUE ET DES ÉTUDES ÉCONOMIQUES (INSEE) (2020). *Dossier complet - Aire urbaine de Montpellier (015)*.
- [53] JACQUET, D. ET LECLERC, G. (2016). *L'ubérisation, un ennemi qui vous veut du bien ?* Dunod.

- 
- [54] JOSKOW, P. L., SCHMALENSEE, R. ET BAILEY, E. M. (1998). The market for sulfur dioxide emissions. *American Economic Review*, pp. 669 – 685.
- [55] KAHNEMAN, D. ET TVERSKY, A. (1979). Prospect theory : An analysis of decision under risk. *Econometrica*, Vol. 47, N°2, pp. 263 – 291.
- [56] KEPPENS, M. ET VEREECK, L. (2003). The design and effects of a tradable fuel permit system. Dans *Proceedings of the European Transport Conference (ETC)*.
- [57] KEREN, G. ET ROELOFSMA, P. (1995). Immediacy and certainty in intertemporal choice. *Organizational Behavior and Human Decision Processes*, Vol. 63, N°3, pp. 287 – 297.
- [58] KOCKELMAN, K. M. ET KALMANJE, S. (2005). Credit-based congestion pricing : A policy proposal and the public's response. *Transportation Research Part A : Policy and Practice*, Vol. 39, N°7-9, pp. 671 – 690.
- [59] KOH, W. T. H. ET LEE, K. C. L. (1994). The vehicle quota system in Singapore : An assessment. *Transportation Research Part A : Policy and Practice*, Vol. 28, N°1, pp. 31 – 47.
- [60] LYONS, G., HAMMOND, P. ET MACKAY, K. (2019). The importance of user perspective in the evolution of maas. *Transportation Research Part A : Policy and Practice*, Vol. 121, pp. 22 – 36.
- [61] MAYERES, I. ET PROOST, S. (2002). Reforming transport pricing : An economist's perspective on equity, efficiency and acceptability. *Energy, Transport and Environment Working Papers Series, KU Leuven*, N°2002-12.
- [62] MCFADDEN, D. (1973). Conditional logit analysis of qualitative choice behavior. *Frontiers in Econometrics*, pp. 105 – 142.

- 
- [63] MENZ, F. C. ET SEIP, H. M. (2004). Acid rain in Europe and the United States : An update. *Environmental Science & Policy*, Vol. 7, N°4, pp. 253 – 265.
- [64] MICHAELIS, P. ET ZERLE, P. (2006). From ACEA's voluntary agreement to an emission trading scheme for new passenger cars. *Journal of Environmental Planning and Management*, Vol. 49, N°3, pp. 435 – 453.
- [65] MIRABEL, F. ET REYMOND, M. (2013). *Economie des transports urbains*. La Découverte.
- [66] MONTGOMERY, W. D. (1972). Markets in licenses and efficient pollution control programs. *Journal of Economic Theory*, Vol. 5, N°3, pp. 395 – 418.
- [67] MORRISON, S., WINSTON, C., BAILEY, E. ET KAHN, A. (1989). Enhancing the performance of the deregulated air transportation system. *Brookings Papers on Economic Activity. Microeconomics*, pp. 61 – 123.
- [68] MUSSO, E., BURLANDO, C. ET SILLIG, C. (2006). Tradable traffic rights for urban transport. Dans *WIT Transaction on the Built Environment*.
- [69] NAKAMURA, K. ET KOCKELMAN, K. M. (2002). Congestion pricing and roadspace rationing : An application to the San Francisco Bay Bridge corridor. *Transportation Research Part A : Policy and Practice*, Vol. 36, N°5, pp. 403 – 417.
- [70] NEWELL, R. G., SANCHIRICO, J. N. ET KERR, S. (2005). Fishing quota markets. *Journal of environmental economics and management*, Vol. 49, N°3, pp. 437 – 462.
- [71] NIE, Y. (2012). Transaction costs and tradable mobility credits. *Transportation Research Part B : Methodological*, Vol. 46, N°1, pp. 189 – 203.

- [72] NIE, Y. ET YIN, Y. (2013). Managing rush hour travel choices with tradable credit scheme. *Transportation Research Part B : Methodological*, Vol. 50, pp. 1 – 19.
- [73] NORDHAUS, R. R. ET DANISH, K. W. (2003). *Designing a mandatory greenhouse gas reduction program for the US*, Vol. 66. Citeseer.
- [74] O'DONOGHUE, T. ET RABIN, M. (1999). Doing it now or later. *American Economic Review*, Vol. 89, N°1, pp. 103 – 124.
- [75] ORFEUIL, J. P. (1996). Urbain et périurbain : qui va où ? *Urbanisme*, N°289, pp. 52 – 57.
- [76] ORGANISATION DE COOPÉRATION ET DE DÉVELOPPEMENT ÉCONOMIQUES (OCDE) (2001). *Domestic Transferable Permits for Environmental Management : Design and Implementation*. Publications de l'OCDE.
- [77] PHANG, S. Y. (1993). Singapore's motor vehicle policy : Review of recent changes and a suggested alternative. *Transportation Research Part A : Policy and Practice*, Vol. 27, N°4, pp. 329 – 336.
- [78] QUINET, E. (1998). *Principes d'économie des transports*. Economica.
- [79] RAUX, C. (2007). Les droits à circuler échangeables : une alternative pertinente et réaliste au péage urbain ? *Les Cahiers scientifiques du transport*, N°55, pp. 127 – 154.
- [80] RAUX, C. (2008). Tradable driving rights in urban areas : Their potential for tackling congestion and traffic-related pollution. *The Implementation and Effectiveness of Transport Demand Management Measures.*, pp. 95 – 120.
- [81] RAUX, C. (2011). *Tradable Permits in the Transport Sector*. John Libbey Eurotext.
- [82] RAUX, C., CHEVALIER, A., BOUGNA, E. ET HILTON, D. (2015). Mobility choices and climate change : Assessing effects of social norms and economic

- incentives through discrete choice experiments. Dans *Transportation Research Board 94th Annual Meeting*.
- [83] RAUX, C., CROISSANT, Y. ET PONS, D. (2015). Would personal carbon trading reduce travel emissions more effectively than a carbon tax? *Transportation Research Part D : Transport and Environment*, Vol. 35, pp. 72 – 83.
- [84] RAUX, C. ET MARLOT, G. (2005). A system of tradable CO<sub>2</sub> permits applied to fuel consumption by motorists. *Transport Policy*, Vol. 12, N°3, pp. 255 – 265.
- [85] ROTARIS, L. ET DANIELIS, R. (2019). The willingness to pay for a carbon tax in Italy. *Transportation Research Part D : Transport and Environment*, Vol. 67, pp. 659 – 673.
- [86] ROTHENGATTER, W. (1990). Economic aspects. *Transport Policy and the Environment, ECMT Ministerial Session*, pp. 147 – 176.
- [87] ROUGET, M., CLAP, P. ET RUNGE, F. (2016). La mobilité du futur : vers une évolution des comportements et de l'action politique? *Cahiers de la prospective*, N°3.
- [88] SCHMALENSEE, R., JOSKOW, P., ELLERMAN, A. D., MONTERO, J. P. ET BAILEY, E. M. (1998). An interim evaluation of sulfur dioxide emissions trading. *Journal of Economic Perspectives*, Vol. 12, N°3, pp. 53 – 68.
- [89] SERVICE DE L'OBSERVATION ET DES STATISTIQUES (SOES) (2017). *Chiffres-clés du transport*. Pour le Ministère de l'environnement, de l'énergie et de la mer en charge des relations internationales sur le climat.
- [90] SERVICE DES DONNÉES ET DES ÉTUDES STATISTIQUES (SDES) (2020). *Chiffres-clés du transport*. Commissariat général au développement durable - Pour le Ministère de la transition écologique et solidaire.

- 
- [91] SOUCHE - LE CORVEC, S., RAUX, C., ELIASSON, J., HAMILTON, C., BRUNDELL-FREIJ, K., KIISKILÄ, K. ET TERVONEN, J. (2016). Predicting the results of a referendum on urban road pricing in France : "the cry of Cassandra" ? *European Transport Research Review*, Vol. 8, N°2.
- [92] SOUCHE, S., RAUX, C. ET CROISSANT, Y. (2012). On the perceived justice of urban road pricing : An empirical study in Lyon. *Transportation Research Part A : Policy and Practice*, Vol. 46, N°7, pp. 1124–1136.
- [93] STARKEY, R. ET ANDERSON, K. (2005). *Domestic Tradable Quotas : A policy instrument for reducing greenhouse gas emissions from energy use*. Tyndall centre for climate change research Norwich, UK.
- [94] STAVINS, R. (1995). Transaction costs and tradeable permits. *Journal of Environmental Economics and Management*, Vol. 29, N°2, pp. 133 – 148.
- [95] STERNER, T. ET MULLER, A. (2008). Output and abatement effects of allocation readjustment in permit trade. *Climatic Change*, Vol. 86, N°1-2, pp. 33 – 49.
- [96] TIAN, L. J., YANG, H. ET HUANG, H. J. (2013). Tradable credit schemes for managing bottleneck congestion and modal split with heterogeneous users. *Transportation Research Part E : Logistics and Transportation Review*, Vol. 54, pp. 1 – 13.
- [97] TIETENBERG, T. (1980). Transferable discharge permits and the control of stationary source air pollution : A survey and synthesis. *Land economics*, Vol. 56, N°4, pp. 391 – 416.
- [98] VERHOEF, E. T., NIJKAMP, P. ET RIETVELD, P. (1996). The trade-off between efficiency, effectiveness, and social feasibility of regulating road transport externalities. *Transportation Planning and Technology*, Vol. 19, N°3-4, pp. 247 – 263.

- 
- [99] VERHOEF, E. T., NIJKAMP, P. ET RIETVELD, P. (1997). Tradeable permits : Their potential in the regulation of road transport externalities. *Environment and Planning B : Planning and Design*, Vol. 24, N°4, pp. 527 – 548.
- [100] VIEGAS, J. (2001). Making urban road pricing acceptable and effective : Searching for quality and equity in urban mobility. *Transport Policy*, Vol. 8, N°4, pp. 289 – 294.
- [101] WADA, K. ET AKAMATSU, T. (2013). A hybrid implementation mechanism of tradable network permits system which obviates path enumeration : An auction mechanism with day-to-day capacity control. *Transportation Research Part E : Logistics and Transportation Review*, Vol. 60, pp. 94 – 112.
- [102] WADUD, Z. (2011). Personal tradable carbon permits for road transport : Why, why not and who wins? *Transportation Research Part A : Policy and Practice*, Vol. 45, N°10, pp. 1052 – 1065.
- [103] WADUD, Z., NOLAND, R. B. ET GRAHAM, D. J. (2008). Equity analysis of personal tradable carbon permits for the road transport sector. *Environmental Science & Policy*, Vol. 11, N°6, pp. 533 – 544.
- [104] WALLACE, A. A., IRVINE, K. N., WRIGHT, A. J. ET FLEMING, P. D. (2010). Public attitudes to personal carbon allowances : Findings from a mixed-method study. *Climate Policy*, Vol. 10, N°4, pp. 385 – 409.
- [105] WANG, J. P., LIU, T. L. ET HUANG, H. J. (2018). Tradable OD-based travel permits for bi-modal traffic management with heterogeneous users. *Transportation Research Part E : Logistics and Transportation Review*, Vol. 118, pp. 589 – 605.
- [106] WATTERS, H. M. (2005). Tradable carbon permits : Reducing CO<sub>2</sub> from the transport sector. Dans *European Transport Conference, Strasbourg*.

- [107] WATTERS, H. M. ET TIGHT, M. (2007). Designing an emissions trading scheme suitable for surface transport. *Institute for transport studies, Faculty of environment, University of Leeds*.
- [108] WATTERS, H. M., TIGHT, M. R. ET BRISTOW, A. L. (2006). The relative acceptability of tradable carbon permits and fuel price increases as mean to reduce CO<sub>2</sub> emissions from road transport. Dans *Proceedings of the European Transport Conference*, pp. 8 – 20.
- [109] WONG, J. T. (1997). Basic concepts for a system for advance booking for highway use. *Transport Policy*, Vol. 4, N°2, pp. 109 – 114.
- [110] WU, D., YIN, Y., LAWPHONGPANICH, S. ET YANG, H. (2012). Design of more equitable congestion pricing and tradable credit schemes for multimodal transportation networks. *Transportation Research Part B : Methodological*, Vol. 46, N°9, pp. 1273 – 1287.
- [111] XIAO, F., QIAN, Z. ET ZHANG, H. M. (2013). Managing bottleneck congestion with tradable credits. *Transportation Research Part B : Methodological*, Vol. 56, pp. 1 – 14.
- [112] XU, M. ET GRANT-MULLER, S. (2016). Trip mode and travel pattern impacts of a tradable credits scheme : A case study of Beijing. *Transport Policy*, Vol. 47, pp. 72 – 83.
- [113] XU, M. ET GRANT-MULLER, S. (2017). Tradable credits scheme on urban travel demand : A linear expenditure system approach and simulation in Beijing. Dans *Transportation Research Procedia*, Vol. 25, pp. 2934 – 2948.
- [114] XU, M., MUSSONE, L. ET GRANT-MULLER, S. (2018). Effects of a tradable credits scheme on mobility management : A household utility based approach incorporating travel money and travel time budgets. *Case Studies on Transport Policy*, Vol. 6, N°3, pp. 432 – 438.

- [115] YANG, H. ET WANG, X. (2011). Managing network mobility with tradable credits. *Transportation Research Part B : Methodological*, Vol. 45, N°3, pp. 580 – 594.
- [116] YE, H. ET YANG, H. (2013). Continuous price and flow dynamics of tradable mobility credits. Dans *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, Vol. 80, pp. 61 – 78.
- [117] ZHU, D. L., YANG, H., LI, C. M. ET WANG, X. L. (2015). Properties of the multiclass traffic network equilibria under a tradable credit scheme. *Transportation Science*, Vol. 49, N°3, pp. 519 – 534.

## Les permis à circuler échangeables pour une mobilité urbaine durable. Une application à la ville de Montpellier (France).

Jimmy Martinez

Réduire la place de la voiture dans les villes sans taxer les automobilistes. Tel est l'objectif des permis à circuler échangeables (PCE), afin de fortifier la trajectoire de soutenabilité de la mobilité urbaine. Le PCE est une unité non-monnaire allouée à l'utilisateur pour qu'il exerce des déplacements dans un périmètre espace-temps-mode contraint par les autorités publiques. Dans ce périmètre, un objectif quantitatif collectif ne doit pas être dépassé (e.g. un nombre de véhicules-kilomètres ou des tonnes d'émissions polluantes). Le but est de diminuer l'impact d'une ou plusieurs externalités négatives causées par la mobilité des individus et des biens (e.g. la congestion, la pollution atmosphérique, les accidents de la route et le bruit).

L'individu peut consommer les permis qui lui sont alloués. Il peut aussi en vendre sur un marché contrôlé par les autorités publiques. Dans ce cas, il doit adapter ses choix de déplacement en fonction du nombre de PCE qu'il lui reste. D'autres individus pourront alors acquérir ces permis sur le marché s'ils souhaitent se déplacer dans ce même périmètre.

Les PCE allient restriction des déplacements collectivement nuisibles, pollution-paiement aux autres usagers contribuant à l'effort environnemental, et incitation financière à adopter des comportements de mobilité plus vertueux. Basés sur les mêmes principes que les droits à polluer, les PCE permettent de contourner les limites des péages et de la taxation des ressources. Ces instruments ont pu provoquer des révoltes citoyennes.

Le premier chapitre de cette thèse fait état des différentes propositions de la littérature. Celles-ci abordent les questions d'allocation des PCE, de définition des structures essentielles et de fonctionnement du marché d'échange. Contrairement aux marchés des droits à polluer, le marché des PCE peut aboutir à des échanges mutuellement profitables étant donné le grand nombre d'agents économiques que la population représente. Nous déterminons également le rôle des nouvelles technologies dans le système des PCE et la nécessité d'un PCE immatériel. Enfin, une modélisation économique des effets des PCE sur le choix modal met en lumière l'importance de l'allocation initiale des PCE en tant que condition du report modal.

Le deuxième chapitre de cette thèse fait l'objet d'une ludification des PCE. Celle-ci est issue d'une enquête-mobilité destinée aux habitants de l'aire urbaine de Montpellier. Nous montrons empiriquement que les PCE incitent à des choix de déplacement durables, dans des proportions comparables à celles des péages urbains. De plus, pour les individus voulant se déplacer au-delà de ce que leur allocation initiale de PCE leur permet de faire, le prix d'équilibre du marché des PCE est inférieur au montant de la plupart des péages urbains existants. Les déplacements des individus qui se mettent volontairement à l'écart du marché sont fortement impactés. Il en est de même pour ceux ayant une disposition à payer des PCE insuffisante. Deux analyses factorielles discriminantes nous permettent de trouver les critères individuels favorisant cette mise à l'écart volontaire ou cette exclusion du marché. Des mesures compensatoires sont proposées lorsqu'il y a iniquité.

Le troisième chapitre de cette thèse est consacré à la mesure de l'acceptabilité sociale des PCE si ceux-ci venaient à voir le jour dans la ville de Montpellier. Nos résultats économétriques sont confortés par ceux de la littérature. Nous trouvons que l'acceptabilité des PCE est meilleure que celle des péages urbains. Il ressort également que l'acceptabilité des PCE est principalement influencée par les croyances des individus relatives à l'impact des PCE sur l'avenir de la mobilité urbaine.

Enfin, notre conclusion propose d'éclairer le regard des autorités publiques à l'aide de trente préconisations guidant la mise en place d'un système de PCE.

**Mots-clés :** transports urbains, mobilité durable, permis à circuler échangeables, marché de droits d'émission, incitation, acceptabilité.

---

## Tradable Mobility Permits for a sustainable urban mobility. An application to the city of Montpellier (France).

Reducing car use in cities without taxing motorists. This is the main goal of tradable mobility permits (TMPs) that allow to strengthen the trajectory of sustainability in urban mobility. TMPs are non-monetary units allocated to all the users for travel within a space-time-mode area constrained by the public authorities. In this area, a common quantitative objective, such as a number of vehicle-kilometres or tons of pollutant emissions, must not be exceeded in order to reduce the negative externalities caused by the mobility of individuals and goods (e.g. congestion, air pollution, road accident and noise).

Individuals can either use their allocated TMPs or sell them on a market controlled by the public authorities. In the latter case, they need to adapt their travel choices according to the number of TMPs they have left. Other individuals, who wish to travel within the same area beyond their initial TMP allocation, will be able to buy these permits on the market.

TMPs combine restrictions on collectively harmful travels and financial incentives to adopt more environment-friendly mobility choices. The polluter pays principle is also enhanced as the revenue of the TMPs is distributed among TMPs sellers who contribute to the environmental effort. As emissions trading, TMPs allow to bypass the limits of tolls and resource tax which have caused citizen revolts.

The first chapter of this thesis reviews the available literature on TMPs. This literature has focused on the issue of TMP allocation, the definition of essential structures and the functioning of the TMP market. Contrary to the emissions trading markets, the TMP market can lead to mutually profitable exchanges given the large number of economic agents that the population represents. We also discuss the role of new technologies in the TMP system and the need for immaterial TMPs. In the last part of this chapter, an economic model is developed to study the effects of TMPs on the modal choice. This theoretical analysis highlights the importance of the initial allocation of TMPs as a condition for modal shift.

The second chapter of this thesis deals with a gamification of the TMPs, included in a survey conducted among inhabitants of the Montpellier urban area. Empirically, we show that TMPs encourage sustainable travel choices in proportions comparable to those of urban tolls. Moreover, for individuals who wish to travel beyond their initial TMP allocation, the equilibrium market price of TMPs is lower than the amount of most existing urban tolls. The trips of individuals who voluntarily step aside from the market are heavily impacted. The same is true for individuals who have an insufficient willingness to pay for TMPs. Two discriminant factor analyses allow us to investigate the individual criteria that favour this voluntary withdrawal or exclusion from the market. Compensatory measures are proposed where inequity exists.

The third chapter of this thesis is devoted to measure the social acceptability of the TMPs if they were to be implemented in the city of Montpellier. Our econometric results are in line with the available literature. We find that the acceptability of TMPs is better than that of urban tolls. Furthermore, the acceptability of TMPs is mainly influenced by individuals' beliefs about the impact of TMPs on the future of urban mobility.

Finally, our conclusion sheds light on the public authorities' viewpoint with the help of thirty recommendations guiding the implementation of a TMP system for policy-makers.

**Keywords:** urban transportation, sustainable mobility, tradable mobility permits, emission rights market, incentives, acceptability.