



HAL
open science

**FAUT-IL REDUIRE L'USAGE DE LA VOITURE ?
COUTS SOCIAUX ET BENEFICES
ENVIRONNEMENTAUX DE DIFFERENTS
SCENARIOS ECONOMIQUES ET
TECHNOLOGIQUES A L'HORIZON 2060**

Richard Grimal

► **To cite this version:**

Richard Grimal. FAUT-IL REDUIRE L'USAGE DE LA VOITURE? COUTS SOCIAUX ET BENEFICES ENVIRONNEMENTAUX DE DIFFERENTS SCENARIOS ECONOMIQUES ET TECHNOLOGIQUES A L'HORIZON 2060. 2019. hal-04153725v1

HAL Id: hal-04153725

<https://hal.science/hal-04153725v1>

Preprint submitted on 25 Jun 2019 (v1), last revised 6 Jul 2023 (v2)

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.

FAUT-IL REDUIRE L'USAGE DE LA VOITURE ?

COUTS SOCIAUX ET BENEFICES ENVIRONNEMENTAUX DE DIFFERENTS SCENARIOS ECONOMIQUES ET TECHNOLOGIQUES A L'HORIZON 2060

Richard GRIMAL

Directeur d'études économie des transports

Centre d'Etudes et d'Expertise sur les Risques, l'Environnement, la Mobilité et l'Aménagement (CEREMA)

FAUT-IL REDUIRE L'USAGE DE LA VOITURE ?

COUTS SOCIAUX ET BENEFICES ENVIRONNEMENTAUX DE DIFFERENTS SCENARIOS ECONOMIQUES ET TECHNOLOGIQUES A L'HORIZON 2060

Résumé :

Avec l'augmentation du trafic automobile, les externalités négatives de l'usage de la voiture n'ont cessé de progresser, en particulier les émissions de polluants et de gaz à effet de serre. Face à ce constat, les pouvoirs publics ont mis en œuvre des politiques volontaristes pour réduire l'usage de la voiture, qui semblent toutefois atteindre leurs limites, échouant notamment à traiter le problème de la dépendance automobile dans les espaces peu denses. Aussi, dans un contexte de renchérissement de l'énergie à long terme, apparaît-il de plus en plus nécessaire de compléter l'analyse des politiques de mobilité non seulement au regard des enjeux environnementaux mais également en termes d'équité. Pour cela, plusieurs scénarios sont considérés, correspondant à des hypothèses différenciées en matière d'évolution des prix des carburants, des revenus et de la consommation des véhicules, dont les répercussions sur les émissions de gaz à effet de serre, l'usage moyen de la voiture et l'effort budgétaire des ménages sont analysées à l'horizon 2060. Afin de projeter ces indicateurs, un modèle séquentiel de génération de trafic est utilisé, tenant compte de l'évolution du nombre de détenteurs du permis de conduire équipés d'un véhicule personnel. Les résultats obtenus suggèrent que le progrès des motorisations représente un moyen efficace de réduire simultanément les émissions et l'effort budgétaire des ménages, en répondant donc à la fois aux enjeux sociaux et environnementaux. En revanche, une forte augmentation du prix du carburant présente une efficacité limitée au niveau de la réduction des émissions en raison de la dépendance automobile, tout en causant une forte augmentation de l'effort financier des ménages. Pour finir, quelques pistes de recherche sont indiquées en vue d'approfondir la présente étude, comme un test de la sensibilité des résultats à différentes valeurs de l'élasticité de l'usage de la voiture par rapport au coût kilométrique, une étude approfondie de la relation entre progrès technique et prix du carburant sur le long terme, l'existence de possibles effets paradoxaux des hausses de prix du carburant qui tendraient à en réduire l'efficacité environnementale, ainsi qu'une évaluation des probabilités attachées à chaque scénario.

JEL : D61, E27, H31, Q55, R40, R48

Mots-clefs : durabilité, équité, dépendance automobile, projections, scénarios

Abstract :

Along with the growing car traffic, pollutant and GHG emissions have constantly been increasing. Facing this evidence, the French government and local authorities have implemented willful policies during the last two decades in order to reduce car use in French cities. However, such policies could be nearly reaching their limits, in particular as they fail in dealing with the issue of car dependency in low-density areas. So, in a context of increasing fuel prices on the long-run, more attention has to be paid to social costs and equity issues related to sustainable travel policies, in addition to a more environmentally-focused approach. In order to do so, several scenarios were considered with various assumptions regarding the evolution of fuel prices, incomes and vehicle fuel efficiency up to 2060, of which consequences on GHG emissions, average car mileage per adult, and fuel budget coefficients were analyzed. A sequential model of traffic generation was used, accounting for the number of driving license holders and main users of a vehicle. Forecasting results suggest that technical progress could simultaneously reduce GHG emissions and household budget coefficients, thus providing a satisfactory answer to both sustainability and equity issues. On the other hand, rising fuel prices have limited efficiency in reducing GHG emissions because of car dependency, while strongly lifting up budget coefficients. We finally suggest more in-depth insights into this issue, including a sensitivity analysis to different values of mileage cost elasticities, a comprehensive research about the long-term relationship between fuel prices and fuel efficiency gains, the existence of possibly paradoxical effects of fuel price increases that would reduce their environmental efficiency, and an assessment of scenario probabilities.

JEL: D61, E27, H31, Q55, R40, R48

Keywords : sustainability, equity, car dependency, forecasts, scenarios

FAUT-IL REDUIRE L'USAGE DE LA VOITURE ?

COÛTS SOCIAUX ET BÉNÉFICES ENVIRONNEMENTAUX DE DIFFÉRENTS SCÉNARIOS ÉCONOMIQUES ET TECHNOLOGIQUES À L'HORIZON 2060

1) Introduction générale

Pendant plusieurs décennies, la diffusion massive de l'équipement automobile a renforcé l'hégémonie de la voiture dans les pratiques de mobilité, entraînant également la forte croissance du trafic automobile, et avec elle des externalités négatives liées à l'usage de la voiture, notamment environnementales (pollution, changement climatique...). A l'échelle mondiale, le secteur des transports contribuait à hauteur de 23 % aux émissions totales de gaz à effet de serre en 2007 (Saboori et alii., 2014). En France, ce chiffre s'établissait à 28,9 % en 2015 d'après les Comptes Transports de la Nation, dont 92,8 % émanaient du seul secteur routier (MEEM, 2016). Face à ce constat, les pouvoirs publics ont mis en œuvre diverses mesures visant à réduire la place de la voiture au sein du système des déplacements. A première vue, ces politiques semblent avoir porté leurs fruits, avec le plafonnement de la circulation dans l'ensemble des pays développés, et une baisse de la mobilité dans les grandes agglomérations. Toutefois, un examen approfondi suggère que les facteurs économiques ont joué un rôle plus déterminant, en particulier la forte augmentation du prix du carburant survenue dans les années 2000. Aussi, ces évolutions ne présentent-elles pas nécessairement un caractère durable. Dans la section 2, sont rappelées les principales politiques déployées jusqu'ici en vue de réduire l'empreinte environnementale de la voiture ainsi que leurs limites, qui impliquent d'étudier d'autres options de politiques publiques s'appuyant notamment sur les incitations financières et le progrès technologique. La nécessité d'accorder davantage d'attention aux coûts sociaux des politiques climatiques et aux enjeux d'équité y est également soulignée, en liaison avec la problématique de la dépendance automobile et du renchérissement de l'énergie. Dans la suite de l'analyse, un modèle économétrique est utilisé afin de projeter l'usage de la voiture, le coefficient budgétaire des ménages pour les dépenses en carburant et les émissions de CO₂ à l'horizon 2060, date pour laquelle des projections démographiques de l'INSEE sont par ailleurs disponibles. Dans les sections 3 et 4, on présente l'approche de modélisation retenue, ainsi que les données utilisées pour l'estimation du modèle. La section 5 présente les résultats de l'estimation, tandis que la section 6 est consacrée aux projections réalisées à partir du modèle. Enfin, dans la section 7, la discussion est élargie aux limites de l'analyse et aux perspectives de recherches ultérieures susceptibles de permettre d'approfondir la question en vue de consolider les résultats obtenus.

2) Quelles politiques pour réduire l'empreinte environnementale de la voiture ?

Depuis les années 1990, les décideurs ont mis en œuvre diverses politiques visant à maîtriser l'usage de la voiture et à en réduire l'empreinte environnementale. Des normes ont par exemple été établies en matière d'émissions de polluants des véhicules neufs, aux Etats-Unis à travers le Clean Air Act Amendment (1990), ou au niveau européen avec les normes euro¹. Un grand nombre de pays ont par ailleurs adopté des engagements contraignants en matière de lutte contre le changement climatique, à la suite de la conférence de Kyoto en 1997, ou plus récemment de la COP 21 à Paris en 2015.

¹ Notamment dans le cadre de la directive 91/441/EEC de 1991 et des suivantes jusqu'à la norme Euro 6 en 2014.

L'ensemble des pays de l'Union Européenne dont la France, se sont engagés à diviser par quatre leurs émissions de gaz à effet de serre à l'horizon 2050. Par ailleurs, des politiques très actives sont menées au niveau local visant :

- A accroître et à diversifier l'offre de transport de manière à augmenter les opportunités de report vers les modes alternatifs - en particulier *via* les transports en commun qui ont connu un fort développement depuis les années 1990 (Hass-Klau et Crampton, 2005) - en veillant à une meilleure articulation entre urbanisme et transports, ainsi qu'à une meilleure coordination des modes de transports entre eux ;

- A dissuader l'usage de la voiture, soit par voie réglementaire (voies réservées, zones de circulation restreinte, circulation alternée...), soit en rendant la circulation et le stationnement plus difficiles de manière à dégrader sa performance relative à travers le partage de la voirie, la réduction des limites de vitesse autorisées, la tarification du stationnement ;

- A inciter les individus à «changer leurs comportements», en les sensibilisant aux questions d'environnement ou encore en montrant les vertus des modes actifs pour la santé.

A première vue, ces politiques semblent avoir porté leurs fruits. Ainsi, pendant environ une dizaine d'années, on a observé un plafonnement de la circulation, en France (CGDD, 2012) comme dans l'ensemble des pays développés (Millard-Ball et Schipper, 2011), ainsi qu'une baisse significative du recours à la voiture dans les grandes agglomérations (Puentes et Tomer, 2009), en partie compensée par le retour des transports en commun et des modes actifs (Newman et Kenworthy, 2011). Cependant, le plafonnement de la circulation n'est pas limité aux agglomérations mais s'observe également dans les zones de l'espace peu dense, incluant les communes périurbaines et l'espace rural (Grimal et alii., 2013), qui n'ont pourtant pas bénéficié des mêmes améliorations en matière d'offre de transports en commun. Les politiques publiques ne suffisent donc pas à elles seules à expliquer cette inflexion. Certains y ont vu le signe d'un déclin inexorable de la voiture (Newman et Kenworthy, 2011) : c'est l'hypothèse du « peak car ». Une autre explication fréquemment invoquée dans la littérature est l'existence d'un changement de paradigme dans les nouvelles générations, avec une évolution des préférences et des styles de vie qui se traduit par un recul de l'usage de la voiture, en particulier chez les jeunes hommes (Kuhnimof et alii., 2012). Toutefois, les recherches plus récentes suggèrent que l'accès à la voiture serait simplement différé (Garikapati et alii., 2016), en lien avec l'allongement des études et l'entrée plus tardive dans la vie adulte (Billari et Liefbroer, 2010), la métropolisation, la précarisation de la jeunesse.

En fait, les déterminants économiques ont probablement joué le rôle le plus important dans les évolutions récentes (Bastian et alii., 2016), qui semblent surtout s'inscrire dans une stratégie de maîtrise des coûts de la mobilité, dans un contexte d'augmentation sensible du prix des carburants depuis le milieu des années 1990 dont les effets se sont trouvés renforcés par la crise financière de 2008. De ce fait, celles-ci ne présentent pas forcément un caractère durable. Le trafic automobile repart d'ailleurs à la hausse depuis quelques années, en liaison avec la baisse récente du prix des carburants (Maurin, 2017). Bien que nécessaires, ces politiques se heurtent en fait à certaines limites structurelles, la principale d'entre elles étant qu'elles se sont surtout efforcées d'augmenter l'offre en milieu urbain dense, c'est-à-dire là où les ménages étaient déjà les moins captifs de la voiture. Elles échouent donc à traiter le problème crucial de la dépendance automobile (Newman et Kenworthy,

1999), qui touche davantage les zones périurbaines et rurales, où la part modale de la voiture continue d'augmenter (Hubert, 2009).

En complément des politiques actuelles, il apparaît donc nécessaire d'étudier d'autres options de politiques publiques. Le progrès technique et organisationnel représente sans doute l'une d'entre elles, notamment à travers les perspectives de progrès des motorisations pour accroître l'efficacité énergétique des véhicules (Stanley et alii., 2011), qui permettent d'anticiper de manière raisonnablement confiante une diminution significative des émissions à l'horizon de quelques décennies (An et alii., 2001 ; ADEME, 2012). Ces projections reposent sur l'hypothèse d'une poursuite du progrès des motorisations thermiques, amplifié à travers une diffusion plus importante des nouvelles motorisations moins dépendantes aux énergies fossiles, en particulier électriques et hybrides. En théorie, les politiques publiques peuvent contribuer à accélérer ce processus en stimulant la recherche en vue de réduire les niveaux d'émissions des véhicules mis sur le marché, et en favorisant une diffusion rapide des innovations (Eppstein et alii., 2011)² à travers un système d'aides financières à l'achat modulées en fonction de l'efficacité énergétique des véhicules³.

Les économistes de l'environnement se montrent toutefois critiques à l'encontre du progrès technique comme moyen principal de réduire les impacts externes de l'activité humaine, l'une des observations les plus récurrentes étant l'existence d'un effet de rebond, à savoir que les bénéfices du progrès technique seraient annulés par l'accroissement de l'activité qui en résulte. En matière de transport, les constructeurs utiliseraient le gain d'efficacité énergétique afin de produire des véhicules plus lourds et plus puissants (Van den Brink et Van Wee, 2001) ; ou encore, les automobilistes tirent parti de la baisse induite du coût kilométrique afin d'accroître leur niveau d'usage de la voiture (Greene et alii., 1999). Aussi les économistes lui préfèrent-ils généralement les instruments financiers s'appuyant sur des mécanismes de marché. De tels dispositifs ont d'ores et déjà été instaurés au niveau international (World Bank et Ecofys, 2014), parmi lesquels figurent les systèmes de quotas d'émissions associés à des marchés de permis négociables, ainsi que l'instauration de taxes carbone dans plusieurs pays⁴, visant à imposer les produits en fonction du contenu en CO₂ émis lors de leur production ou de leur consommation. En France, une composante carbone a été introduite dans la Taxe Intérieure de Consommation sur les Produits Energétiques (TICPE) dans le cadre de la loi sur la transition énergétique. Partant d'un niveau initial de 14,5 €/tCO₂ en 2015, elle doit augmenter progressivement pour atteindre 100 €/tCO₂ en 2030, de manière à refléter les dommages croissants causés à l'environnement par le changement climatique (Quinet, 2009). La taxe carbone a été conçue comme

² Un exemple de cette politique est la prime à la casse, le bonus-malus et le super-bonus instaurés entre 2007 et 2011, qui ont contribué à redynamiser temporairement le marché de l'automobile. Ces incitations ont bien contribué à accélérer le renouvellement du parc en dopant les ventes de véhicules neufs, tout en orientant les achats des ménages vers des véhicules moins polluants, mais avec des effets limités dans le temps. Après une accélération des ventes liée à l'anticipation de la fin du dispositif, on a constaté ensuite un effondrement des ventes. Les aides financières ont donc surtout contribué à générer un effet d'aubaine en amenant les ménages à anticiper certaines décisions d'achat. Au contraire, des incitations pérennes permettraient sans doute de produire des effets plus durables, en réduisant le coût d'acquisition annualisé des véhicules.

³ En amenant les ménages à anticiper leurs décisions d'achats, ces incitations financières sont susceptibles d'être à l'origine de surcoûts pour les ménages, compte tenu d'une durée de conservation réduite des véhicules qui en accroît le coût d'acquisition annualisé. On fait toutefois l'hypothèse que ces derniers demeurent rationnels et qu'ils ne consentent à une acquisition anticipée que si celle-ci est compensée par les aides financières et les économies d'énergie induites à long terme, ce que tendent à confirmer certaines analyses (Busse et alii., 2013). Ce problème est susceptible de concerner notamment les véhicules électriques, dont le prix d'acquisition est pour l'instant nettement supérieur à celui des motorisations classiques (Brownstone et alii., 2000), en plus du manque d'infrastructures de recharge (Citi, 2009) et de la faible autonomie (Axsen et alii., 2010) qui est susceptible d'entraver les ménages dans leur mobilité.

⁴ Parmi lesquels figurent notamment des pays de l'Union Européenne, des Etats scandinaves, certaines provinces du Canada (Murray et Rivers, 2015).

une taxe «pigovienne» - du nom de l'économiste français Pigou (1920) - qui permet de faire supporter aux acteurs économiques le coût des nuisances qu'ils génèrent à travers la production et la consommation de biens et de services.

En matière de mobilité, la fiscalité environnementale est préconisée afin d'accroître le coût d'utilisation des véhicules et de pénaliser l'achat des véhicules les plus polluants. Compte tenu de la sensibilité des comportements au facteur de coût (Calvet et Marical, 2011), l'augmentation du prix du carburant à travers la taxe carbone est susceptible de contribuer à réduire le niveau des émissions à travers une baisse immédiate de l'usage de la voiture, mais aussi en déterminant des changements de comportements à plus long terme, en incitant par exemple les ménages à acquérir des véhicules plus efficaces ou à rapprocher leur lieu de résidence de leur lieu de travail. En contribuant à modifier le comportement des automobilistes, elle est également susceptible de réorienter les constructeurs vers la production de véhicules moins polluants de manière à s'adapter à l'évolution de la demande. De fait, la littérature suggère bien que le progrès de l'efficacité énergétique du parc est sensible au prix du carburant (Graham et Glaister, 2004 ; Kemel et al., 2011). Toutefois, on peut s'interroger sur la réalité de cette interaction lorsqu'on raisonne non plus à court mais à long terme. En effet, l'effet des incitations financières est surtout d'accélérer la diffusion du progrès technique à travers la rotation du parc, en réduisant le délai entre la mise sur le marché d'une innovation et sa diffusion à l'ensemble de la population. Elles contribuent également à réorienter les ménages vers l'achat de véhicules plus efficaces dans le cadre de l'offre disponible, mais avec des effets vraisemblablement limités en termes d'améliorations technologiques induites⁵ (Cuenot et Papon, 2007). Dans cette étude, on fait donc l'hypothèse que dans le cadre de scénarios à très long terme, il est possible de négliger le progrès technologique induit, ce qu'on traduira dans la formulation des scénarios par des hypothèses indépendantes en matière d'évolution de l'efficacité énergétique du parc et du prix des carburants⁶.

Par ailleurs, les alternatives de substitution dont disposent les acteurs conditionnent largement l'efficacité aussi bien que l'équité des mesures basées sur des instruments économiques, dont en particulier la taxe carbone (Metcalf, 2015), dont les répercussions potentielles sur les dépenses de logement et de transport (Mathur et Morris, 2014) ainsi que la nature potentiellement régressive (Combet, 2013 ; Murray et Rivers, 2015) ne sont pas ignorés. Ces problèmes sont surtout susceptibles de concerner les ménages modestes ainsi que les résidents des zones peu denses, qui disposent de capacités d'adaptation limitées en vue de réduire leur mobilité (Combet, 2013) et dont la structure de consommation est globalement plus dépendante aux énergies fossiles (Mathur et Morris, 2014). Ces enjeux tendent à se renforcer avec l'accroissement de la dépendance automobile qui accompagne le mouvement de périurbanisation, dans un contexte de renchérissement de l'énergie qui contribue à rendre les ménages de plus en plus vulnérables sur le plan financier (Dodson et Sipe, 2007). Or, à l'heure actuelle, les questions d'équité et de durabilité des différentes options de politiques publiques font rarement l'objet d'une analyse conjointe dans le cadre d'une même étude, notamment en France.

⁵ Si on considère par exemple les effets de la hausse des prix des carburants survenue pendant la décennie 2000, celle-ci a surtout contribué à favoriser la diésélisation du parc au détriment des motorisations essence (Hivert, 1996).

⁶ Certes, les diverses incitations sont susceptibles d'inciter les constructeurs à réaliser un effort supplémentaire de recherche afin de développer des modèles aussi efficaces que possible. Toutefois, on peut estimer que ces derniers ont déjà largement intégré la problématique du renchérissement de l'énergie depuis les premiers chocs pétroliers dans le cadre d'un effort de recherche permanent plutôt que déterminé au jour le jour en fonction des fluctuations du prix des carburants. Les tendances de long terme ne peuvent que crédibiliser la perspective d'une poursuite de la hausse des prix des carburants, et donc contribuer à pérenniser cet effort de recherche. Par ailleurs, les incitations financières et fiscales ne sauraient exercer une action magique sur le rythme du progrès technique, en particulier si les gains susceptibles d'être obtenus par les constructeurs butent à un moment ou un autre sur des limites techniques.

Dans l'analyse qui suit, on s'efforce de contribuer à pallier ce manque, en analysant les impacts de différents scénarios sur l'usage de la voiture, le coefficient budgétaire des ménages pour les dépenses de carburants et les émissions de gaz à effet de serre. On utilise pour cela un modèle économétrique de l'usage de la voiture qui est présenté dans la section suivante.

3) Structure du modèle : une approche séquentielle, individuelle, segmentée

Afin de projeter le trafic généré par l'ensemble des véhicules personnels à l'horizon de référence, on utilise un modèle reposant sur une approche séquentielle⁷ et individuelle, permettant de tenir compte du processus de diffusion dans le temps du permis de conduire et du véhicule personnel. Par construction, la détention du permis de conduire est une condition nécessaire pour qu'un individu soit l'utilisateur principal d'au moins un véhicule, et l'usage de chaque véhicule – en termes de kilomètres parcourus – est rapporté à son utilisateur principal. Par conséquent, seuls les utilisateurs principaux de véhicules se voient affectés un kilométrage strictement positif, tandis que celui-ci est nul pour les personnes qui ne sont pas l'utilisateur principal d'un véhicule. Le jeu de données utilisé pour la modélisation s'appuie sur des observations répétées dans le temps, ce qui implique une spécification adaptée aux données de panel, qui est concrètement la suivante :

$$z_{it}^* = \nu Z_i^2 + \gamma X_{it}^2 + \alpha_i + u_{it}, z_{it} = 1 \text{ si } z_{it}^* > 0, \text{ sinon } z_{it} = 0 \quad (1)$$

$$y_{it}^* = \delta Z_i^1 + \beta X_{it}^1 + \eta_i + \varepsilon_{it}, \text{ si } z_{it} = 1 ; y_{it} = 1 \text{ si } y_{it}^* > 0, \text{ sinon } y_{it} = 0 ; y_{it} = 0 \text{ si } z_{it} = 0 \quad (2)$$

$$w_{it} = \mu Z_i^3 + \theta X_{it}^3 + \xi_i + r_{it}, \text{ si } y_{it} = 1, \text{ sinon } w_{it} = 0 \quad (3)$$

Les observations s'organisent selon deux dimensions, individuelle et temporelle, représentées respectivement par les indices i et t . La structure de panel implique également une spécification particulière des termes d'erreur, décomposés entre un effet spécifique individuel permanent, et une perturbation « idiosyncratique », relative à l'individu i et à la période t . Par exemple, la perturbation pour le modèle de permis de conduire peut être décomposée entre l'effet individuel α_i , de variance σ_α^2 , et une perturbation u_{it} , de variance normalisée à 1. L'équation (1) décrit le sous-modèle pour la probabilité d'avoir le permis de conduire ; l'équation (2) pour la probabilité d'être « motorisé » ; l'équation (3) pour l'espérance du trafic généré – exprimé en véhicules*km - par les véhicules dont un individu est l'utilisateur principal. Les modèles (1) et (2) sont des modèles *probit* à erreurs composées, dans lesquels les variables dépendantes z_{it}^* et y_{it}^* représentent respectivement les utilités latentes d'avoir le permis et d'être utilisateur principal d'un véhicule, parmi les détenteurs du permis. Le modèle (3) est un modèle de régression linéaire généralisé. Dans chaque équation, les variables Z_i représentent les caractéristiques individuelles permanentes, ici les variables de génération et de genre, tandis que les variables X_{it} représentent les caractéristiques qui varient au cours du temps, ici le revenu par unité de consommation, la densité moyenne communale et le coût d'usage des véhicules⁸. ν , γ , δ , β , μ , et θ désignent les paramètres associés aux variables explicatives du modèle. On a par ailleurs choisi de segmenter le modèle pour tenir compte de l'hétérogénéité des comportements individuels en fonction d'un certain nombre de critères, à savoir le genre, le type de ménage (en distinguant entre les

⁷ On a également testé un modèle conjoint de motorisation et d'usage de type Tobit II dans le cadre de précédentes analyses (Grimal, 2017), que l'on a estimé par la méthode en deux étapes de Heckman (1979). Ce modèle suppose que certains déterminants non-observés influent conjointement sur les décisions de motorisation et d'usage des véhicules : par exemple, le choix de se motoriser est potentiellement corrélé à un fort besoin d'utilisation de la voiture. Néanmoins, le test conclut à l'absence de corrélation significative. On a donc considéré ici que ces décisions étaient indépendantes et s'inscrivaient dans un processus séquentiel.

⁸ On a choisi d'estimer une sensibilité de l'usage de la voiture par rapport au coût kilométrique plutôt qu'au prix du carburant, de manière à intégrer l'effet de rebond induit par le progrès technique, qui résulte directement de la sensibilité des comportements au coût d'usage des véhicules.

personnes seules et les personnes qui vivent en couple), l'existence d'une activité professionnelle et le type de zone de résidence (en distinguant entre les résidents des agglomérations et ceux des espaces peu denses, incluant les zones périurbaines et les communes de l'espace rural).

4) Données utilisées

Pour l'estimation du modèle, on utilise le fichier *ParcAuto*, constitué d'un panel de ménages volontaires résidant en France métropolitaine enquêtés chaque année sur les véhicules dont ils disposent et leur utilisation. Environ six à sept-mille ménages sont interrogés, et le panel est renouvelé d'environ un tiers chaque année. Réalisée par l'institut de sondage TNS-SOFRES depuis 1976, l'enquête est financée par un consortium de partenaires publics et privés et exploitée par l'Institut Français des Sciences et Technologies pour les Transports, l'Aménagement et les Réseaux (IFSTTAR). L'échantillon n'étant pas tiré de manière aléatoire, il est donc nécessaire de le redresser en fonction d'un certain nombre de variables socio-démographiques et de localisation, les cinq critères utilisés étant la région de résidence, la taille de l'agglomération de résidence⁹, la catégorie socio-professionnelle du chef de ménage, l'âge du chef de ménage et le nombre de personnes dans le foyer. La base de données est structurée selon trois niveaux, portant sur la description des ménages, l'autre sur les individus qui les composent, et un dernier sur les véhicules et leurs caractéristiques. Jusqu'à trois véhicules par ménage sont décrits, incluant les voitures particulières mais également les véhicules utilitaires légers. Il est possible de connaître, pour chaque véhicule, son utilisateur principal. Etant donné que la majorité est requise pour conduire un véhicule, l'estimation du modèle s'appuie uniquement sur les individus âgés de dix-huit ans et plus au moment de l'enquête.

	Hommes	Femmes	Tous
Génération (en colonne)			
< 1930	10,0	11,8	10,9
1930-45	20,4	21,3	20,8
1945-60	25,0	21,9	23,4
1960-75	30,8	29,6	30,2
> 1975	13,8	15,4	14,7
Revenu moyen	18627	17888	18240
Zones (en colonnes)			
Villes-centres	29,6	32,3	30,3
Banlieues	28,7	29,2	29,2
Urbanisation diffuse	41,7	38,5	40,5
Taux de détenteurs du permis (%)	90,8	79,9	85,1
Taux d'adultes motorisés chez les détenteurs du permis (%)	79,7	57,1	68,5
Taux d'adultes motorisés (%)	72,2	45,0	57,9
Usage de la voiture/adulte motorisé (veh*km)	15291	12418	13852
Usage de la voiture (veh*km)	10977	5625	8160

Tableau 1 : Caractéristiques de l'échantillon au regard des principales variables utilisées dans le modèle

Certaines variables présentent des valeurs manquantes : c'est notamment le cas du revenu et du kilométrage annuel parcouru par certains véhicules. Pour éviter de renoncer à utiliser ces observations, ce qui conduirait à une perte d'information importante et un risque de biais potentiel, on utilise la méthode du « hot-deck »¹⁰. Les variables font en outre l'objet de codages et de transformations préalables. Les effets d'âge et de génération sont estimés en divisant la population en tranches homogènes de cinq ans¹¹. Le revenu du ménage est divisé par le nombre d'unités de consommation

⁹ L'échantillon n'est donc pas stratifié spatialement mais il inclut des indicatrices de localisation dans les variables de redressement.

¹⁰ On commence par identifier les déterminants de la variable dépendante dont on souhaite imputer les valeurs manquantes. Puis, les observations sont classées hiérarchiquement en fonction des valeurs des variables explicatives. Enfin, on impute à l'observation qui présente une valeur manquante la valeur qui la précède ou lui succède immédiatement.

¹¹ A l'exception des générations nées avant 1915 et des générations nées après 1990 qui, en raison de leur faible effectif, sont à chaque fois rassemblées en un seul groupe. Il en va de même pour les personnes de plus de quatre-vingt-quinze ans. Enfin, observons que le groupe

de manière à pouvoir comparer des ménages de taille et de composition différentes¹². Un indicateur de prix du carburant, exprimé en €/litre, est obtenu en pondérant le prix de chaque type de carburant par la structure de la flotte de véhicules des ménages (essence/diesel/GPL...). On calcule également un indicateur de coût d'usage des véhicules en tenant compte de la consommation des véhicules (en l/100 km), exprimé cette fois en €/km. Par ailleurs, toutes les grandeurs monétaires – revenus et prix des carburants – sont corrigées de l'inflation en utilisant l'indice des prix à la consommation de l'INSEE, et exprimées en € constants.

5) Estimation du modèle

Dans le cas du modèle (3) qui est linéaire, l'estimation des paramètres est basée sur l'estimateur des moindres carrés quasi-généralisés (MCOG), qui est choisi de manière à minimiser la variance des estimations. Dans le cas des modèles (1) et (2) - nous utilisons l'estimateur du maximum de vraisemblance (MV), qui maximise la vraisemblance des séquences d'événements observés. En plus des paramètres du modèle, on estime également des élasticités par rapport au revenu pour les différentes étapes de la génération de trafic, ainsi qu'au coût d'usage des véhicules (en €/km) dans le modèle (3). Les résultats d'estimation sont donnés dans le tableau 2 pour une segmentation partielle du modèle basée sur le genre.

Les effets de génération sont présents à la fois chez les hommes et les femmes : toutes choses égales par ailleurs, la probabilité d'avoir le permis progresse jusqu'aux générations nées dans les années 1960 chez les hommes, et jusqu'aux générations nées dans les années 1970 chez les femmes. En revanche, elle recule dans la génération née dans les années 1980, parfois qualifiée de « génération Y »¹³. Le revenu exerce également une influence sur la probabilité d'avoir le permis, compte tenu du coût de la préparation aux examens qui peut être dissuasif pour les plus modestes (Avrillier et al., 2010). Enfin, la variance des effets individuels est plus élevée pour les femmes, ce qui peut sans doute s'expliquer par une certaine proportion de femmes au foyer et les possibilités de mutualisation de l'usage du véhicule principal, conduisant certaines femmes à renoncer au permis de conduire, surtout dans les générations plus anciennes.

Toutes choses égales par ailleurs, la probabilité d'être utilisateur principal d'un véhicule parmi les détenteurs du permis de conduire progresse continûment d'une génération à la suivante, aussi bien chez les hommes que chez les femmes. En revanche, les effets d'âge diffèrent. Chez les hommes, la probabilité d'être utilisateur principal d'un véhicule progresse continûment jusqu'à soixante-quinze ans, avant de décroître. Chez les femmes, le pic de motorisation se situe plutôt dans la tranche 45-50 ans, correspondant à une période où les contraintes de la vie professionnelle et familiale sont très fortes en raison de l'activité professionnelle mais également de la nécessité d'accompagner les enfants scolarisés. Il s'agit également d'une période où les ménages résident plus fréquemment au sein des zones périurbaines et sont donc davantage captifs de l'automobile. L'effet du revenu sur la probabilité d'être l'utilisateur principal d'un véhicule est comparable entre les hommes et les femmes. Enfin, la variance des effets individuels est plus élevée chez les femmes. D'une manière générale, les

d'âge des moins de vingt ans est plus petit que les autres, ne comprenant que les personnes âgées de dix-huit à vingt ans. Dans un objectif de modélisation, recourir à des lissages permettrait sans doute d'obtenir des résultats plus robustes. Toutefois, dans un objectif de connaissance des comportements, il est souhaitable de disposer d'une vision relativement fine des effets d'âge, surtout en début de cycle de vie où les évolutions sont rapides, en lien avec l'hypothèse d'un changement des comportements dans les nouvelles générations évoquée plus haut. De plus ici, la faiblesse des tranches d'âge n'est pas vraiment rédhibitoire au niveau de la précision des estimations, compte tenu de la taille de l'échantillon cumulé qui comporte près de 200 000 observations.

¹² Afin de calculer le nombre d'unités de consommation du ménage, on utilise l'échelle d'équivalence de l'OCDE (Houriez et Olier, 1997), qui fournit des pondérations respectives de 1 pour le chef de ménage, de 0.5 pour les autres membres adultes du ménage, et de 0.3 pour les enfants du ménage âgés de moins de quatorze ans.

¹³ Plusieurs études suggèrent néanmoins que cette génération tend simplement à différer l'accès à l'automobile en comparaison des précédentes, plutôt qu'à y renoncer définitivement (cf. section 2).

comportements en matière d'auto-mobilité sont donc plus hétérogènes chez les femmes, et influencés par davantage de facteurs.

Permis										
	Hommes					Femmes				
	Estimation	Erreur	Pr > t	Intervalle de conf. à 95%		Estimation	Erreur	Pr > t	Intervalle de conf. à 95%	
G ₀₋₁ (< 1920)	0.72	0.076	<.0001	0.57	0.87	-1.37	0.137	<.0001	-1.64	-1.10
G ₂₋₃ (1920-30)	1.22	0.042	<.0001	1.14	1.30	0.91	0.047	<.0001	0.82	1.00
G ₄₋₅ (1930-40)	1.68	0.045	<.0001	1.59	1.77	1.36	0.039	<.0001	1.28	1.43
G ₆₋₇ (1940-50)	2.17	0.086	<.0001	2.01	2.34	1.66	0.043	<.0001	1.57	1.74
G ₈₋₉ (1950-60)	1.97	0.054	<.0001	1.86	2.07	1.97	0.051	<.0001	1.87	2.07
G ₁₀₋₁₁ (1960-70)	2.40	0.071	<.0001	2.26	2.54	2.20	0.085	<.0001	2.03	2.36
G ₁₂₋₁₃ (1970-80)	2.17	0.061	<.0001	2.06	2.30	2.40	0.062	<.0001	2.28	2.53
G ₁₄₋₁₆ (> 1980)	1.18	0.071	<.0001	1.04	1.32	1.56	0.075	<.0001	1.41	1.70
18 - 20 ans	-2.35	0.072	<.0001	-2.49	-2.21	-2.60	0.076	<.0001	-2.75	-2.45
20 - 25 ans	-0.94	0.066	<.0001	-1.07	-0.81	-1.19	0.070	<.0001	-1.33	-1.06
Niveau de vie	0.000040	1.66E-6	<.0001	0.000036	0.000043	0.000027	1.621E-6	<.0001	0.000024	0.000030
σ_{η}^2	2.90	0.068	<.0001	2.77	3.04	4.96	0.084	<.0001	4.80	5.12
Motorisation des détenteurs du permis										
	Hommes					Femmes				
	Estimation	Erreur	Pr > t	Intervalle de conf. à 95%		Estimation	Erreur	Pr > t	Intervalle de conf. à 95%	
G ₀₋₁ (< 1920)	-2.22	0.192	<.0001	-2.59	-1.84	-1.96	0.232	<.0001	-2.41	-1.51
G ₂₋₃ (1920-30)	-1.83	0.135	<.0001	-2.09	-1.57	-1.71	0.139	<.0001	-1.99	-1.44
G ₄₋₅ (1930-40)	-1.51	0.123	<.0001	-1.75	-1.27	-1.55	0.115	<.0001	-1.77	-1.32
G ₆₋₇ (1940-50)	-1.06	0.111	<.0001	-1.27	-0.84	-1.33	0.107	<.0001	-1.54	-1.12
G ₈₋₉ (1950-60)	-0.81	0.095	<.0001	-0.99	-0.62	-0.50	0.095	<.0001	-0.69	-0.32
G ₁₀₋₁₁ (1960-70)	-0.47	0.078	<.0001	-0.63	-0.32	-0.24	0.079	0.0024	-0.39	-0.08
G ₁₂₋₁₃ (1970-80)	-0.33	0.069	<.0001	-0.46	-0.19	-0.14	0.070	0.0490	-0.27	-0.00
18-20 ans	-0.53	0.094	<.0001	-0.71	-0.34	-0.93	0.104	<.0001	-1.14	-0.73
20-25 ans	0.43	0.064	<.0001	0.31	0.56	0.16	0.066	0.0190	0.03	0.28
25-30 ans	1.38	0.071	<.0001	1.24	1.52	0.84	0.069	<.0001	0.70	0.98
30-35 ans	1.86	0.079	<.0001	1.71	2.02	1.22	0.077	<.0001	1.07	1.37
35-40 ans	2.11	0.084	<.0001	1.95	2.28	1.36	0.082	<.0001	1.20	1.52
40-45 ans	2.30	0.092	<.0001	2.12	2.48	1.38	0.089	<.0001	1.20	1.55
45-50 ans	2.55	0.099	<.0001	2.36	2.74	1.43	0.096	<.0001	1.25	1.62
50-55 ans	2.74	0.107	<.0001	2.53	2.94	1.36	0.103	<.0001	1.16	1.57
55-60 ans	3.08	0.115	<.0001	2.86	3.31	1.14	0.108	<.0001	0.93	1.35
60-65 ans	3.52	0.122	<.0001	3.28	3.75	0.98	0.112	<.0001	0.76	1.20
65-70 ans	3.65	0.127	<.0001	3.40	3.90	0.89	0.116	<.0001	0.67	1.12
70-75 ans	3.76	0.133	<.0001	3.50	4.02	0.78	0.122	<.0001	0.54	1.02
75-80 ans	3.58	0.139	<.0001	3.31	3.85	0.66	0.132	<.0001	0.40	0.92
80-85 ans	3.12	0.152	<.0001	2.82	3.42	0.19 (NS)	0.155	0.2200	-0.11	0.49
85-90 ans	2.18	0.192	<.0001	1.80	2.56	-0.65	0.222	0.0036	-1.08	-0.21
90-95 ans	1.84	0.322	<.0001	1.21	2.47	-2.19	0.611	0.0003	-3.38	-0.99
> 95 ans	0.54 (NS)	0.593	0.360	-0.62	1.71	-0.46 (NS)	1.153	0.6911	-2.72	1.80
Niveau de vie	0.000012	1.199E-6	<.0001	9.717E-6	0.000014	0.000011	1.16E-6	<.0001	8.532E-6	0.000013
σ_{η}^2	3.21	0.086	<.0001	3.04	3.37	4.47	0.111	<.0001	4.25	4.69
Usage des véhicules chez les adultes motorisés										
	Hommes					Femmes				
	Estimation	Erreur	Pr > t	Intervalle de conf. à 95%		Estimation	Erreur	Pr > t	Intervalle de conf. à 95%	
18-20 ans	5.56	0.208	<.0001	5.16	5.97	5.92	0.279	<.0001	5.37	6.47
20-25 ans	6.03	0.191	<.0001	5.65	6.40	6.44	0.265	<.0001	5.92	6.96
25-30 ans	6.25	0.189	<.0001	5.88	6.62	6.64	0.264	<.0001	6.13	7.16
30-35 ans	6.24	0.188	<.0001	5.88	6.61	6.60	0.263	<.0001	6.08	7.11
35-40 ans	6.16	0.187	<.0001	5.79	6.53	6.56	0.263	<.0001	6.05	7.08
40-45 ans	6.19	0.187	<.0001	5.82	6.55	6.52	0.263	<.0001	6.01	7.04
45-50 ans	6.19	0.187	<.0001	5.83	6.56	6.52	0.263	<.0001	6.00	7.03
50-55 ans	6.12	0.188	<.0001	5.75	6.48	6.43	0.264	<.0001	5.91	6.95
55-60 ans	6.09	0.188	<.0001	5.72	6.46	6.27	0.264	<.0001	5.75	6.79
60-65 ans	6.06	0.188	<.0001	5.69	6.43	6.14	0.264	<.0001	5.62	6.66
65-70 ans	5.98	0.188	<.0001	5.61	6.35	5.98	0.264	<.0001	5.47	6.50
70-75 ans	5.82	0.187	<.0001	5.45	6.18	5.77	0.264	<.0001	5.25	6.29
75-80 ans	5.58	0.187	<.0001	5.22	5.95	5.50	0.265	<.0001	4.98	6.02
80-85 ans	5.22	0.188	<.0001	4.85	5.58	5.15	0.271	<.0001	4.62	5.68
85-90 ans	4.81	0.198	<.0001	4.43	5.20	4.94	0.301	<.0001	4.35	5.53
90-95 ans	4.09	0.267	<.0001	3.56	4.61	5.33	0.528	<.0001	4.29	6.36
Niveau de vie	0.11	0.011	<.0001	0.09	0.14	0.068	0.013	<.0001	0.043	0.093
Coût d'usage des véhicules (€/km)	-0.53	0.065	<.0001	-0.65	-0.40	-0.58	0.090	<.0001	-0.76	-0.40

Tableau 2 : Estimation des paramètres du modèle

Les effets de génération n'étant pas significatifs pour l'usage des véhicules chez les adultes motorisés, ont été exclus du modèle (3), l'analyse descriptive ayant montré par ailleurs que le profil d'utilisation de la voiture en fonction de l'âge se reproduit d'une génération à l'autre. Toutes choses égales par ailleurs, l'usage des véhicules croît jusque vers l'âge de 25-35 ans avant de décroître ensuite tout au long de la vie, et cela aussi bien chez les hommes que chez les femmes. L'influence du coût kilométrique sur l'usage moyen des véhicules chez les adultes utilisateurs principaux de véhicules est quasiment

indépendante du genre, avec des élasticités estimées respectivement à $-0,53$ chez les hommes et $-0,58$ chez les femmes. De même pour la sensibilité au revenu de l'utilisation des véhicules, estimée à respectivement $+0,11$ chez les hommes contre $+0,07$ chez les femmes, ce qui est très faible en comparaison de la sensibilité au coût d'usage des véhicules.

6) Projections de l'usage moyen de la voiture, des émissions de CO₂ et du coefficient budgétaire des ménages à l'horizon 2060

6.1) Méthodologie de projection

Le modèle étant segmenté, il est nécessaire en premier lieu de répartir la population entre les segments à l'horizon de projection, de manière à tenir compte des effets de structure. Pour cela, on répartit d'abord la population par sexe et groupe d'âge, en s'appuyant sur les projections démographiques du modèle OMPHALE de l'INSEE. Pour chaque sexe et groupe d'âge, on distribue ensuite la population en fonction du type de ménage, de l'existence d'une activité professionnelle et du type de zone de résidence, en utilisant les profils de ces variables par groupe d'âge que l'on calcule à partir de l'échantillon de *ParcAuto* ayant servi à l'estimation du modèle. En effet, aussi bien le taux d'activité que le taux de personnes en couple et la proportion de résidents des zones peu denses (périurbain et espace rural) suivent une courbe en cloche, augmentant jusqu'en milieu de cycle de vie, avant de décliner. On a supposé que ces trajectoires de vie demeureraient pour l'essentiel inchangées d'ici 2060, ce qui revient à faire l'hypothèse conservatrice d'une relative stabilité des modes de vie. En revanche, on a modifié le profil de répartition spatiale des populations en fonction de l'âge de manière à tenir compte des évolutions dans la distribution spatiale des populations entre agglomérations et espaces peu denses, en cohérence avec les hypothèses retenues au niveau des dynamiques urbaines, qui seront présentées dans la section 6.2 consacrée à la description des scénarios.

Une fois la population répartie entre les segments, on se sert ensuite des paramètres du modèle pour projeter les résultats souhaités. Toutefois, les paramètres de génération ne sont connus avec certitude que pour les générations nées avant 1975. Il est donc nécessaire de formuler des hypothèses sur les comportements des générations nées après 1975. Compte tenu du tassement des écarts entre générations (Roux, 2012), on a supposé que l'ensemble des générations nées après 1975 présentaient un comportement analogue à celui de la génération 1970-75, la dernière dont le comportement est connu avec certitude. Dans chaque segment, on a ensuite généré des distributions des effets individuels conformes aux estimations du modèle. Pour obtenir des probabilités moyennes, il est nécessaire d'intégrer sur la distribution des effets individuels.

Etant donné que les effets d'âge et de génération sont négligeables pour l'usage de la voiture chez les adultes motorisés, afin de projeter l'usage des véhicules chez les adultes motorisés, on s'est contenté d'appliquer aux valeurs observées dans l'échantillon par sexe et groupe d'âge, les élasticités au revenu et au coût d'usage des véhicules estimées d'après le modèle selon la formule suivante, dans laquelle R et C représentent respectivement le revenu et le coût d'usage des véhicules, et θ_R et θ_C les élasticités du trafic par adulte par rapport à ces mêmes variables :

$$w_{it} = w_{i2010} \left(\frac{R_{it}}{R_{i2010}} \right)^{\theta_R} \left(\frac{C_{it}}{C_{i2010}} \right)^{\theta_C} \quad (4)$$

On déduit ensuite, pour chaque segment et par groupe d'âge, l'usage moyen de la voiture - en véhicules*km par adulte - en appliquant la formule suivante :

$$E(U_{it}) = E(w_{it}) P(y_{it} = 1 | z_{it} = 1) P(z_{it} = 1) \quad (5)$$

C'est-à-dire que l'usage moyen de la voiture par adulte est le produit de l'usage moyen de la voiture par adulte motorisé, par la probabilité d'avoir le permis et la probabilité de motorisation des détenteurs du permis. En multipliant le trafic moyen par adulte par le coût d'usage des véhicules – lui-même calculé à partir du prix du carburant et de la consommation des véhicules – et en divisant par le revenu des ménages, on obtient par ailleurs une estimation du coefficient budgétaire des ménages pour les dépenses en carburant. Enfin, les émissions de CO₂ par adulte sont estimées en multipliant le trafic moyen par adulte par les émissions unitaires.

6.2) Scénarios

Le choix des scénarios s'appuie sur une analyse des perspectives en matière de croissance économique et d'évolution du pouvoir d'achat, du prix des carburants et de l'efficacité énergétique des véhicules. En matière de croissance économique et d'évolution du pouvoir d'achat, on s'est inspiré des hypothèses retenues dans les projections de demande de transport du Ministère de l'Écologie, de l'Énergie et de la Mer (2016)¹⁴. Néanmoins, étant donné le taux de croissance particulièrement faible constaté dans la zone euro, qui s'inscrit dans un mouvement de baisse tendancielle du taux de croissance dans les pays développés (Banque Mondiale, 2017), on a retenu l'hypothèse moins optimiste d'une progression annuelle du pouvoir d'achat de 1 %. On a également envisagé un scénario plus pessimiste de « stagnation séculaire » (Summers, 2014), correspondant à l'entrée de l'économie mondiale dans un régime durable de croissance lente, impliquant une croissance quasi-nulle pour les pays européens et une stagnation du pouvoir d'achat dans les décennies à venir¹⁵. Pour l'évolution du prix des carburants, on s'est également inspiré des hypothèses centrale et haute des projections du MEEM reprenant les prévisions de l'Agence Internationale de l'Énergie dans le cadre du scénario « New Policies » du World Energy Outlook, à savoir un prix du baril respectivement à 117 €₂₀₁₂ et 188 €₂₀₁₂ en 2050, ce qui correspond approximativement à un doublement du prix du pétrole. On a donc considéré deux hypothèses, dans lesquelles soit le prix du carburant demeure à son niveau actuel en valeur constante, soit est multiplié par deux d'ici 2060¹⁶. Enfin, pour l'efficacité énergétique des véhicules, on s'est inspiré du scénario prospectif « Vision 2030 » de l'ADEME (2012), qui anticipe un recul des émissions unitaires de 167 à 100 gCO₂/km entre 2010 et 2030, principalement grâce au progrès continu des motorisations thermiques et marginalement à travers une diffusion plus large des motorisations hybrides non-rechargeables¹⁷. Nous avons donc considéré un scénario dans lequel les émissions unitaires continuent de diminuer au rythme de - 1 % par an, reculant de 172 à 75,7 gCO₂/km entre 2010 et 2060. Ce scénario s'inscrit dans une vision tendancielle de progrès continu des motorisations et de diversification du parc, sans impliquer de rupture technologique majeure. Néanmoins, les perspectives de progrès énergétique des motorisations (Cuenot et Papon, 2007 ; Van den Brink et Van Wee, 2001) ainsi que le taux de pénétration des véhicules électriques et hybrides

¹⁴ A savoir une croissance moyenne du PIB de 1,8 % par an entre 2012 et 2050, correspondant à une progression du pouvoir d'achat de 1,5 % annuelle. Ces prévisions sont elles-mêmes issues des prévisions de croissance de la Direction Générale du Trésor dans le cadre des travaux du Conseil d'Orientation des Retraites.

¹⁵ Compte tenu du décrochage de la zone euro par rapport à l'économie mondiale.

¹⁶ Bien entendu, le prix du carburant ne reflète pas exclusivement le prix du pétrole dans la mesure où il incorpore une très forte proportion de taxes. On s'est donc seulement inspiré de ces scénarios dans leur principe. L'hypothèse d'une multiplication par deux du prix du carburant est commode sur le plan pédagogique, puisqu'elle est symétrique de celle d'une multiplication par deux de l'efficacité énergétique des véhicules, et permet donc de comparer les impacts respectifs de ces deux facteurs pour des variations du même ordre de grandeur. On a par ailleurs exclu l'hypothèse d'une baisse du prix du carburant : en effet, bien que ce dernier manifeste une forte volatilité et qu'il ait connu une baisse dans la période récente, en liaison directe avec la baisse du prix du pétrole, plusieurs tendances de fond crédibilisent la perspective d'une hausse du prix du carburant à long terme (Calvet et Marical, 2011) : raréfaction des ressources pétrolières entraînant l'augmentation des coûts de prospection et d'extraction, tensions géopolitiques, augmentation de la demande des pays émergents, etc. La hausse continue de la fiscalité environnementale, notamment à travers la taxe carbone, ne peut que renforcer cette tendance.

¹⁷ Le niveau moyen d'émissions des véhicules neufs est quant à lui censé décroître 127 à 49 gCO₂/km, notamment grâce à une plus forte proportion de véhicules électriques et hybrides rechargeables.

(Eppstein et al., 2011) étant incertaines, nous avons également envisagé une seconde hypothèse dans laquelle la consommation des véhicules demeurerait à son niveau actuel¹⁸.

Scénarios	Hypothèses générales	Croissance économique	Prix du carburant	Efficacité énergétique	Résultats
Prix Haut/Consommation Haute (PH/CH)	Croissance modérée, tensions sur les ressources énergétiques en l'absence de progrès technique	+1 % d'augmentation annuelle du pouvoir d'achat entre 2010 et 2060	Doublement du prix du carburant à l'horizon 2060	Pas de gains au niveau de l'efficacité énergétique des véhicules	Baisse modérée de l'usage de la voiture et des émissions, hausse de l'effort budgétaire
Prix Haut/Consommation Basse (PH/CB)	Croissance modérée, tensions sur les ressources énergétiques amorties par le progrès technique			La consommation des véhicules décroît de -1 % par an, entraînant le recul des émissions unitaires de 172 à 75,7 gCO ₂ /km entre 2010 et 2060	Hausse de l'usage de la voiture, baisse du taux d'effort, forte baisse des émissions
Prix Bas/Consommation Haute (PB/CH)	Croissance modérée, stabilité des ressources énergétiques en l'absence de progrès technique		Stabilité du prix du carburant	Pas de gains au niveau de l'efficacité énergétique des véhicules	Hausse de l'usage de la voiture et des émissions, baisse du taux d'effort
Prix Bas/Consommation Basse (PB/CB)	Croissance modérée, stabilité des ressources énergétiques, progrès technique			La consommation des véhicules décroît de -1 % par an, entraînant le recul des émissions unitaires de 172 à 75,7 gCO ₂ /km entre 2010 et 2060	Forte hausse de l'usage de la voiture, forte baisse du taux d'effort et des émissions
Crise économique et énergétique	Contexte de « stagnation séculaire », tensions sur les ressources énergétiques en l'absence de progrès technique	Stagnation du pouvoir d'achat entre 2010 et 2060	Doublement du prix du carburant à l'horizon 2060	Pas de gains au niveau de l'efficacité énergétique des véhicules	Baisse modérée de l'usage de la voiture et des émissions, forte hausse du taux d'effort
Crise économique et énergétique avec progrès technique	Contexte de « stagnation séculaire », tensions énergétiques amorties par le progrès technique			La consommation des véhicules décroît de -1 % par an, entraînant le recul des émissions unitaires de 172 à 75,7 gCO ₂ /km entre 2010 et 2060	Usage de la voiture et effort budgétaire quasiment stables, forte baisse des émissions

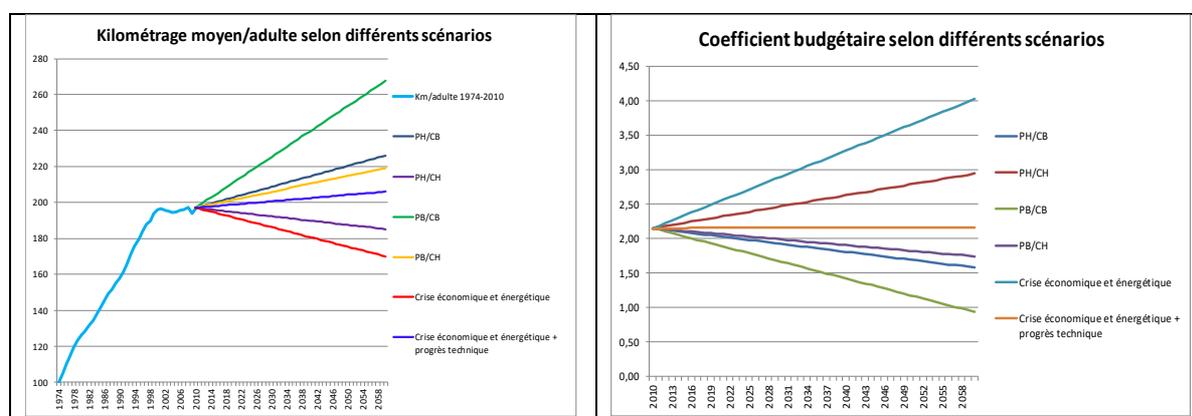
Tableau 3 : Tableau de synthèse des scénarios d'évolution des revenus, des prix du carburant et de l'efficacité énergétique à l'horizon 2060 avec leurs résultats

Une famille de six scénarios est ensuite construite en combinant ces hypothèses, qui sont présentés dans le tableau 2 avec les résultats saillants des projections pour chacun d'entre eux. Etant donné qu'on choisit de négliger les interactions entre effets de prix et progrès technique dans le cadre de projections à long terme, les évolutions respectives du prix du carburant et de l'efficacité énergétique du parc automobile sont considérées comme indépendantes. On distingue un premier groupe de quatre scénarios dans lesquels le pouvoir d'achat progresse de + 1 % en moyenne annuelle. Dans le premier d'entre eux, noté PH/CH pour « *Prix Haut – Consommation Haute* », le prix du carburant est multiplié par deux tandis que la consommation des véhicules demeure stable. Dans le deuxième scénario, noté PH/CB pour « *Prix Haut – Consommation Basse* », le prix du carburant est également multiplié par deux mais cette fois, la consommation des véhicules est orientée à la baisse. Le progrès technique, en compensant l'augmentation du prix du carburant, permet donc de faire légèrement baisser le coût d'usage des véhicules. Dans le troisième scénario, noté PB/CH pour « *Prix Bas – Consommation Haute* », qui correspond au *statu quo*, le prix du carburant et la consommation des

¹⁸ Par exemple dans le cas où le poids des véhicules continuerait d'augmenter, annulant les gains d'efficacité énergétique.

véhicules demeurent inchangés par rapport à leur niveau actuel. Enfin, dans le quatrième scénario noté PB/CB pour « *Prix Bas – Consommation Basse* », le prix du carburant demeure à son niveau actuel mais en plus, la consommation des véhicules décroît comme dans le scénario 2, ce qui permet de faire fortement diminuer le coût d’usage des véhicules. Un groupe de deux scénarios additionnels permet d’illustrer les répercussions d’une situation de récession prolongée entraînant la stagnation du revenu des ménages, aggravée par des tensions sur les ressources énergétiques qui conduisent au doublement du prix du carburant comme dans les scénarios 1 et 2. Toutefois, dans le deuxième d’entre eux, les gains d’efficacité énergétique permettent de faire baisser le niveau des émissions unitaires et d’amortir l’impact budgétaire de la hausse du prix des carburants. Enfin, dans l’ensemble des scénarios, on fait l’hypothèse d’une poursuite du desserrement des agglomérations conduisant au renforcement démographique relatif du périurbain (Floch et Lévy, 2011)¹⁹.

6.3) Résultats des projections et analyse coûts/bénéfices des scénarios au regard des enjeux d’équité et de durabilité



Graphiques 1 et 2 : Trafic moyen généré par adulte et coefficient budgétaire des ménages en 2060 selon différents scénarios, indice base 100 en 1974

Sources : Enquêtes de conjoncture auprès des ménages (ECAM), panel français sur le parc automobile et son usage (ParcAuto), calculs d’après le modèle à l’horizon 2060

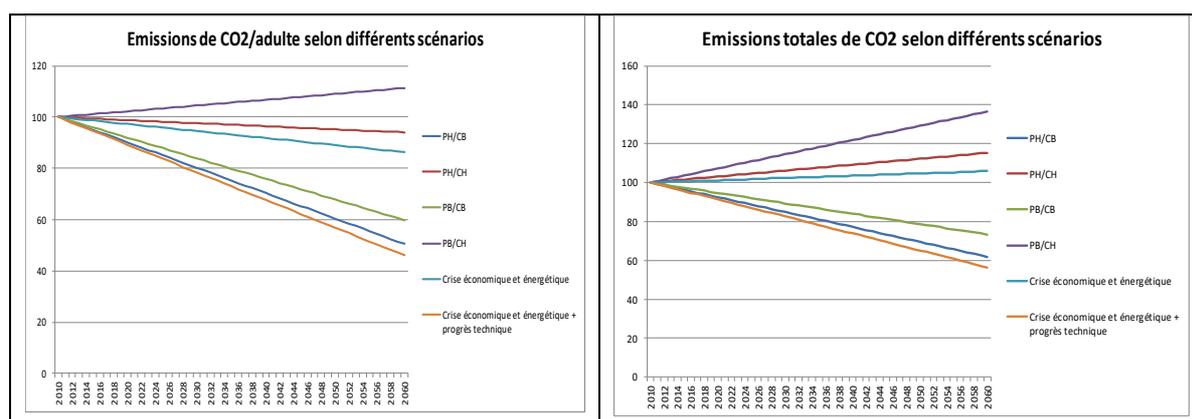
Dans l’ensemble des scénarios, le rythme de croissance du trafic moyen par adulte est nettement ralenti par rapport à celui qui avait pu être observé dans la période 1970-2000, ce qui s’explique par la proximité de la saturation dans la diffusion du véhicule personnel, avec l’épuisement des effets de génération²⁰ (Roux, 2012). Ainsi, par exemple, dans le scénario de *statu quo* PB/CH, il n’augmente que de + 11,3 % à l’horizon 2060. La progression est un peu plus importante dans le scénario PH/CB, où elle s’élève à + 14,8 %. Le scénario conduisant à la progression la plus importante de l’usage moyen de la voiture est le scénario PB/CB, dans lequel le coût d’usage des véhicules décroît fortement, avec une augmentation de + 35,9 %. Dans le scénario de crise économique et énergétique amortie par le progrès technique, l’usage moyen de la voiture n’augmente que de + 4,6 %. Seuls deux scénarios conduisent à une baisse de l’usage moyen de la voiture : il s’agit des deux scénarios d’augmentation du prix du carburant sans progrès technique, qui conduisent donc au doublement du coût d’usage des véhicules. Le premier d’entre eux est le scénario de crise économique et énergétique en l’absence de progrès technique, dans lequel l’usage de la voiture recule de – 13,7 %. Le second est le scénario PH/CH, dans

¹⁹ Plus précisément, on suppose que le rapport entre la croissance démographique dans les espaces peu denses et la croissance démographique dans les agglomérations demeure constant, la croissance démographique globale étant déterminé par le rapport entre la population projetée en 2060 et la population observée en 2008 d’après le recensement.

²⁰ Dans l’ensemble des scénarios, le vieillissement de la population contribue également à ralentir la progression de l’usage moyen de la voiture, la disparition de l’activité entraînant une baisse des taux de possession de véhicules et des niveaux d’usage de la voiture chez les personnes âgées.

lequel la progression du pouvoir d'achat permet d'amortir partiellement l'augmentation du coût d'usage des véhicules. Dans ce cas, l'usage de la voiture ne recule plus que de - 6 %.

Tout en entraînant une baisse de l'usage de la voiture, ces deux derniers scénarios conduisent également à une augmentation du coefficient budgétaire pour les dépenses en carburants, qui progresse de 2,2 à 4 % entre 2010 et 2060 dans le scénario de crise économique et énergétique sans progrès technique, mais n'atteint que 2,9 % dans le scénario PH/CH. Dans ce cas, en effet, l'augmentation des revenus permet d'amortir partiellement le doublement du prix des carburants. Dans le scénario de crise économique et énergétique amortie par le progrès technique, le coefficient budgétaire demeure quasiment stable autour de 2,2 %. Dans les deux derniers scénarios, un facteur compensateur entre donc en jeu pour limiter l'impact budgétaire de l'augmentation du prix du carburant : il s'agit de l'augmentation des revenus dans le premier cas, et du progrès technique dans le second. Enfin, trois des scénarios entraînent une diminution plus ou moins forte du coefficient budgétaire : il s'agit des scénarios de croissance PB/CH, PH/CB et PB/CB, dans lesquels le coût d'usage des véhicules demeure stable ou diminue. Dans le scénario de *statu quo* PB/CH, le coefficient budgétaire des ménages décroît de 2,7 à 1,7 %, en lien avec la progression du pouvoir d'achat. La baisse du taux d'effort est quasiment identique dans le scénario PH/CB, où il atteint 1,6 % en 2060. Enfin, le scénario PB/CB permet d'obtenir la plus forte baisse du taux d'effort. Dans ce cas, il n'atteint plus que 0,9 % en 2060.



Graphiques 3 et 4 : Emissions individuelles et totales de CO₂ en 2060 selon différents scénarios, indice base 100 en 1974

Sources : ParcAuto, Calculs d'après le modèle à l'horizon 2060

On considère enfin l'impact des différents scénarios sur les émissions de CO₂. Une claire distinction peut être établie entre les scénarios avec progrès technique, qui entraînent tous une forte diminution des émissions individuelles – entre - 40 et - 55 % par rapport à 2010 – et les scénarios sans progrès des motorisations, dans lesquels celle-ci demeure beaucoup plus limitée. Les émissions augmentent même de + 11,3 % dans l'un des scénarios : il s'agit du scénario de *statu quo* PB/CH, compte tenu de la progression de l'usage de la voiture associée à l'absence de progrès de l'efficacité énergétique. Toutes choses égales par ailleurs, la baisse de la consommation des véhicules entraîne quasiment une division par deux des émissions individuelles. En comparaison du scénario qui précède, le scénario PB/CB entraîne une diminution de - 40,3 % des émissions individuelles. De la même manière, le niveau des émissions diminue de seulement - 6 % dans le scénario PH/CH, alors qu'il décroît de - 49,5 % dans le scénario PH/CB. En revanche, l'augmentation du prix du carburant n'a, toutes choses égales par ailleurs, qu'un impact limité sur le niveau des émissions individuelles. Par exemple, une comparaison des scénarios PH/CH et PB/CH montre que le doublement du prix du carburant n'entraîne qu'une réduction supplémentaire de - 17,3 points du niveau des émissions individuelles. L'effet d'une augmentation du prix du carburant est encore plus réduit dans les scénarios avec progrès technique PH/CB et PB/CB, avec une réduction supplémentaire de seulement - 9,2 points du niveau des émissions

individuelles. Il ressort de ces éléments que le principal levier de réduction des émissions individuelles est le progrès technique, tandis que le bénéfice additionnel d'une augmentation du prix du carburant est plus réduit. Ajoutons que, si on mesure non plus seulement le niveau des émissions individuelles, mais celui des émissions totales en tenant compte de la croissance démographique, seuls les scénarios avec progrès technique permettent de réduire le niveau total des émissions avec une baisse située entre - 35 et - 50 %, tandis qu'il augmente ou demeure stable dans les scénarios sans progrès technique.

On synthétise finalement les coûts et les avantages associés aux différents scénarios au regard des enjeux d'équité et de durabilité. Il ressort de l'analyse précédente que les scénarios dans lesquels le doublement du prix du carburant n'est pas compensé par le progrès technique sont susceptibles de générer des coûts sociaux potentiels - que ce soit à travers la baisse de la mobilité individuelle ou l'augmentation de l'effort budgétaire des ménages - tout en présentant des bénéfices limités au niveau des émissions individuelles. Ces coûts sociaux s'avèrent d'autant plus élevés si le doublement du prix du carburant est couplé avec une situation de récession prolongée. Le scénario de *statu quo* pour le prix du carburant et la consommation des véhicules présente certains avantages sociaux dans la mesure où il permet à la fois d'augmenter le potentiel de mobilité et de réduire le taux d'effort des ménages grâce à la progression des revenus, mais il entraîne néanmoins une forte augmentation du niveau des émissions totales, compte tenu de la croissance démographique et de l'absence de progrès des motorisations. Seuls les scénarios avec progrès technique répondent donc simultanément aux enjeux d'équité et de durabilité. Parmi ces trois scénarios, celui dans lequel le prix du carburant est maintenu à son niveau actuel présente les avantages sociaux les plus importants tout en permettant de réduire fortement le niveau des émissions.

Ces résultats s'expliquent par la faible élasticité de l'usage de la voiture par rapport au coût kilométrique, cohérente avec d'autres études récentes (Graham et Glaister, 2004 ; Kemel et al., 2011). En effet, en l'absence de progrès technique, l'évolution des émissions est indexée sur le trafic, de sorte qu'une augmentation du prix du carburant sans progrès technique n'entraîne qu'une baisse limitée des émissions individuelles, correspondant à la seule sensibilité de l'usage de la voiture par rapport au facteur de coût kilométrique. Mais par ailleurs, comme les individus ne peuvent réduire leurs déplacements de manière à compenser intégralement l'augmentation des prix, leur coefficient budgétaire augmente, en particulier dans les scénarios de récession où l'augmentation des revenus ne permet pas de compenser celle des dépenses. A l'inverse, le progrès des motorisations se répercute intégralement sur le niveau des émissions puisque celles-ci sont proportionnelles à la consommation de carburant²¹. Il présente également des répercussions bénéfiques sur le coefficient budgétaire des ménages, tout en permettant à ces derniers d'accroître leur mobilité.

7) Discussion et perspectives

Depuis les années 1990, les pouvoirs publics ont mis en œuvre diverses mesures destinées à réduire les émissions de polluants et de gaz à effet de serre du secteur des transports, notamment à travers la réduction de l'usage de la voiture et le développement de l'offre de transports en commun au niveau local. Ces politiques butent toutefois sur le problème structurel de la dépendance automobile, qui en réduit l'efficacité dans les zones peu denses. D'autres options doivent donc être envisagées, parmi lesquelles figurent le progrès de l'efficacité énergétique des véhicules et le recours à la fiscalité environnementale. Dans le domaine de la mobilité, l'augmentation du prix du carburant possède un

²¹ Certes, les bénéfices environnementaux du progrès technique sont en partie absorbés par l'effet de rebond (Greene et alii., 1999), à savoir que les ménages mettent à profit la baisse du coût d'usage des véhicules pour augmenter leur niveau de mobilité. Cependant, l'augmentation du trafic qui en résulte est nettement inférieure à la baisse des émissions unitaires, de sorte que l'impact du progrès technique sur le niveau des émissions individuelles demeure malgré tout largement bénéfique.

effet avéré sur l'usage de la voiture et contribue à orienter les ménages vers des motorisations plus efficaces de manière à maîtriser leur budget en matière de transport. Dans un contexte de renchérissement de l'énergie qui tend à fragiliser les ménages captifs, les enjeux d'équité demeurent toutefois insuffisamment pris en compte dans l'élaboration des politiques visant à réduire les émissions du secteur des transports. Cette étude contribue à pallier ce manque en examinant conjointement les répercussions sociales et environnementales de différents scénarios en matière d'évolution des revenus, de prix des carburants et de consommation des véhicules. Le progrès des motorisations apparaît comme le principal levier de gain au niveau des émissions, tandis que l'efficacité des mesures basées sur la fiscalité se trouve limitée par la faible élasticité de l'usage de la voiture au coût kilométrique, traduisant des rigidités liées à l'organisation des bassins de vie, à la structuration de l'offre de transport et aux programmes d'activité individuels. Par ailleurs, les hausses du prix des carburants se répercutent en partie sur l'effort budgétaire des ménages, au détriment d'autres postes de dépenses ou de leur capacité d'épargne. L'équité de la taxe carbone, de même que son acceptabilité sociale, dépendent donc de manière cruciale des dispositifs de compensation mis en place, de manière à prendre en compte la capacité d'adaptation limitée des acteurs et leur dépendance aux énergies fossiles²² (Baranzini, 1997 ; Combet, 2013).

Toujours en raison de la faible sensibilité des comportements au facteur de coût, l'effet de rebond induit par le progrès technique demeure limité, ce qui tend à en préserver les bénéfices environnementaux. Une stratégie s'appuyant sur le soutien à la recherche et un système d'aides financières à l'acquisition modulées en fonction de l'efficacité énergétique des véhicules permettrait donc en théorie d'atteindre les objectifs de réduction des émissions tout en préservant le pouvoir d'achat des ménages. Un résultat apparemment paradoxal de l'analyse est que les scénarios qui permettent de faire fortement baisser le niveau des émissions ne sont pas nécessairement ceux qui conduisent à réduire l'usage de la voiture. En effet, en raison du rôle prédominant joué par le facteur d'efficacité énergétique, ces deux sujets sont partiellement dé-corrélés. Dès lors, on peut s'interroger sur le sens de l'injonction répétée à « changer les comportements » en matière de mobilité, qui tend à faire abstraction du potentiel offert par le progrès technique en vue de parvenir à une réduction significative des impacts environnementaux de la voiture sans nécessairement exiger un bouleversement radical des modes de vie et pour un coût social acceptable.

Néanmoins, les résultats de cette analyse reposent sur certaines hypothèses qui mériteraient de faire l'objet d'investigations plus complètes. On présente ici quelques pistes d'approfondissement, sans prétendre à l'exhaustivité :

(a) L'analyse dépend de manière cruciale de la sensibilité des comportements au facteur de coût. Celle-ci est en général faible, mais elle est susceptible de varier d'une étude à l'autre en fonction du type de données utilisées, de la structure du modèle, ou encore de la période d'observation (Graham et Glaister, 2004). Il serait donc utile de tester la sensibilité des résultats obtenus pour différentes valeurs des élasticités-prix trouvées dans la littérature. De la même manière, on pourrait tester la sensibilité des projections à des hypothèses alternatives en matière de distribution spatiale de la croissance démographique (périurbanisation aggravée, densification plus ou moins volontariste...) ;

(b) Dans cette étude, on considère que l'impact des incitations financières sur le progrès technique est négligeable à long terme. Cette hypothèse s'appuie sur le constat que le progrès récent de l'efficacité énergétique des véhicules a surtout résulté de la diésélisation du parc, avec des effets limités en termes de progrès technologique induit. La question du caractère endogène ou exogène du progrès technique

²² En théorie, ces difficultés sont susceptibles d'être atténuées à travers un recyclage optimal des revenus de la taxe permettant d'en corriger les effets régressifs, que ce soit en reversant tout ou partie des revenus de la taxe aux ménages, ou en assurant une neutralité fiscale à travers la diminution d'autres impôts.

pourrait néanmoins donner lieu à une étude plus approfondie, nécessitant l'emploi d'un modèle dynamique afin de modéliser les effets de prix sur les décisions individuelles d'achats de véhicules ;

(c) On fait l'hypothèse de possibles effets paradoxaux, dont il serait intéressant de tester les répercussions environnementales selon différentes échelles de temps. Ainsi par exemple, chez les ménages qui disposent de ressources modestes, une hausse du prix des carburants est susceptible de retarder le renouvellement des véhicules en entraînant la réduction des niveaux d'usage, et donc paradoxalement les progrès en matière d'émissions à long terme. De même, en raison de l'effet de rebond, le progrès technique induit n'accroît l'efficacité environnementale des incitations financières que si la sensibilité des comportements au facteur de coût n'est pas trop forte ;

(d) Au-delà des coûts et des avantages associés aux différents scénarios, la question se pose de leur faisabilité. Par exemple, le progrès technique à long terme, tout comme l'évolution du mix énergétique, sont entourés de diverses incertitudes, comme nous l'avons indiqué précédemment. Un champ de recherche complémentaire pourrait donc consister dans l'estimation de probabilités attachées aux différents scénarios en vue de déterminer des stratégies d'allocation optimale des ressources.

Néanmoins, le progrès de l'efficacité énergétique ne peut suffire à lui seul à atteindre les objectifs de réduction des émissions. En particulier, un deuxième effet de rebond est constitué par l'alourdissement des véhicules qui annule en partie les gains d'efficacité énergétique. Selon une étude du Forum International des Transports, le poids moyen des véhicules individuels s'est accru de 40 % au cours des quarante dernières années. Un retour des véhicules à leur poids antérieur permettrait de multiplier par deux la réduction tendancielle des émissions de CO₂ résultant de l'application des politiques actuelles (FIT, 2017). D'autres pistes doivent également être envisagées, en particulier la modification des attitudes de conduite, le développement des solutions de mobilité virtuelle (télétravail, visioconférences, commerce électronique...), la planification en vue de mieux articuler l'urbanisme et les transports, ainsi qu'une meilleure organisation collective de la mobilité (taux de remplissage des véhicules, chaînage des déplacements, etc.).

Bibliographie

Agence De l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie. (2012) **Contribution de l'ADEME à l'élaboration de visions énergétiques 2030-2050**. Rapport. 48 p.

An, F., De Cicco, J., Ross, M. (2001) Assessing the fuel economy potential of light-duty vehicles. **SAE Technical Paper Series**, 1, 2482.

Avrillier, P., Hivert, L. et Kramarz, F. (2010) Driven Out of Employment ? The Impact of the Abolition of National Service on Driving Schools and Aspiring Drivers. *British Journal of Industrial Relations*, 48 (4), pp 784-807. Blackwell Publishing Ltd/London School of Economics.

Axsen, J., Kurani, K.S., Burke, A. (2010) Are batteries ready for plug-in hybrid buyers? **Transport Policy**, 17 (3), pp. 173-182.

Banque Mondiale. (2017) Croissance du PIB par habitant - Données des comptes nationaux de la Banque mondiale et fichiers de données des comptes nationaux de l'OCDE. <https://donnees.banquemondiale.org/indicateur/NY.GDP.PCAP.KD.ZG?locations=XC>

Baranzini, A. (1997) International economic instruments and global warming mitigation : an analysis of their acceptability. **Working Paper W54**. International Academy of the Environment, Geneva.

Bastian, A., Börjesson, M., et Eliasson, J. (2016) Explaining 'peak car' with economic variables. **Transportation Research Part A**, 88, pp. 236-250.

Billari, F. et Liefbroer, A.C. (2010). Towards a new pattern of transition to adulthood ? **Advances in Life Course Research**, 15 (2), 59-75.

Brownstone, D., Bunch, D.S., Train, K. (2000) Joint mixed logit models of stated and revealed preferences for alternative-fuel vehicles. **Transportation Research Part B**, 34, pp. 315-338.

Busse, M. R., Knittel, C. R. and Zettelmeyer, F. (2013) Are consumers myopic ? Evidence from new and used car purchases. **American Economic Review**, 103 (1), pp. 220-256.

Calvet, L. et Marical, F. (2011) Consommation de carburant : effet des prix à court et à long terme par type de population. **Economie et Statistiques**, 446, 25-44.

Citi Investment Research & Analysis. (2009) **All hail the electric car... but where will we plug them in?** Report.

Combet, E. (2013) **Fiscalité carbone et progrès social : application au cas français**. Thèse pour l'obtention du doctorat de sciences économiques, 413 p.

Commissariat Général au Développement Durable. (2012) La circulation routière augmente à un rythme ralenti depuis 2003. **Le Point Sur**, 118.

Cuenot, F. et Papon, F. (2007) Is the Automotive industry able to reach 120g CO₂/km on average on new cars sold by 2012, with no regulation from the EU ? Tank-to-wheel analysis of the West and East European production 1995-2005, and prospective to 2012. **Proceedings of the 2007 European Transport Conference**, Leeuwenhorst Conference Centre, Leeuwenhorst, Netherlands.

Dodson, J. et Sipe, N. (2007) Oil vulnerability in the Australian city : assessing socio-economic risks from higher urban fuel prices. **Urban Studies**, 44 (1), 37-62.

Eppstein, M., Grover, D., Marshall, J., Rizzo, D. (2011) An agent-based model to study market penetration of plug-in hybrid electric vehicles. **Energy Policy**, 39, pp. 3789-3802.

Floch, J-M. et Lévy, D. (2011) Le nouveau zonage en aires urbaines de 2010 - Poursuite de la périurbanisation et croissance des grandes aires urbaines. **INSEE Première**, 1375.

Forum International des Transports. (2017) Lightening up: how less heavy vehicles can help cut CO₂ emissions. **Case-specific policy analysis**.

Garikapati, V., Pendyala, R., Morris, E., Mokhtarian, P., McDonald, N. (2016) Activity patterns, time use, and travel of millennials : a generation in transition?. **Transport Reviews**, 36 (5), pp. 558-584.

Graham, D.J et Glaister, S. (2004) Road Traffic Demand Elasticity Estimates : a review. **Transport Reviews**, 24 (3), pp. 261-274.

Greene, D.L., Kahn, J.R. et Gibson, R.C. (1999) Fuel Economy Rebound Effect for US Households. **Energy Journal**, 20 (3), pp. 1-31.

Grimal, R., Collet, R. et Madre, J-L. (2013) Is the stagnation of individual car travel a general phenomenon in France ? An analysis by zone of residence and standard of living. **Transport Reviews**, 33 (3), pp. 291-309.

- Grimal, R. (2017) Modelling auto-mobility: combining cohort analysis with panel data econometrics. **Asian Transport Studies**, 4 (2016-2017), pp. 741-763.
- Hass-Klau, C. et Crampton, G. (2005) Economic impacts of light-rail investment : summary of the results for 15 urban areas in France, Germany, UK and North America. **Urban Transport Development**.
- Heckman, J.J. (1979) Sample selection bias as a specification error. **Econometrica**, 47, pp. 153-161.
- Hivert, L. (1996) Diésélisation et nouveaux diésélistes : les évolutions récentes. **Actes**, 59, Arcueil (Fr) : INRETS, pp. 83-95.
- Houriez, J.M. et Olier, L. (1997) Niveau de vie et taille du ménage : estimation d'une échelle d'équivalence. **Economie et Statistique**, 308-310, pp. 65-94.
- Hubert, J-P. (2009) Dans les grandes agglomérations, la mobilité quotidienne des habitants diminue, et elle augmente ailleurs. **INSEE Première**, 1252.
- Kemel, E., Collet, R. et Hivert, L. (2011). Evidence for an endogenous rebound effect impacting long-run car use elasticity to fuel price. **Economics Bulletin**, 31 (4), 2777-2786.
- Kuhnimof, T., Buehler, R., Witz, M. et Kalinowska, D. (2012) Travel trends among young adults in Germany : increasing multimodality and declining car use for men. **Journal of Transport Geography**, 24, pp. 443-450.
- Mathur, A. et Morris, A.C. (2014) Distributional effects of a carbon tax in broader US fiscal reform. **Energy Policy**, 66, pp. 326-334.
- Maurin, L. (2017), L'usage de la voiture de nouveau en progression. **Futuribles**, <https://www.futuribles.com/fr/article/lusage-de-la-voiture-de-nouveau-en-progression>.
- Metcalf, G.E. (2015) **A conceptual framework for measuring the effectiveness of green fiscal reforms**. Green growth knowledge platform third annual conference on fiscal policies and the green economy transition: generating knowledge – creating impact. Venice, Italy.
- Millard-Ball, A. et Schipper, L. (2010) Are we reaching peak travel ? Trends in Passenger Transport in Eight Industrialized Countries. **Transport Reviews**, 31, pp. 357-378.
- Ministère de l'Écologie, de l'Énergie et de la Mer. (2016) **Les comptes des transports en 2015 : 53ème rapport de la commission des comptes des transports de la nation**. Rapport DATALAB.
- Ministère de l'Écologie, de l'Énergie et de la Mer. (2016) Projections de la demande de transport sur le long terme. **Collection THEMA**.
- Murray, B. et Rivers, N. (2015) British Columbia's revenue-neutral carbon tax : a review of the latest "grand experiment" in environmental policy. **Energy Policy**, 86, pp. 674-683.
- Newman, P. et Kenworthy, J. (1999) **Sustainability and cities : overcoming automobile dependence**. Book, Island Press, Washington D.C.
- Newman, P. et Kenworthy, J. (2011) Peak car use : understanding the demise of automobile dependence. **World Transport Policy and Practice**, 17 (2).
- Pigou, A.C. (1920) **The economics of welfare**. Macmillan.

Puentes, R. et Tomer, A. (2009) The Road Less Travelled : An Analysis of Vehicle Miles Traveled Trends in the U.S. **Metropolitan Infrastructure Initiatives Series**, Brookings Institution, Washington DC.

Quinet Commission. (2009) **La valeur tutélaire du carbone**, Conseil d'Analyse Stratégique, La documentation française.

Roux, S. (2012) Transition de la motorisation en France au vingtième siècle. **Thèse de doctorat en géographie-démographie**, Université de Paris 1.

Saboori, B., Sapri, M. et Bin Baba, M. (2014) Economic growth, energy consumption and CO2 emissions in OECD's transport sector : a fully modified bi-directional relationship approach. **Energy**, 66, pp. 150-161.

Stanley, J.K, Hensher, D.A. et Loader, C. (2011) Road transport and climate change : stepping off the greenhouse gas. **Transportation Research Part A : Policy and practice**, 45 (10), pp. 1020-1030.

Summers L. (2014) Reflections on the New Secular Stagnation Hypothesis in Teulings, C. et Baldwin, R. (éd.), **Secular Stagnation : Facts, Causes and Cures**, VoxEU.org, e-Book, chap. 1.

Van den Brink, R.M.M. et Van Wee, B. (2001) Why has car-fleet specific fuel consumption not shown any decrease since 1990 ? Quantitative analysis of Dutch passenger car-fleet specific fuel consumption. **Transportation Research Part D**, 6 (2), pp. 75-93.

World Bank et Ecofys. (2014) **State and trends of carbon pricing 2014**. Report. Washington DC.