
MOTS CLES

•
Mobilité
décarbonée

•
Substitution
modale

•
Substitution
technologique

•
Voiture électrique

VERS UNE MOBILITE BAS-CARBONE :

Transfert modal ou transfert technologique ?

Lesly Cassin

.....

Le secteur des transports est responsable d'importantes émissions de gaz à effet de serre, notamment à cause de l'usage de la voiture particulière (VP) comme mode de transport principal. Dans le cadre des objectifs de réduction des émissions, les gouvernements ont mis en place des politiques visant à diminuer le bilan carbone de la mobilité. Cela s'appuie principalement sur deux solutions : le transfert modal et le transfert technologique. Dans cet article, ces deux formes de transfert sont étudiées sous l'angle de la compréhension de l'utilisation actuelle de la VP. L'originalité vient de la prise en compte d'un nouveau référentiel pour définir la mobilité des agents : la boucle de déplacement. Cette dernière permet d'introduire une compréhension plus fine des comportements des agents et par conséquent une meilleure évaluation des proportions de substitution possible. Selon ce traitement, il apparaît que la substitution modale ne permet qu'une réduction marginale des distances et donc des émissions de carbone. Tandis que la substitution technologique, en France, peut avoir des effets environnementaux très positifs. Pour la voiture électrique, il sera alors nécessaire de vérifier que son impact environnemental tout au long de son cycle de vie reste positif.

.....

Chaire Economie
du Climat

Palais Brongniart,
4ème étage

28 place de la
bourse

75002 PARIS

Lesly Cassin est doctorante à l'Université Paris Ouest Nanterre la Défense, et chargée de recherche dans l'initiative Mobilité dans une Société bas carbone de la Chaire Economie du Climat.

Introduction

L'utilisation intensive de voitures particulières dans le cadre de la mobilité est responsable d'émissions de gaz à effet de serre (GES) à un niveau substantiel, entraînant une dégradation du système de régulation du climat. Le Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat (GIEC) établit que le secteur des transports est responsable du quart des émissions mondiales (2014). Dans ce secteur, la croissance des émissions est plus rapide que dans l'ensemble des autres secteurs depuis les années 1990. Mais, dans le même temps, il est aussi possible de mettre en place des politiques à moindre coût pour réduire les émissions, à condition que des efforts ambitieux soient réalisés (GIEC, 2014). Des engagements de réduction des émissions de GES ont été pris il y a maintenant une vingtaine d'années en France, notamment avec le facteur 4¹ à l'horizon 2050. La transition vers une société décarbonée devra alors passer par une utilisation accrue des modes de transport bas-carbone existants ou une diminution de l'usage des carburants fossiles à des fins de mobilité, toute chose égale par ailleurs. L'objectif est alors de réduire le bilan carbone de la voiture particulière notamment, en diminuant l'usage ou le niveau d'émissions. Une autre solution, qui ne sera pas étudiée ici, serait d'abaisser le nombre de déplacements par agent, quel que soit le mode de transport, en améliorant l'organisation spatiale ou temporelle.

Comprendre comment optimiser l'usage de la voiture implique d'intégrer une interprétation fine de la mobilité des individus, mais aussi de leur perception des différents modes de transports. En effet, le poids de la voiture dans notre conception de la mobilité inclue aussi bien des aspects factoriels tels que la vitesse, la flexibilité ou les coûts, que des dimensions sociales liées au niveau de richesse, à notre conception de la liberté ou au statut social (Loubet, 2012). La mobilité est définie comme la capacité de se mouvoir d'un point à un autre (Prud'homme, rapport). Elle est liée à la situation géographique des différents points considérés, aux modes de transports accessibles aux agents, ainsi qu'aux contraintes qu'ils intègrent. C'est donc une potentialité dont la signification est souvent confondue avec celle du déplacement qui est un mouvement avéré (Kaufmann, 2008, de Dios Ortuzar, 2011, Géoconfluences). Pour réduire les émissions de GES tout en offrant le même niveau de mobilité par individu, plusieurs solutions peuvent être envisagées, dont les deux principales sont le transfert modal et l'intégration accrue de voitures peu émettrices dans le parc automobile français.

Dans ce travail qui porte principalement sur la mobilité des ménages, il s'agit de fournir une analyse de ces deux solutions en intégrant un nouveau référentiel d'analyse, soit la boucle de déplacement. En effet, dans la plupart des études sur la mobilité, les auteurs utilisent le déplacement pour déterminer les potentialités de mise en place

¹ Facteur 4 : Objectif de réduction des émissions de gaz à effet qui prévoit une division par 4 par rapport au niveau de 1990.

d'une mobilité bas carbone. Or, la demande de mobilité comporte des dimensions très complexes, car c'est une demande dérivée qui découle de l'activité qui lui est associée (Banister, 2008, de Dios Ortuzar, 2011). Les choix modaux et horaires dépendent donc d'arbitrages qui impliquent non seulement les paramètres du transport, mais aussi ceux des occupations des agents. Cet aspect est d'autant plus critique que la gestion du mode de transport et de l'activité s'inscrit dans un fonctionnement quotidien, hebdomadaire, mensuel ou autre, qui comporte un enchaînement de plusieurs unités déplacement-activité (Hammadou et al, 2003). Percevoir la mobilité comme la simple résultante d'une suite de déplacements indépendants les uns des autres est donc une approche très partielle. A l'inverse, considérer l'ensemble des déplacements effectués dans une journée comme une seule unité serait très réducteur pour ce qui est de la compréhension de la complexité de la chaîne. Ici, le référentiel sélectionné est la boucle de déplacement ce qui permet de pallier les difficultés de ces deux unités de mesure.

La question porte donc sur le niveau de mise en place des deux solutions que sont le transfert modal et le transfert technologique. Pour y répondre, d'une part il s'agit d'améliorer la caractérisation de la mobilité compte tenu des interactions entre les besoins de déplacement et d'autre part de fournir une meilleure compréhension des conséquences de la mise en place de l'une ou l'autre de ces solutions. Cet article sera donc composé de deux parties : la première portant sur la substitution modale et la deuxième sur la substitution technologique.

1 La substitution modale

1.1 Un nouveau cadre d'analyse : la boucle de déplacement

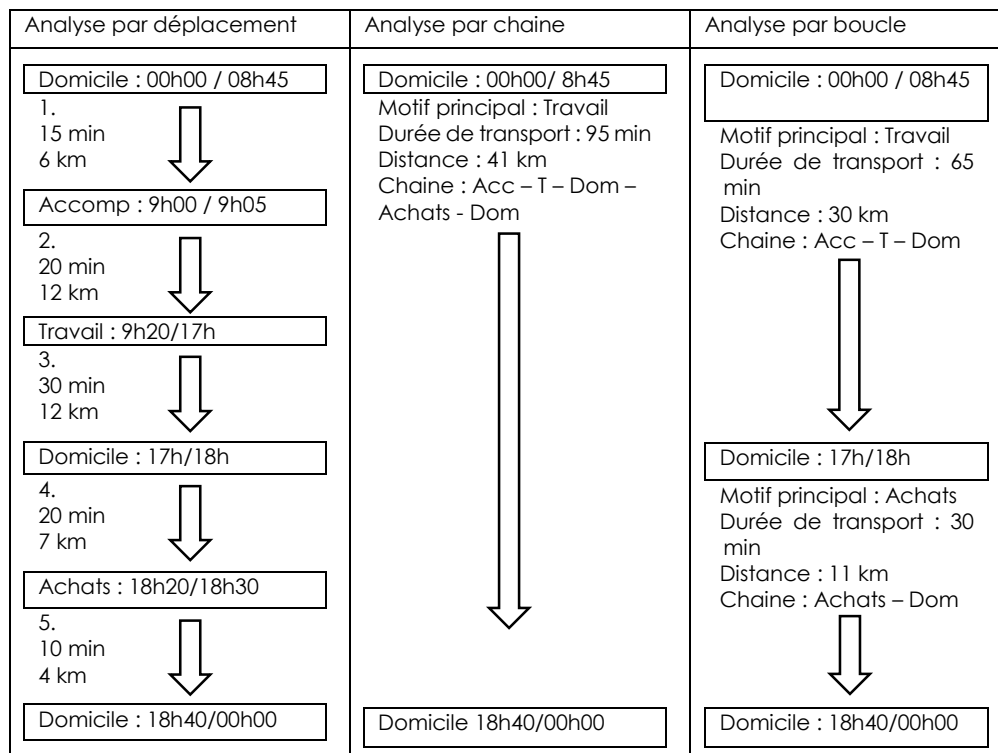
L'étude de la substitution modale passe par la compréhension de la mobilité des français quel que soit le mode de transport ; l'objectif étant de sélectionner des critères de choix modaux des individus. Il est alors possible de définir les substitutions entre les modes qui peuvent être envisagées selon le critère retenu et selon l'usage spécifique de la voiture qui a pu être mis en évidence.

La présente analyse s'appuie sur l'Enquête Nationale Transports et Déplacements (ENTD) réalisée en 2007 et 2008, qui décrit l'ensemble des déplacements d'un échantillon représentatif français pendant un jour ouvré et un jour du week-end. Ces données sont notamment traitées par l'Institut français des sciences et technologies des transports, de l'aménagement et des réseaux (IFSTTAR) (CGDD, 2010) en utilisant comme référentiel le *déplacement* qui est « le mouvement d'une personne entre un lieu de départ et un lieu d'arrivée pour un motif déterminé ». Dans l'étude réalisée ici en revanche, le référentiel est *la boucle de déplacement*, soit la suite de déplacements débutant au domicile et se finissant en ce même point. Elle diffère de la *chaîne de déplacements* qui est l'ensemble des déplacements effectués dans la journée par un individu. La difficulté de l'analyse par déplacement réside dans la prise en compte de l'ensemble des contraintes qui ont poussé l'agent à opter pour un mode particulier, à une heure de départ précise. Un déplacement analysé isolément des déplacements qui l'entourent peut être interprété de manière incomplète, car les distance, durée et motif sont fragmentés. Traiter la mobilité en étudiant les boucles de

déplacement permet de définir le besoin modal de l'ensemble des déplacements jusqu'au retour au domicile. Ce dernier est ainsi considéré comme une remise à zéro des contraintes, qu'elles soient d'accompagnement ou de charge.

Dans la figure A ci-dessous, les conséquences du choix de référentiel lors de l'analyse des déplacements d'un individu sont explicitées. La première colonne illustre l'analyse par déplacement, celle par chaîne de déplacement est décrite dans la deuxième colonne et dans la troisième, c'est la boucle de déplacement. Dans une analyse par *déplacement*, la mobilité de cet individu serait classée comme étant liée au motif d'accompagnement, car c'est le premier déplacement à partir du domicile et les autres éléments de la chaîne seraient jugés comme secondaires. En revanche, en utilisant les autres référentiels, c'est le motif principal qui permet de classer la mobilité. Ce dernier est défini en utilisant la durée des activités lors de la création de la boucle de déplacements ou de la chaîne de déplacements. La plus longue activité devient le moteur de mobilité le plus important de la boucle. Dans une analyse en *chaîne de déplacements*, tous les motifs autres que le travail seraient gommés et la nécessité de ressortir du domicile pour une raison non-professionnelle n'apparaîtrait pas. En raisonnant par *boucle*, la mobilité liée au travail qui comporte un motif d'accompagnement, et celle liée aux courses sont dissociées. Cela permet de tenir compte d'une plus grande quantité d'informations pour intégrer les déterminants des choix modaux.

Figure A : Chaîne de déplacements effectués en voiture par un individu



Encadré 1 : Analyse de la base de données de l'ENTD

Les données de l'ENTD exploitées pour ce travail incluent des informations relatives à l'ensemble des déplacements effectués par une personne pendant un jour ouvré et un jour du week-end. Les informations comprennent l'heure de départ et d'arrivée, le motif de chaque déplacement, le mode de transport utilisé, etc. Dans notre traitement, il s'agit d'interpréter la boucle de déplacements. Pour cela il a fallu redéfinir la base de données, non pas comme une description de l'ensemble des déplacements indépendants des individus, mais plutôt comme une description de la mobilité d'un individu au cours d'une boucle. Par la suite, les informations nécessaires à la bonne interprétation de la mobilité ont été associées à la boucle de déplacement ainsi créée, que ce soit les caractéristiques sociodémographiques de l'individu, son lieu de résidence ou son lieu de travail.

Quelques définitions :

- *Mobilité locale* : Mobilité des individus vers des activités se situant dans un rayon de 80 km autour du domicile.
- *Motif principal (chaîne ou boucle)* : Motif qui conduit à l'activité la plus longue.
- *Mode principal du déplacement* : Mode de transport le plus lourd du déplacement.
- *Mode principal (chaîne ou boucle)* : Mode de transport le plus lourd du déplacement le plus long.

Le mode le plus lourd est défini grâce à la hiérarchie des modes dans le cadre de la mobilité locale : train – bus – voiture – vélo – marche, etc.

Dans cette analyse il s'agit plus particulièrement de décrypter la mobilité en voiture. Pour cela, six ensembles de mode de transport sont distingués : la marche, le vélo, le deux-roues motorisé, la voiture, les transports collectifs et les autres modes. La répartition des déplacements et des boucles entre les modes est donnée dans le tableau A.

Les répartitions en fonction du référentiel sont assez proches. En effet, que ce soit dans l'analyse par boucle ou par déplacement, il y a environ 67% de déplacements dont le mode principal est la voiture. Par ailleurs, en étudiant l'intermodalité, il semble que 95% des boucles dont le mode principal était la voiture soient faites uniquement en voiture, ce qui montre que seuls 5% des boucles font l'objet d'intermodalité au sein de la boucle. Ce point n'est pas spécifique à la voiture, mais est observé pour tous les modes de transport. Aussi, les personnes semblent fidèles à leur mode de transport et peu enclines à user d'intermodalité à l'intérieur d'une même boucle. Cependant, cela ne signifie pas que pour l'ensemble des boucles d'une journée les individus ne changent pas de mode de transport. Par exemple, sur les 69% de chaînes ayant pour mode principal la voiture, 85% d'entre elles ne sont effectuées qu'en voiture, ce qui signifie que 15% des individus changent de modes entre deux boucles. Ainsi, les agents semblent rarement opter pour l'intermodalité. Autrement dit, si un mode se révèle nécessaire sur une portion de la boucle, il sera utilisé sur l'ensemble de cette dernière.

Tableau A : Répartition modale de l'échantillon en fonction du référentiel d'analyse

Mode	Déplacement		Chaîne de déplacements		Boucle de déplacements	
	Effectif	Pcentage	Effectif	Pcentage	Effectif	Pcentage
Vélo	1388	2,38	358	2,18	629	2,57
2 roues motorisées	746	1,28	219	1,33	314	1,28
Autres	133	0,23	46	0,48	68	0,28
Marche	11564	19,84	2310	14,05	4681	19,16
Transports collectifs	5230	8,97	2211	13,45	2499	10,23
Voiture	39231	67,30	11298	68,71	16245	66,48
Total	58292		16442		24436	

En analysant les motifs principaux de déplacement, il semble que les modes ne répondent pas aux mêmes besoins. Ainsi, les motifs diffèrent de manière importante pour les boucles. De manière générale, la voiture est mieux répartie sur les différents motifs, notamment pour le travail (31,8), les achats (21,9%), le loisir (13%) et l'accompagnement (8,9%). Tandis que les transports collectifs sont utilisés dans 39,5% des cas pour le travail et seulement dans 1% des boucles pour l'accompagnement. La voiture est donc plus présente que les autres modes sur l'accompagnement et le loisir car elle permet de faire face aux contraintes de charges et de transport groupé. De plus, la voiture n'a pas la même importance selon le lieu de vie. Ainsi, elle est moins présente dans les centres urbains, et dans la banlieue parisienne, tandis que dans tous les autres espaces elle est souvent le seul mode utilisé. Pour illustration, dans les communes polarisées des villes moyennes, elle est utilisée dans 83% des boucles.

Les distances parcourues dans une boucle réalisée en voiture sont plus grandes que celles réalisées dans d'autres modes, excepté dans le cas des transports en communs qui permettent de couvrir des distances similaires, voire supérieures. Cependant les temps de parcours sont moins longs en voiture car les vitesses sont plus grandes, ce qui constitue un des avantages principaux de cette dernière² (Didier, 2007). L'autre avantage est la qualité de ce temps de parcours : la voiture permet d'introduire de la flexibilité dans l'organisation du transport car c'est un mode individuel. L'appropriation de ce mode par les individus le rend alors très compétitif par rapport aux transports en communs, qui présentent un double désavantage en termes de vitesse et de confort (Kaufmann, 2002). Malgré cela, la substitution de la voiture par le mode des transports collectifs n'est pas impossible, et dans une démarche écologique elle doit être étudiée intensivement, compte tenu de la compatibilité entre

² Ceci est vrai dans le cadre de la mobilité du travail.

les distances qui peuvent être parcourues dans l'un ou l'autre de ces modes. L'expérience dans les grands centres urbains montre d'ailleurs qu'en réintroduisant de la flexibilité dans les transports collectifs – par une augmentation de leur nombre – et en diminuant la demande de distance des agents, la voiture a été rendue moins compétitive que les transports en communs.

Mais ces éléments ne sont pas les seuls à prendre en compte pour définir l'usage de la voiture. En effet, la voiture comporte un poids social non négligeable. Elle est perçue comme un espace de convivialité selon Kaufmann, et remplit ainsi une fonction sociale pour le groupe concerné (Kaufmann, 2000). De plus, elle correspond à un certain attendu social, car en offrant de la mobilité elle permet d'accéder à l'autonomie. Obtenir une voiture correspond alors à un rite de passage. Le multiéquipement des ménages en est le signe : il y a de plus en plus autant de voitures que de personnes actives dans les ménages. Par ailleurs, la dépendance à la voiture est dans une certaine mesure orchestrée. En effet, bien que les zones d'emplois ne soient déplacées qu'avec un certain laps de temps, les zones de services, quant à elles, bénéficient d'une mobilité bien plus dynamique. Or, il a été observé que ces dernières se développaient dans les espaces qui facilitent la mobilité en voiture, notamment dans les zones périurbaines ou rurales (Motte-Baumvol, 2007).

1.2 Les niveaux de substitution modale

Dans cet article, l'objectif est de traiter la substitution modale selon les données disponibles dans l'ENTD de 2008. La multitude de nouveaux usages incluant l'autopartage, la multimodalité et le développement de l'économie de la fonctionnalité au détriment de l'économie de la possession, ne seront pas pris en compte.

Pour définir les potentialités de transferts modaux ou technologiques, il convient dans un premier temps d'utiliser les distances pour définir quelles boucles seraient réalisables dans des modes actifs (vélo et marche). Dans un deuxième temps, il faut définir quelle proportion de déplacements aurait pu être réalisée en transport collectif. Ce dernier point est difficile à évaluer et a déjà fait l'objet d'une analyse très poussée avec des données fournies par Moviken³. Cela a permis de quantifier le nombre de déplacements réalisables en transports collectifs. Ici, cette étape sera éludée et seul l'impact de l'offre de transports collectifs sur les choix modaux est étudié, pour avoir une image – très partielle cependant – de la relation entre offre de transports collectifs et utilisation de ce mode.

L'analyse est maintenant centrée sur les boucles réalisées en voiture uniquement, soit sur 97% des boucles dont le mode principal est la voiture. Les seuils de substitution modale pour les modes actifs ont été définis en fonction des données de l'ENTD. Plus

³ Enrichissement des données de l'ENTD.

précisément, c'est la valeur correspondant au neuvième décile des distances parcourues habituellement dans chaque mode qui servent à définir la valeur maximale des distances qui peuvent être faites dans une boucle de déplacement (voir Encadré 2).

Encadré 2 : Le transfert modal

Il existe principalement trois types de transferts modaux, à savoir : voiture/marche et voiture/vélo pour les modes actifs, et voiture/transports collectifs pour les modes motorisés. Ici l'analyse est centrée sur les transferts vers les modes actifs.

	Marche	Vélo
Déplacement	2 km	7 km
Boucle	3,8 km	13,1 km

Dans l'analyse, la valeur du seuil de distance pouvant être parcourue dans un mode actif est le neuvième décile des distances observées pour les individus qui n'utilisent que l'un ou l'autre de ces modes dans la base de données

de l'ENTD (reportées dans le tableau ci-joint). L'objectif est, in fine, de définir parmi les conducteurs lesquels auraient pu adopter un autre mode, au regard de ce qui est observé pour les déplacements effectués en vélo ou à pied.

1.2.1 Evaluation du niveau de substitution modale

Les agents tendent à utiliser bien plus les transports collectifs lorsque le nombre d'arrêts pour ces derniers à proximité du domicile augmente. Ainsi, parmi les 50% de boucles qui sont réalisées par des agents qui ne disposent d'aucun arrêt de transport collectif à moins de dix minutes de marche, seules 5% d'entre elles sont réalisées au moins en partie en transports collectifs, tandis que ce chiffre atteint 30% pour les boucles des agents disposant de plus de 15 arrêts de transports collectifs à proximité du domicile. L'offre de transports collectifs a donc un impact important sur l'usage effectif de ces derniers. Et, sans pouvoir le quantifier, il apparaît que là où l'offre de transport est grande, le nombre d'utilisateurs de ces derniers peut dépasser le nombre d'utilisateurs de la voiture comme c'est le cas à Paris par exemple.

Pour le transfert modal vers la marche, la valeur seuil régulièrement retenue pour un déplacement est de 3 km. Dans l'analyse de l'ENTD, les valeurs correspondant au neuvième décile sont toutefois plus proches de 2 km. La différence entre ces deux valeurs a un impact assez important sur l'évaluation des substitutions voiture/marche possibles. En effet, si presque 47% des déplacements effectués en voiture sont inférieurs à 3 km, avec une valeur de 2km cette proportion diminue à 26% (voir Figure B). Dans une analyse par boucle, en retenant 3,8 km comme seuil pour la distance maximale parcourue sur toute la boucle, seulement 10% des boucles réalisées auraient pu être effectuées en marchant. Une limite de 3,8 km peut paraître très faible, cependant elle correspond à un temps de marche variant de 40 minutes à 1 heure selon la vitesse de marche retenue. Compte-tenu de la pénibilité de ce mode, cette estimation semble cohérente avec la réalité. De plus ici, ne sont prises en compte ni les contraintes de charges, ni les contraintes d'accompagnement, ni les contraintes horaires qui peuvent réduire la quantité de substitutions possibles. C'est donc une estimation très optimiste des possibilités de substitution.

Pour le transfert modal vers le vélo, la valeur seuil généralement retenue dans nombre d'études est de 5 km dans le cadre d'un déplacement. D'ailleurs, selon l'Ademe en zone urbaine sur cette distance, le vélo serait même plus rapide que la voiture. Selon la méthode décrite précédemment, la valeur seuil dans la présente analyse est de 7 km pour le déplacement et de 13,1 km pour la boucle. Ici, la proportion de déplacements pouvant être réalisés en vélo atteint 63% et plus de 42% des boucles en voiture pourraient être réalisées en vélo (voir Figure B).

Quoi qu'il en soit, la substitution d'une boucle ne dit rien de la distance en voiture effectivement substituée. Par conséquent, même si le nombre de boucles est grand, il est possible que le nombre de kilomètres concernés soit très faible puisque ce sont les boucles les plus courtes qui sont concernées.

1.2.2 Les Limites de la substitution modale et de réduction des émissions de CO₂

Premièrement, dans le cas des transports collectifs, un transfert modal aurait pu être envisagé, puisque les distances pouvant être parcourues sont les mêmes qu'en voiture et que l'impact de l'offre de transport est assez grand. Cependant, il n'est pas aisé de développer un système de TC efficace – en termes de coûts, de flexibilité et de disponibilité – qui puisse remplacer la voiture de manière adéquate du point de vue de l'utilisateur et de l'organisateur des TC simultanément.

De la perspective du gestionnaire, la performance est liée à la rentabilité et à l'efficacité en termes de voyageur par kilomètre. La mise en place de TC nécessite le développement d'infrastructures qui peuvent générer des frais d'installation et d'entretien importants mais qui seront compensés en totalité ou en partie par le tarif payé par les usagers qui l'emprunteront. Une exploitation efficace maximise donc le nombre de voyageurs qui peuvent bénéficier de ce service. Or, actuellement l'évolution des zones urbaines est marquée par la périurbanisation qui conduit à l'étalement urbain et à une diminution de la densité de population. Le public atteint par une ligne de TC est donc plus faible, ce qui diminue les revenus potentiels liés à l'exploitation de la ligne ; alors même que les coûts de fonctionnement et d'entretien des TC augmentent du fait de l'expansion du réseau nécessaire. Parallèlement, du point de vue environnemental, une diminution de la fréquentation d'un TC conduit à l'augmentation des émissions de polluants par passager.

De la perspective de l'utilisateur, c'est la qualité du service qui compte, notamment en fonction de critères tels que la flexibilité, la rapidité de déplacement, la fiabilité et la sécurité (Motte-Baumvol, 2007). Plus la distance est longue et plus le différentiel de vitesse entre les TC et la voiture rend cette dernière plus compétitive dans le cadre de la mobilité quotidienne. Ainsi, pour ce type de mobilité sur les plus longues distances, les TC sont régulièrement remplacés par la voiture, car cette dernière est plus compétitive sur l'ensemble de ces critères. Elle permet en effet de réduire les temps de parcours de moitié, voire de 80% dans les cas les plus extrêmes. Même dans une agglomération telle que celle de Paris, où le réseau de TC est très dense, les vitesses restent inférieures de 50% à celles des voitures sur les mêmes distances. Dans les autres régions françaises – toujours dans la mobilité locale – ce différentiel de vitesse est encore plus marqué et désavantage grandement l'utilisation des TC (CGDD, 2010). La périurbanisation est donc responsable d'une augmentation des émissions de GES via deux effets : d'une part l'allongement des distances et donc des déplacements, et

d'autre part une incitation à utiliser de manière intensive la voiture, un des modes les plus émetteurs (Bart, 2010, Traversi, 2010). Le bon développement des TC est donc fortement dépendant de l'évolution de nos villes, et de la densification des zones urbaines.

Deuxièmement, dans le cas des modes actifs, la mise en place des transferts modaux peut sembler porteuse dans le cas du raisonnement par déplacement. Cependant, de tels transferts *intra-boucle* obligeraient à mixer les modes de transports entre deux passages au domicile, ce qui ne correspond pas aux usages observés dans l'enquête, avec des agents qui utilisent peu l'intermodalité. Dès que la boucle de déplacement est utilisée comme référentiel, le nombre de boucles concernées par les substitutions devient assez faible, notamment dans le cas de la marche. Ainsi la réduction des émissions qui pourrait être obtenue est bien plus faible qu'il n'y paraît, particulièrement lorsque sont considérées les distances parcourues. En effet, si dans le cas du vélo, il apparaît qu'un nombre important de boucles puissent être réalisées dans ce mode, ce sont nécessairement les boucles les plus courtes qui sont concernées. Le potentiel de réduction des émissions sera donc réduit. Le calcul des émissions évitées est fait en supposant que les modes actifs, ne conduisent à aucune émission tandis que la voiture thermique émet 176 gCO₂/ km.

Si l'ensemble des boucles qui pourraient être substituées le sont, il apparaît que seul 1,1% des distances parcourues par l'échantillon d'utilisateurs de la voiture pourraient être substitué par de la marche, ce qui occasionne une réduction des émissions du même niveau. En se situant dans un cas très optimiste, la réduction des émissions reste donc très marginale. Ceci est observé y compris dans le cas d'un raisonnement par déplacement, où seulement 14,3% des distances et donc des émissions sont concernées (voir Figure C).

Dans le cas du vélo, avec un raisonnement par déplacement, les réductions des distances peuvent monter jusqu'à 40% par rapport au niveau normal. Mais ce chiffre dans le cas du raisonnement par boucle n'est que de 11% (voir Figure C). Or la réflexion est menée dans un cas déjà très optimiste avec une substitution de l'ensemble des boucles qui étaient concernées, sans tenir compte des freins à l'utilisation des modes actifs. Pour atteindre un niveau substantiel de réduction des émissions avec le vélo, il faudrait en plus supposer que les agents changent leur fonctionnement pour utiliser plusieurs modes.

Figure B : Part de substitution modale possible en fonction du référentiel d'analyse (marche et vélo)

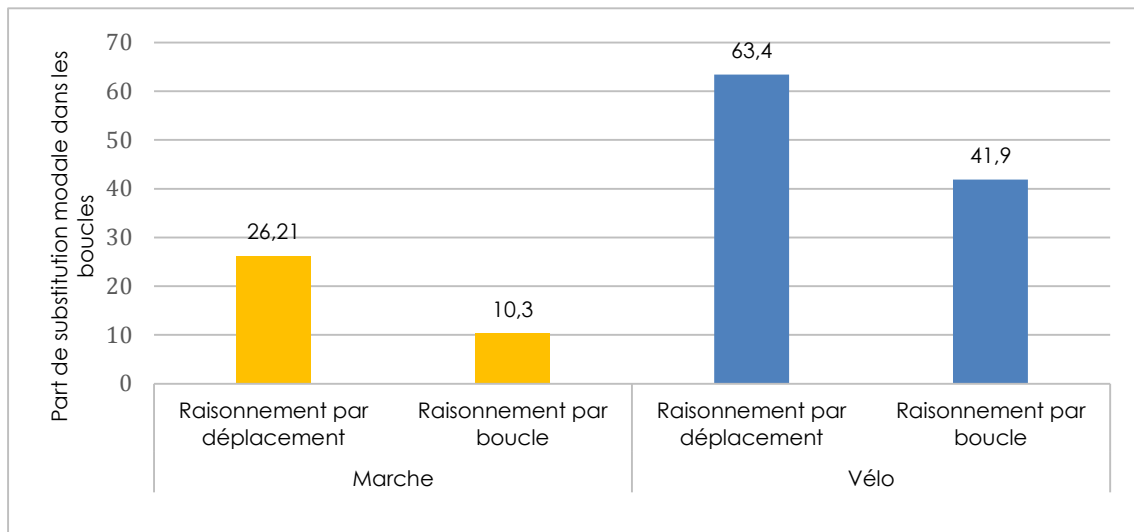
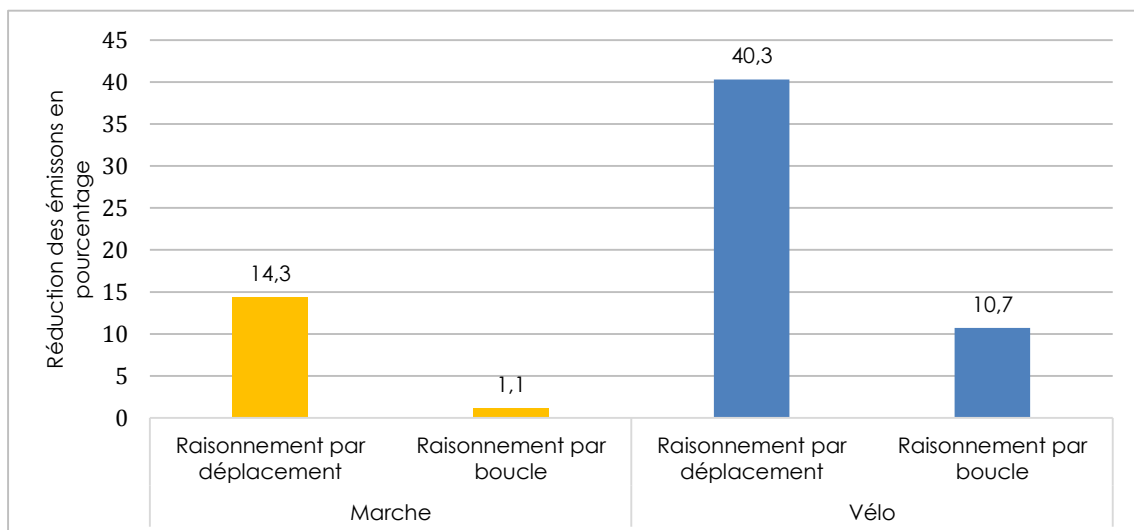


Figure C : Réduction des distances parcourues en voiture suite à la substitution modale en fonction du référentiel d'analyse (marche et vélo)



La substitution modale semble limitée d'une part compte tenu du nombre d'utilisateurs qui pourraient être concernés et d'autre part du fait de l'importance des mutations dans notre mobilité qui devraient être faites. En effet, la mise en place des infrastructures correspondantes, que ce soit avec les réseaux de transports collectifs, les pistes cyclables, ou une nouvelle conception de l'espace partagé, nécessite du temps et des moyens. La solution de la substitution modale n'a pas vocation à être complètement abandonnée mais il est nécessaire de la compléter par une autre forme de substitution qui permettrait d'atteindre de plus fortes baisses des émissions de GES et plus rapidement.

2 La substitution technologique

2.1 Le potentiel de pénétration de la voiture électrique

Encadré 3 : Le transfert technologique

1. Le transfert technologique

Le transfert technologique permet d'introduire dans le parc roulant différents types de véhicules moins émetteurs que la voiture à combustion interne essence ou diesel. Dans ce travail, n'est traité que le cas des voitures électriques qui oblige à intégrer une limite d'autonomie du véhicule. La limite d'autonomie des VE sera fonction de la saison et de la prise en compte ou non d'une marge de sécurité (la « range anxiety » en anglais).

Saison	Été	Hiver
Autonomie observée	100 km	80 km
Autonomie réduite (range anxiety)	90 km	70 km

2. Calcul des émissions

La consommation d'une voiture électrique au kilomètre dépend de la température. Dans cette étude, la consommation d'électricité en hiver est fixée à 189 Wh/km tandis qu'en été elle est de 124 wh/km. Il est possible de calculer le niveau d'émission des voitures électriques rechargées en France en utilisant la valeur des émissions par kilowattheure qui est de 85 gCO₂/kWh en moyenne. Une comparaison sera alors faite avec les choix énergétiques allemands qui conduisent à un niveau d'émissions moyen de l'ordre de 510 gCO₂/kWh.

Comme cela a été dit plus tôt, la présente étude porte principalement sur l'intégration de la voiture électrique (VE). La VE est supposée atteindre une autonomie au minimum de 100 km avec une batterie rechargée complètement. Cette valeur diminue de 20% en hiver où la baisse de la température réduit l'efficacité de la batterie, ce qui est accentué du fait de l'utilisation de fonctions tel que le chauffage. Pour définir les seuils d'utilisation possible de la VE, les valeurs ont été fixées à 100 km en été et 80 km en hiver, en supposant que certains agents peuvent inclure une marge de sécurité de 10 km à cause de la peur de la panne (Ademe, Avem (a)).

L'analyse ici ne porte que sur les conducteurs, afin de tenir compte de l'ensemble des déplacements qui sont réalisés dans une voiture dans la journée. En effet, en étudiant les personnes qui utilisent la voiture en tant que passager, il est possible de ne pas tenir compte des déplacements qui ont précédé ou suivi celui qui a pu être observé. Compte tenu des valeurs retenues en termes d'autonomie, il semble que presque 97% des boucles réalisées dans une voiture en tant que conducteur pourraient l'être en VE, et ce, même en tenant compte de la range anxiety (voir Tableau B). Cependant, il faut admettre que l'opposition majeure de la VE ne découle pas de son utilisation dans la mobilité régulière, mais dans celle du week-end et de la mobilité longue distance. Pour la mobilité supérieure à 100 km, il est clair que cette technologie

ne pourra pas remplacer complètement la voiture thermique. En effet, dans ces cas il est nécessaire de faire un rechargement intermédiaire qui dure 20 minutes au minimum. Cela conduit donc à un allongement des durées de trajet pouvant aller jusqu'à 50% de la durée en véhicule thermique.

Tableau B : Part potentielle de substitution technologique dans les boucles de déplacement effectuées par des conducteur

Seuil (km)		Jour ouvré	Samedi	Dimanche
Été	100	96,6%	95,8%	91,2%
	90	95,8%	94,7%	90,5%
Hiver	80	97,0%	96,6%	93,9%
	70	96,2%	95,1%	92,7%

Pour la mobilité du week-end par contre, qui sans être régulière ne rentre pas systématiquement dans la mobilité à longue distance, il est nécessaire de vérifier quel pourrait être le rôle de la VE en se basant sur les distances parcourues. Ainsi en analysant les déplacements du week-end, les distances moyennes parcourues dans chaque boucle sont supérieures à celles des jours ouvrés, mais très en deçà de la limite d'autonomie des VE. La valeur moyenne le samedi est de 27,3km, celle du dimanche est de 34,0km, tandis que celle des jours ouvrés est de 26,7. Ainsi que ce soit le dimanche ou le samedi, 90% des déplacements pourraient être réalisés en VE (cf. Tableau B). Avec de tel niveau de substitutions technologiques, 83% des distances peuvent être effectuées en VE.

La substitution technologique apparait donc comme la solution la plus indolore pour l'intégration d'une mobilité bas-carbone. C'est celle qui est la plus proche des comportements de déplacements en voiture actuellement observés. Pour autant, la réflexion autour de l'intégration de la VE ne peut se faire sans comprendre quelles peuvent en être les implications. En effet, bien que particulièrement compatible avec les utilisations de voitures thermiques, l'introduction de la VE n'est pas sans limites. Pour étudier ces dernières, il convient d'affiner la compréhension de la technologie du VE, avant de déterminer à quelles conditions la transition visée sera positive d'un point de vue environnemental. Enfin, il s'agira de définir comment ce vecteur de mobilité peut s'intégrer dans le parc automobile français, en se focalisant notamment sur les moteurs et les freins de ce phénomène.

2.2 Les limites de l'intégration de la voiture électrique

2.2.1 Une technologie différente

La technologie de la VE a fait son apparition dès le 19e siècle. Durant cette même période, la voiture à moteur à combustion interne ou voiture thermique (V-ICE) sera aussi développée. Ces deux technologies ainsi que le moteur à vapeur constituent à la fin du 19e siècle les trois modes de propulsion connus. Bien que le moteur à vapeur reste la technologie la plus utilisée de cette période, la VE et la V-ICE promettaient des développements intéressants. La VE faisait donc l'objet de recherches et d'innovations

régulières. "La jamais contente", une VE développée par le Belge Camille Jenatzy, est d'ailleurs le premier véhicule à avoir dépassé la barre des 100 km/h en 1899. Durant les vingt années suivantes, la place de la VE restera grande : en 1915 plus de 30% des véhicules en circulation aux Etats-Unis étaient électriques. Cependant, cette technologie présentait déjà de nombreuses inefficacités qui la rendaient peu compétitive par rapport à la V-ICE. Elle était trop lourde du fait de ses batteries et présentait une autonomie trop faible. Ce handicap a par ailleurs été amplifié en raison de l'importance du coût de cette technologie en comparaison de la voiture thermique. Par ailleurs, la présence de pétrole permettait d'accéder à une énergie abondante et donc peu coûteuse qui a largement accéléré le développement de la V-ICE (Guignard 2010).

Cet article a été écrit en fonction des technologies existantes pour les VE. Les technologies des VE et des V-ICE sont fondamentalement différentes, ce qui oblige à repenser la mobilité automobile. Cette question est bien souvent sous-estimée dans la compréhension du développement de la VE. Les comportements de gestion de l'énergie, de rechargement, de conduite de la voiture thermique ne peuvent pas simplement être appliqués à la VE. La première étape est donc d'interpréter les spécificités de la VE en termes d'usage.

L'énergie d'une VE provient exclusivement d'une batterie qui doit être chargée avant l'usage grâce à du courant alternatif capté sur le réseau. Deux étapes de transformations apparaissent alors, puisque le courant est délivré par la batterie sous forme de courant continu, tandis que le moteur utilise du courant alternatif. Les composants de la VE sont liés à ces transformations, néanmoins la mécanique mise en place est beaucoup plus simple que dans une V-ICE. Cet aspect permet de réduire les coûts d'entretien des voitures, ce qui est accentué du fait de l'absence d'huile dans les VE. L'élément clé de la technologie des VE est la batterie. En effet, c'est l'amélioration de ce composant qui permet aujourd'hui d'envisager un large déploiement de la VE au sein du parc automobile mondial. Pour développer une batterie performante, les constructeurs ont cherché à augmenter l'autonomie des véhicules, mais aussi à diminuer le temps de charge, augmenter leur durée de vie, diminuer leur coût de production, limiter l'effet mémoire⁴ et enfin renforcer l'approvisionnement et le recyclage des métaux utilisés. Ceci a conduit à développer plusieurs types de batteries qui sont plus ou moins performantes sur chacun de ces critères. Les deux matériaux actuellement le plus souvent utilisés pour construire les batteries sont le Lithium-Métal-Polymère et le Lithium-ion. Ces deux technologies permettent d'obtenir le matériau le plus énergétique par unité de masse en comparaison des batteries au plomb ou au nickel avec une capacité de l'ordre de 100 à 265 Wh/kg. Elles présentent aussi une durée de vie proche de la moyenne haute autour de 2000 cycles de charge/recharge, ce qui équivaut à une durée de vie de 3

⁴ L'effet mémoire est la diminution de l'autonomie résultant de la décharge incomplète de batterie avant le commencement d'un nouveau cycle de charge.

à 10 ans, selon l'usage qui en est fait. En effet, la dégradation de la batterie découlant des trajets est inévitable, entraînant ainsi une perte de 10 à 20% d'autonomie au bout d'un usage de trois ans (Bainée, 2013 ; Electric Road 2014 ; Avem (b)).

L'autonomie des différents modèles proposés varie de 100 km à 250 km selon les constructeurs. L'autonomie de la Renault Zoé, le modèle actuellement le plus vendu en France parmi les voitures particulières, est de 210 km, selon le constructeur. Cependant, ces valeurs sont rarement atteintes compte tenu de l'effet de plusieurs éléments dont les trois majeurs sont le climat, le style de conduite et l'usure de la batterie. L'impact du climat comporte deux effets : une perte d'autonomie de 5% en moyenne en cas de froid, et un accroissement de la consommation en cas d'utilisation de fonctions tels que le chauffage ou la climatisation. La perte d'autonomie dans ce cas peut s'élever jusqu'à 30%. Le style de conduite ainsi que la vitesse influencent directement le niveau de consommation d'énergie, qui est accru par des conduites sportives ou le maintien de vitesse élevée. Ainsi, l'usage d'une VE incite souvent à adopter une conduite plus douce qui permet d'économiser la charge de la batterie. Ce changement de conduite avec une VE s'effectue plus fréquemment que dans le cas des voitures thermiques, bien qu'elles soient aussi plus énergivores avec des conduites sportives. Cette situation s'explique par la difficulté relative de recharger une VE en milieu de parcours, ce qui induit chez les utilisateurs une plus grande sensibilité à l'impact de leur conduite sur l'efficacité énergétique de leur voiture. Ce type de conduite peut présenter d'autres avantages relatifs à la sécurité, ou au confort des usagers. Selon l'utilisateur, ce changement de conduite peut être perçu positivement ou non (Rezvani, 2015). Enfin, l'usure de la batterie est aussi responsable d'une perte d'autonomie pouvant atteindre 10% au bout de 5 ans avec en moyenne 15 000 km par an. C'est une des limites majeures de la VE qui a incité les constructeurs à proposer des locations de batterie plutôt que des ventes. L'utilisateur est ainsi rassuré d'une part, parce qu'en cas de perte d'autonomie en dessous d'un certain seuil, il peut faire remplacer sa batterie et d'autre part parce que la majeure part de la valeur de la VE provient de la batterie. En louant la batterie, l'utilisateur n'assume pas entièrement la perte de valeur associée à cette dégradation de la batterie et le constructeur conserve la possession de l'élément le plus onéreux de la VE.

Ainsi, il apparaît que la VE, bien que compatible avec les utilisations de la voiture thermique pour la majorité des déplacements, ne soit pas exempte de questionnements quant à la facilité de sa prise en main. En effet, l'utilisation de cette technologie particulière implique un autre apprentissage de la conduite, de la maintenance, soit de l'utilisation d'une voiture. La proximité de ce bien avec la voiture thermique peut donc être trompeuse sur son caractère d'innovation radicale dont le fonctionnement est totalement différent de celui des autres technologies.

2.2.2 Les freins à l'intégration de la voiture électrique

La technologie de la VE, au-delà des difficultés techniques dont elle pourrait faire l'objet, souffre aussi d'une organisation du marché qui la défavorise. En effet, que ce soit du côté de l'offre ou de la demande, il existe des freins au développement de la VE. Ainsi, les VE n'ont représenté qu'environ 1% des immatriculations de véhicules neufs en France contre 10 à 12% en Norvège, pays le plus dynamique en Europe dans l'adoption des VE. L'objectif révisé à la baisse par le gouvernement français est d'avoir

500 000 véhicules rechargeables sur les routes d'ici 2020 contre à peu près 50 000 à l'heure actuelle.

Du côté de l'offre, le marché des véhicules électriques est actuellement très faible que ce soit en termes d'unités vendues ou en termes de modèles disponibles. Ainsi, plus de 80% du marché des VE est occupé par trois modèles seulement, dont deux sont produits par le groupe Renault-Nissan. Pour la majorité des firmes, la VE constitue une innovation radicale puisqu'elle provoque l'émergence de nouvelles industries et une rupture dans l'organisation de l'entreprise pour pouvoir être développée. De plus, c'est un bien qui comporte de nombreuses incertitudes d'un point de vue technique et dans l'organisation des ventes, que ce soit pour la demande à laquelle elle sera confrontée ou pour les infrastructures dont elle pourra bénéficier. C'est en effet un bien-système, en ce sens qu'il oblige à repenser l'ensemble des éléments qui interviennent dans sa production, son utilisation, sa réglementation et sa fin de vie. Les constructeurs automobiles ne sont donc plus les seuls responsables de la bonne réussite du lancement de leurs véhicules.

Premièrement, les innovations radicales ne sont pas toujours rentables pour les entreprises et plus particulièrement pour les grandes firmes. En effet, il est crucial pour ces dernières de penser aussi bien la recherche autour de la nouvelle technologie que son intégration sur le marché (Aarikka-Stenroos, 2014). Cependant, ces deux réflexions sont souvent séparées, ce qui conduit au développement d'un bien qui ne répond pas parfaitement aux attentes des agents. C'est ainsi que les VE ont majoritairement été conçues comme des voitures citadines par excellence alors même qu'elle répondait aussi à un besoin dans les zones rurales du fait de l'acquisition d'un point de recharge au domicile. Compte tenu du faible nombre de stations-services dans les zones les plus isolées, c'est un avantage qui a été apprécié des agents qui y résident. D'autre part, les constructeurs automobiles effectuent une partie de leur chiffre d'affaire sur les étapes aval de maintenance et de fourniture des pièces détachées. Il est difficile pour eux de prévoir l'impact de la VE sur leur gain, car non seulement 80% de la valeur de cette dernière provient des étapes faites par les équipementiers – notamment sur la batterie – mais la technologie en jeu est plus fiable, plus simple, et peut facilement être acquise par d'autres agents. L'offre de VE reste donc émergente et insuffisante.

En ce qui concerne la demande, des réticences aussi peuvent être observées. Les analystes s'accordent pour identifier les quatre raisons principales qui expliquent cette relative faiblesse de la diffusion des VE : (a) leur autonomie limitée ; (b) le manque d'infrastructures de recharge ; (c) le coût toujours élevé de ces véhicules et (d) la crise plus générale du marché automobile (Grahame-Rowe et al., 2012). Les deux premiers freins se rejoignent, dans la mesure où ils tendent à limiter l'utilisation de la VE. Ainsi, tandis que les qualités majeures reconnues à la voiture sont la flexibilité et l'autonomie, la VE pêche sur ces deux éléments. Elle oblige à organiser la course pour prévoir l'approvisionnement durant la course ou à limiter les distances parcourues. Par conséquent, bien que la VE corresponde à la majorité des usages de la mobilité quotidienne, elle ne convient pas à la mobilité exceptionnelle dont la voiture était un des modes phares.

Deuxièmement, les VE ont un coût plus élevé que les voitures thermique et ne sont pas compétitives à l'heure actuelle sans aides de l'état. Pour définir le surcoût lié aux

VE, il est nécessaire de tenir compte aussi bien du coût d'usage, que du coût d'entretien ou que de la mise en place de l'infrastructure. Le calcul du coût total de possession (Total Cost of Ownership ou TCO en anglais) est tout indiqué pour obtenir une valeur la plus proche possible du coût d'une voiture de l'achat à la mise en casse ou à la revente du véhicule. Cependant, il faut souligner que les ménages utilisent rarement cet outil pour comparer les coûts d'une voiture, ils prennent en compte le plus souvent le coût d'achat du véhicule, sans intégrer correctement le coût futur du carburant ou l'évolution de la valeur de leur voiture. Dans un rapport de l'Organisation de Coopération de Développement Economique (OCDE), Greene (2010) cible les incertitudes liées à la durée d'utilisation du véhicule, aux distances parcourues chaque année comme les causes principales de ce fait. Peu d'auteurs ont effectués des calculs de TCO, avec des résultats ambigus, dépendant largement des hypothèses qui ont été réalisées (Wu et al., 2015,). Le véhicule électrique a un coût d'achat plus élevé, mais un coût d'utilisation qui est moindre. Ceci étant, elle est plus rentable quand les distances et la durée de vie du véhicule augmentent. Selon certains auteurs, elle peut donc être plus efficace en termes de coût que le véhicule thermique. Tandis que pour d'autres auteurs, elle n'est jamais plus efficace que le véhicule conventionnel en termes de coût si on n'intègre pas les externalités environnementales (CGDD, 2011). Enfin, le taux de renouvellement du parc des ménages est lent, plus que dans les autres pays. Cela diminue les possibilités d'intégration de nouvelles technologies quand bien même les problèmes vus plus hauts seraient réglés.

Ces éléments font appel à des critères rationnels d'utilisation de la voiture, alors que la décision d'achat d'un véhicule n'est pas uniquement liée au besoin de transport. En effet, la voiture répond en grande partie à un attendu social, qui est à l'origine de l'intégration de divers facteurs. Par exemple, Demoli définit la décision d'achat comme le résultat de dynamiques pouvant être de trois sortes : l'ascétisme, l'ostentation ou la nécessité. Ces éléments sont souvent détachés de l'impact environnemental de la voiture, notamment dans le cas des deux dernières. La voiture est alors un modèle économique, aux performances assez réduites, voire un véhicule ancien ou un véhicule performant dans le cadre de critères régulièrement adoptés tels que la puissance, le luxe, le design, etc. (Demoli, 2012). Dans le même travail, Demoli établit que la différence entre les véhicules est principalement liée à l'âge de ces derniers. Ainsi, les véhicules les plus vétustes sont généralement détenus par les catégories socio-professionnelles les moins aisées, a contrario les classes les plus élevées auront des véhicules récents, mais correspondants à des critères d'ostentation qui présentent souvent une consommation plus élevée. Les résultats quant à la répartition des véhicules en fonction de la consommation de ces derniers au sein des CSP est donc ambiguë. Cependant, l'auteur montre que la décision d'achat ne peut être considérée uniquement par rapport aux critères de prix et de compatibilité des déplacements.

2.3 Les impacts écologiques de l'introduction de la voiture électrique dans le parc automobile français

Par la suite, il est nécessaire de définir les bienfaits environnementaux que ce soit en termes de potentiel de réduction des émissions ou d'impacts environnementaux

plus larges. Ceci étant dit, il convient maintenant d'étudier les impacts environnementaux de la VE, en supposant que le déploiement de la voiture peut être aussi large que la compatibilité avec les déplacements en voiture thermique le permet. Cela suppose que les freins mentionnés plus haut ne sont pas pris en compte.

Dans cette situation optimiste d'intégration de la VE, il est attendu que les gains soient grands, puisque la VE est réputée être une voiture à zéro émission. Cependant, le gain environnemental ne peut pas être calculé directement à partir de cette seule information. En effet, il est nécessaire d'analyser la chaîne de production du véhicule, la source de l'énergie utilisée, l'impact environnemental de la mise en place des réseaux et la fin de vie du véhicule. Par ailleurs, la réflexion ne peut être menée d'un point de vue statique, car des innovations sont attendues pour la voiture thermique et la VE. Il faut donc anticiper l'évolution de l'impact environnemental des deux technologies et des énergies qui sont utilisées pour comparer les deux technologies. En tenant compte de ces différents aspects, plusieurs auteurs ont tenté d'une part de déterminer le bilan carbone réel de la VE sous différentes conditions de production d'énergie et d'autre part d'intégrer l'ensemble des impacts environnementaux de la VE de sa production à son recyclage grâce à des Analyses Cycle de Vie (ACV).

2.3.1 L'impact CO₂ de l'usage de la voiture électrique

Dans cette étude, une simulation du niveau de réduction des émissions dans le cas français et dans une situation hypothétique où le mode de production de l'énergie en France serait similaire à celui de l'Allemagne, est faite. L'Ademe a défini les émissions de CO₂ du puit à la roue, des VE et des V-ICE dans un document de 2009 en intégrant deux possibilités de période de charge en France, soient la nuit avec une électricité en base et à une heure aléatoire en utilisant la moyenne d'émissions de la production. Il est alors possible de calculer le niveau de réduction des émissions obtenu grâce à l'utilisation de la VE. Pour rappel, la VE pourrait être utilisée pour effectuer 83% des distances qui ont été faites par l'échantillon de conducteurs de l'ENTD (cf. sous-section 2.1.) Avec un tel niveau de substitution, les émissions pourraient être réduites de 80% compte-tenu du niveau d'émission moyen de la production du wattheure en France⁵ (Ademe, 2009).

Les conclusions sont cependant très différentes lorsque le niveau de réduction est calculé pour des VE rechargées à partir d'une énergie plus carbonée qu'en France. L'Ademe a calculé les émissions pour différentes sources d'électricité. La première source émet du carbone au niveau moyen européen pour un kilowattheure, la deuxième est une électricité au gaz tandis que la troisième est faite à partir de charbon. Dans la figure D, le contenu carbone de l'électricité des différentes sources est donné en abscisse, tandis qu'en ordonnée est reportée l'intensité en carbone d'une VE rechargée grâce à cette énergie.

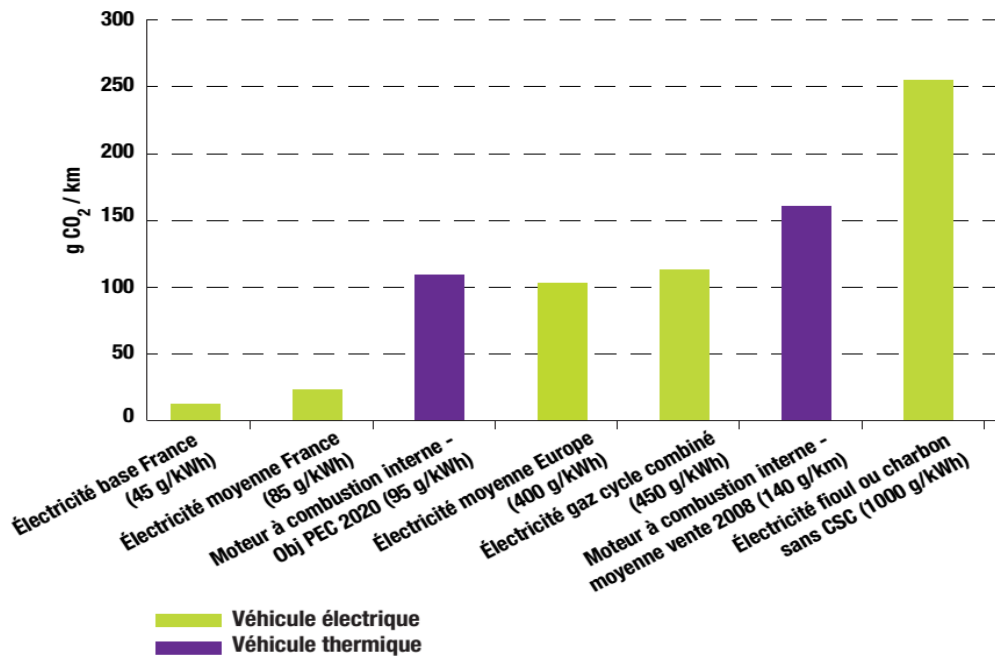
⁵ Le détail de calcul est fourni dans l'encadré

Il apparaît donc que quand l'électricité est produite avec du charbon, les émissions de GES occasionnées par un kilomètre sont de l'ordre de 250 gCO₂/km, contre 150 gCO₂/km pour une V-ICE, ce qui représente un surplus de plus de 50%. Par ailleurs, en comparant l'intensité carbone d'une voiture rechargée avec une électricité à 85g/kWh avec celle d'une voiture rechargée à partir de centrales au fioul ou au charbon (1000 g/kWh), la valeur pour une même voiture a été multipliée par 10. Il apparaît alors que dans le cas du mix énergétique moyen en Europe, l'avantage environnemental à l'utilisation du VE est compensé par les émissions de carbone dues à la production d'électricité. Les kilomètres effectués en VE ou V-ICE auraient donc la même empreinte carbone selon ce calcul. Un calcul plus précis est effectué à partir du niveau d'émission allemand lié à la production d'énergie. Dans ce pays, une politique favorisant l'intégration des énergies renouvelables, soutenues par des énergies carbonées, a été appliquée. Ainsi, le niveau d'émission par kilowattheure en Allemagne est de 510 gCO₂. Dans la figure E sont reprises les réductions d'émissions qui peuvent être obtenues dans les cas français, allemand et plus largement européen. Il apparaît donc que l'intensité carbone du mix énergétique a un réel impact sur les réductions d'émissions qui peuvent être envisagées grâce à la VE. Ceci souligne l'importance de la cohérence de la politique de promotion de la VE avec les choix énergétiques qui sont faits.

Notons cependant que même dans un cas de réduction des émissions GES assez faible, les situations ne sont pas équivalentes puisque dans un cas les pollutions sont centralisées au sein des unités de production d'électricité, tandis que dans l'autre cas elles sont diffuses avec l'ensemble des usagers de la voiture. D'autres mécanismes de contrôle des émissions de GES peuvent être envisagés dans le cas de la VE comme la capture et le stockage du carbone (CSC) pour les centrales à charbon, ou au gaz. L'effet sur le réchauffement climatique ne serait pas le même. De plus, la VE présente d'autres avantages notamment en termes d'émissions de polluants locaux tels que les hydrocarbures ou les particules fines qui sont responsables de répercussions sur la santé (Guignard, 2010).

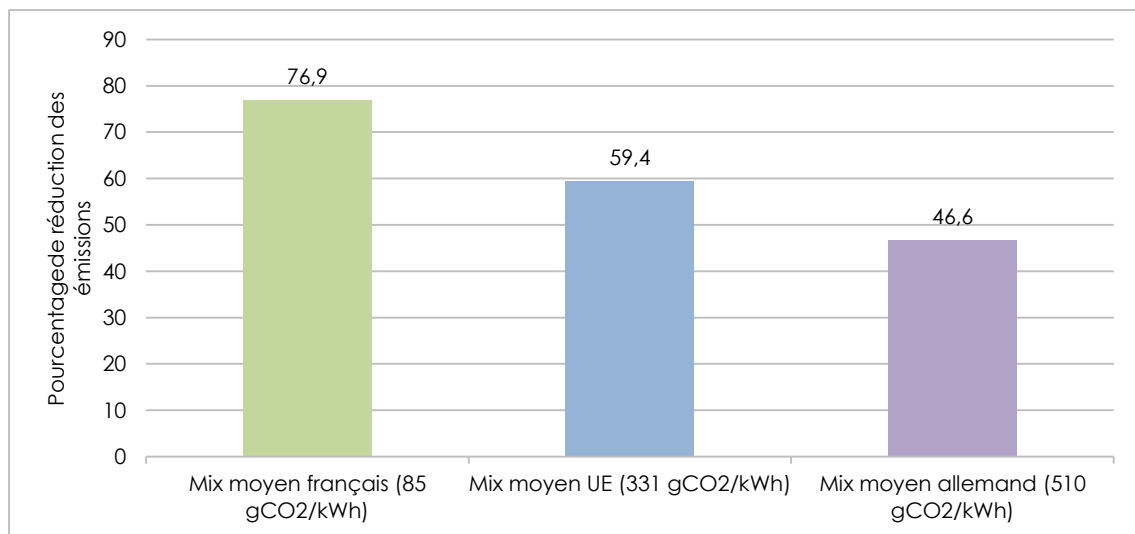
Finalement en termes de réchauffement climatique, pour que les bienfaits de la VE soient réels, il est nécessaire de mesurer les émissions découlant de la production d'énergie et d'en limiter la quantité. Sans cela, un développement potentiel des véhicules électriques pourrait se solder par une augmentation des émissions de GES. Ce constat implique donc la refonte de tout le système de production d'électricité pour qu'une réduction des émissions de GES soit possible.

Figure D : Emissions de CO₂ du puits à la roue pour les moteurs thermique et électrique



Source : Ademe, 2009

Figure E : Réduction des émissions de CO₂ obtenues par la substitution technologique en fonction du mix énergétique



2.3.2 Une vision écologique plus élargie de la voiture électrique

L'intérêt de l'ACV, pour comprendre le VE, a été mis en évidence notamment par Daimler qui s'appuie par exemple sur la variété des matériaux nécessaires à la production des composants électroniques des VE. Ces derniers soulèvent des difficultés pour le recyclage et la toxicité des déchets ultimes. Dans le cas du potentiel de réchauffement climatique, c'est la phase d'usage qui est la plus impactante et ce pour tous les véhicules considérés quelle que soit l'énergie utilisée pour recharger la VE.

Cependant, les émissions liées à la production sont bien plus élevées pour les véhicules électriques que pour les V-ICE, avec environ 40% des émissions globales des VE. Pour ce qui est des autres pollutions, la VE apparaît toujours comme étant la plus nocive surtout si l'électricité utilisée provient de l'exploitation de charbon, sauf pour la toxicité des sols. Dans les autres cas d'étude de la VE, elle est plus polluante que la V-ICE pour les paramètres de toxicité et de pression sur les ressources minérales notamment. Enfin, le potentiel de pénurie lié aux V-ICE et aux VE alimentées par des électricités produites à base d'énergie fossiles est quasiment similaire (Hawkins, 2013, Ademe, 2013).

Les résultats exposés ci-dessus paraissent intuitifs, mais une des données intéressantes de cet article réside dans l'évaluation de l'impact environnemental de la phase de production de la voiture et de la batterie en particulier. Il apparaît alors que la VE ne puisse être véritablement écologique sans qu'une réflexion exhaustive ait été faite sur la production de la batterie, son recyclage et la gestion des déchets ultimes. Le développement de la VE, sans cela, ne s'apparenterait qu'à un simple déplacement des pollutions dans l'espace et le temps. Le VE offrirait un avantage certain pour la gestion du réchauffement climatique, tandis qu'il est un accélérateur potentiel de la dégradation des stocks de ressources et des milieux à long terme. Ainsi, la VE doit être intégrée dans une organisation la plus efficiente possible de l'utilisation des ressources et de recyclage des déchets afin d'avoir un gain environnemental avéré. Il est nécessaire de faire des contrôles fréquents et d'avoir des normes strictes sur les modes de production de la VE. Enfin, étant donné que la majorité des pollutions sont dues à la production et non à l'usage, si la durée de vie de la VE augmente, alors l'avantage écologique de ce produit croit grandement par rapport à la V-ICE, qui quant à elle devient de plus en plus polluante.

Dans les deux tableaux ci-dessous sont résumés respectivement les travaux de Hawkins et le rapport de l'Ademe. Dans le premier tableau figure l'impact de la phase du cycle de vie pour définir la toxicité des technologies électrique et hybride pour une voiture rechargée en France et une voiture thermique. Dans le tableau D, un classement de la voiture thermique et de la voiture électrique en fonction du lieu de rechargement est donné. Selon l'étude de l'Ademe, le mix énergétique a donc un impact très important sur le niveau de réchauffement climatique, mais aussi sur la toxicité, ou le potentiel de pénurie des ressources minérales. Dans ce rapport, il apparaît clairement que le poids des phases de production de la voiture et de la batterie est plus grand dans le cas de la VE.

Tableau C : Niveaux de pollution du puits à la roue pour les moteurs thermique et électrique

	V. électrique	V. thermique
Phase de production	(- -)	(-)
Phase de production de la batterie	(- - -)	(-)
Phase d'usage	(-)*	(- - -)
Phase de recyclage	(- -)	(- -)

*en énergie de base en France

Source : auteur à partir de Hawkins,2013

Tableau D : Classement des véhicules électriques en fonction de la source d'électricité et des véhicules thermiques pour différents impacts environnementaux

	Potentiel de changement climatique	Potentiel d'acidification	Potentiel d'épuisement des ressources minérales
VE, France 2012	1	3	3
VE, UE27 2012	2	5	3
VE, Allemagne 2012	3	4	3
V-ICE, diesel 2012	4	2	1
V-ICE, essence 2012	5	1	2

**en énergie de base en France*

Source : auteur à partir de Hawkins, 2013

Conclusion

En conclusion, la réduction des émissions de GES permise par la substitution modale reste marginale ; les chiffres selon le référentiel d'analyse choisi ici (soit la boucle de déplacement et non pas le déplacement comme dans beaucoup de travaux) étant de 1% dans le cas de la marche et de 11% dans le cas du vélo. A l'inverse, un large déploiement de la VE permettrait de réduire les émissions de plus 80% avec le mix énergétique français. Actuellement il n'est toutefois pas aisé d'envisager une telle intégration de la VE, mais un transfert technologique concernant 2% du parc automobile français d'ici 2020 permettrait déjà de diminuer le niveau d'émissions liées au transport et de créer un effet d'entraînement pour dynamiser le marché. La réflexion menée dans cette analyse s'appuie sur des cadres très optimistes que ce soit pour les niveaux de substitutions dans chacune des solutions, ou pour les calculs d'émissions qui se sont limités aux émissions de carbone. Pour autant, les raisonnements qui ont été tenus permettent de donner un ordre d'idée de l'efficacité de chacune des solutions pour effectivement réduire les émissions de GES dans le secteur du transport et semblent favoriser largement l'intégration de la VE.

Références

- Aarikka-Stenroos, L., & Lehtimäki, T. (2014). Commercializing a radical innovation: Probing the way to the market. *Industrial Marketing Management*, 43(8), 1372-1384.
- ADEME (2013). Analyse du cycle de vie comparative véhicule électrique - véhicule thermique. Élaboration selon les principes des ACV des bilans énergétiques, des émissions de gaz à effet de serre et des autres impacts environnementaux induits par l'ensemble des filières de véhicules électriques et de véhicules thermiques, VP de segment B (citadine polyvalente) et VUL à l'horizon 2012 et 2020.
- ADEME. (2009). Les transports électriques en France: un développement nécessaire sous contraintes. *ADEME & vous*, (21), 8.

- Bainée, J. (2013). Conditions d'émergence et de diffusion de l'automobile électrique: une analyse en termes de "bien-système territorialisé" (Doctoral dissertation, Université Panthéon-Sorbonne-Paris I).
- Banister, D. (2008). The sustainable mobility paradigm. *Transport policy*, 15(2), 73-80.
- Bart, I. L. (2010). Urban sprawl and climate change: A statistical exploration of cause and effect, with policy options for the EU. *Land use policy*, 27(2), 283-292.
- CGDD (2011). Les véhicules électriques en perspective: Analyse coûts-avantages et demande potentielle. Etudes et Document, mai 2011. Commissariat Général au Développement Durable.
- CGDD, (2010). La mobilité des Français, panorama issu de l'enquête nationale transports et déplacements 2008. La revue du CGDD, décembre 2010. Commissariat Général au Développement Durable
- de Dios Ortuzar, J., & Willumsen, L. G. (2011). *Modelling transport*. John Wiley & Sons.
- Demoli, Y. (2012). Carbone et tôle froissée. L'espace social des modèles automobiles: concurrence pour la sécurité et la pollution. Document de travail produit dans le cadre du projet ANR «Les ressorts sociaux de la conversion écologique» coordonné par Philippe Coulangeon ainsi que pour une thèse menée à l'OSC (Sciences Po—CNRS) également sous la direction de Philippe Coulangeon.
- Didier, M., Prud'homme, R., Guesnerie, R., & Bied-Charreton, H. (2007). Infrastructures de transport, mobilité et croissance. la Documentation française.
- GIEC. (2014). *Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Edenhofer, O., R. Pichs-Madruga, Y. Sokona, E. Farahani, S. Kadner, K. Seyboth, A. Adler, I. Baum, S. Brunner, P. Eickemeier, B. Kriemann, J. Savolainen, S. Schlömer, C. von Stechow, T. Zwickel and J.C. Minx (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA
- Thomas, I., Verhetsel, A., Hammadou, H., & Vanhofstraeten, D. (2003, August). Distance decay in activity chains analysis. A Belgian case study. In *ERSA conference papers* (No. ersa03p119). European Regional Science Association.
- Graham-Rowe, E., Gardner, B., Abraham, C., Skippon, S., Dittmar, H., Hutchins, R., Stannard, J. (2012), *Mainstream Consumers Driving Plug-In Battery-Electric and Plug-In Hybrid Electric Cars: A Qualitative Analysis of Responses and Evaluation*, *Transport Research Part A*, 46, 140-153.
- Greene, D. (2010). Why the market for new passenger cars generally undervalues fuel economy (No. 2010-6). OECD/ITF Joint Transport Research Centre Discussion Paper.
- Guignard, S. (2010), *Histoire du développement en France du véhicule électrique, rôle de l'ADEME, Agence de l'Environnement et de la Maitrise de l'Energie (ADEME), Rapport*.
- Hammadou, H., Thomas, I., Van Hofstraeten, D., & Verhetsel, A. (2003). Distance Decay in activity chains analysis. A Belgian case study. *Across the border. Building*

- upon a quarter century of transport research in the Benelux, Antwerpen, De Boeck, 1-26.
- Hawkins, T. R., Singh, B., Majeau-Bettez, G., & Strømman, A. H. (2013). Comparative environmental life cycle assessment of conventional and electric vehicles. *Journal of Industrial Ecology*, 17(1), 53-64.
- Kaufmann, V. (2000). Mobilité quotidienne et dynamiques urbaines: la question du report modal. *Recherche-Transports-Sécurité*, 68, 88.
- Kaufmann, V. (2002). Temps et pratiques modales. Le plus court est-il le mieux?. *Recherche-Transports-Sécurité*, 75, 131-143.
- Kaufmann, V. (2008). Les paradoxes de la mobilité: bouger, s'enraciner (Vol. 46). Collection le savoir suisse.
- Loubet J-L.(2011). « De l'automobile des champs à la voiture des banlieues ou de la voiture pour tous à l'automobile pour chacun (1935-1975) », *Transports, territoires et société*, Editions Picard, «Histoire industrielle et société», 276p.
- Motte-Baumvol, B. (2007). La dépendance automobile pour l'accès des ménages aux services: le cas de la grande couronne francilienne (No. 5, pp. 897-919). Armand Colin/Dunod.
- Rezvani, Z., Jansson, J., & Bodin, J. (2015). Advances in consumer electric vehicle adoption research: A review and research agenda. *Transportation research part D: transport and environment*, 34, 122-136.
- Travisi, C. M., Camagni, R., & Nijkamp, P. (2010). Impacts of urban sprawl and commuting: a modelling study for Italy. *Journal of Transport Geography*, 18(3), 382-392.
- Wu, G., Inderbitzin, A., & Bening, C. (2015). Total cost of ownership of electric vehicles compared to conventional vehicles: A probabilistic analysis and projection across market segments. *Energy Policy*, 80, 196-214.

Ademe, consulté le 01/09/2015 :

<http://www.ademe.fr/expertises/mobilite-transport/passera-laction/report-modal>

Avem, consulté le 01/09/2015:

(a) <http://www.avem.fr/voiture-electrique.html>

(b) <http://www.avem.fr/index.php?page=batterie&cat=technos>

Electric Road 2014, consulté le 15/09/2015 :

<http://www.electric-road.com/energie-embarquees/batteries>

Géoconfluences, consulté le 01/09/2015 :

<http://geoconfluences.ens-lyon.fr/doc/transv/Mobil/MobilScient.htm>

INFORMATION ET DEBATS

n° 41 • Novembre 2015



DERNIERES PARUTIONS

Energie nette et EROI (Energy-Return-On-Investment) : une autre approche de la transition énergétique n°40

Victor COURT

Les risques de contre-productivité à l'usage des innovations vertes dans le bâtiment n°39

Vincent RENAUD-GIARD

Taxer l'achat et/ou l'usage du véhicule : Quelle incidence de l'effet rebond ? n°38

Bénédicte MEURISSE

Une Analyse Contrefactuelle du développement des énergies Renouvelables n°37

Marc BAUDRY et Clément BONNET

Les flottes de véhicules : Quelles stratégies privées et publiques pour quels enjeux économiques et environnementaux ? n°36

Bénédicte MEURISSE avec Hugo BOIS

Climate Change Mitigation in Temperate Forests : n°35

The Case of The French Forest Sector

Sylvain CAURLA et Philippe DELACOTE

Nos publications sont disponibles sur le site chaireeconomieduclimat.org

Directeur des publications Information et Débats : Marc BAUDRY

Les opinions exposées ici n'engagent que les auteurs. Ceux-ci assument la responsabilité de toute erreur ou omission

La Chaire Economie du Climat est une initiative de CDC Climat et de l'Université Paris-Dauphine sous l'égide de la Fondation Institut Europlace de Finance

contact@chaireeconomieduclimat.org