

Université Libre de Bruxelles
Institut de Gestion de l'Environnement et d'Aménagement du Territoire
Faculté des Sciences
Master en Sciences et Gestion de l'Environnement

La voiture électrique : révolution ou fausse bonne idée ?

Mémoire de fin d'études présenté par
SURY Damien
En vue de l'obtention du grade académique de
Master en Sciences et Gestion de l'Environnement

Année académique 2010-2011

Directeur : Frédéric DOBRUSZKES
Co-directeur : Michel HUART

Résumé

La voiture qui est au cœur du mode de vie des sociétés occidentales et qui a longtemps été synonyme de progrès, commence à voir son image ternie par la somme de ses incidences négatives, principalement dans le domaine environnemental. Pollution, participation au réchauffement climatique, bruit, congestion urbaine, scarification des paysages, dépendance face aux pays exportateurs de pétrole, exclusion économique et sociale des non-motorisés, mortalité routière, voici quelques-unes des nouvelles images qui lui sont aujourd'hui associées. Pourtant, ce mode de déplacement continue à être perçu comme indispensable à notre mode de vie et entretient avec lui une relation de dépendance. C'est dans ce contexte que la voiture électrique est présentée comme la réponse à la plupart de ces nuisances et comme l'avenir de l'automobile voire comme le symbole d'une nouvelle mobilité.

Pourtant ces promesses ne résistent pas à l'analyse environnementale rigoureuse qui nous a guidée au long de ce travail. Notre conclusion est donc que la voiture électrique est une bonne idée, mais une mauvaise solution. Une bonne idée, parce que la voiture électrique est plus efficace que la voiture thermique, qu'elle réduit les émissions de gaz à effet de serre, le bruit et les effets de la pollution et qu'elle se marie fort bien avec des sources d'énergie renouvelables. Par ailleurs les perspectives d'amélioration de son bilan environnemental sont importantes, principalement en raison de la possibilité de réduction des émissions dues à la production d'électricité.

Mais la voiture électrique est malgré tout une mauvaise solution, pour différentes raisons. La diminution des gaz à effet de serre qu'elle permet, en l'état actuel du mix énergétique de la production d'électricité, ne suffit pas à atteindre les objectifs fixés par le GIEC. La réduction des incidences de la pollution atmosphérique tient plus au déplacement des émissions (les pots d'échappements en ville sont remplacés par les cheminées des centrales de production d'électricité en dehors des villes) qu'à leur diminution. La diminution du bruit ne se produit que pour des vitesses inférieures à 50 km/h. Par ailleurs, un grand nombre d'incertitudes planent encore quant à sa fiabilité, la disponibilité et les impacts sur l'environnement de certaines ressources nécessaires à sa construction et les conséquences fortuites (effets pervers) que pourraient amener son utilisation à grande échelle. Mais d'un point de vue environnemental, son principal défaut est sans doute de donner l'illusion que le modèle actuel de mobilité individuelle motorisée est pérenne.

Si la voiture électrique est une bonne idée, elle n'est pas un changement de paradigme et le simple remplacement du moteur thermique par un moteur électrique sans rien changer au modèle de mobilité individuelle n'est pas une situation souhaitable d'un point de vue environnemental. La mobilité ne pourra être durable, c'est-à-dire compatible avec les limites environnementales et énergétiques de la Terre que dans le cadre d'une mobilité repensée qui devrait à notre avis se fonder sur un triple impératif :

- diminuer la mobilité : ce qui ne pourra se faire que par une refondation profonde à la fois de la conception de la mobilité et d'autres modes d'organisation de nos sociétés, au premier rang duquel l'aménagement du territoire;
- augmenter l'efficacité de la mobilité : en privilégiant pour les trajets courts les modes actifs (marche, vélo, etc.) et pour les trajets plus longs les transports en commun ferrés électriques sans énergie embarquée (tram, métro, train). Les besoins résiduels qui ne peuvent être rencontrés que par des modes de déplacement individuels devraient être couverts par des véhicules électriques ;
- utiliser le plus possible des sources d'énergie renouvelables.

Dans ce cadre la voiture électrique a un rôle à jouer, mais uniquement pour les besoins qui ne peuvent pas être couverts par la mobilité active et les transports en commun. Son utilisation devrait donc se concevoir en dehors du modèle dominant actuel qui prône la possession par chaque individu de véhicules surdimensionnés.

Table des matières

Résumé	1
Table des matières	2
Table de illustrations (figures et tableaux)	4
Figures	4
Tableaux	4
Liste des acronymes et abréviations	5
Introduction	6
Partie I. Le système actuel de transport individuel motorisé : contexte et nuisances	8
I.1. Contexte	8
I.1.1. Importance de la voiture individuelle et ordres de grandeur	8
I.1.2. Type de carburant utilisé par le secteur des transports routiers	8
I.1.3. Puissance et consommation des véhicules	9
I.1.4. Lien entre voiture individuelle et dispersion de l'habitat et des activités économiques	10
I.1.5. Peak Oil : la fin du pétrole bon marché	10
I.2. Nuisances du système de transport individuel motorisé actuel fondé sur la voiture particulière	12
I.2.1. Nuisances environnementales	12
I.2.1.1. Flux de matière et d'énergie	12
I.2.1.2. Émissions de gaz à effet de serre	13
I.2.1.3. Pollutions	13
I.2.1.4. Aménagement et occupation de l'espace	14
I.2.1.5. Bruit	14
I.2.2. Nuisances économiques et sociales	15
I.3. Question de recherche	15
Partie II. Analyse critique des connaissances existantes	17
II.1. Les batteries	17
II.1.1. Comparaison des technologies	17
II.1.2. Le lithium comme facteur limitant	18
II.1.3. Solutions à la limite d'autonomie	19
II.1.3.1. Bornes de recharge	19
II.1.3.2. Solutions technologiques	20
II.1.3.3. Solutions Comportementales	21
II.1.4. Bilan environnemental et recyclage des batteries au lithium	21
II.1.5. Conclusion	25
II.2. Énergie et émissions	26
II.2.1. Questions méthodologiques	26
II.2.2. Solutions proposées pour répondre à ces questions méthodologiques	29
II.2.3. Efficience comparée voiture électrique et voiture thermique	31
II.2.4. Émissions de GES	33
II.2.5. Émission de polluants atmosphériques	36
II.2.6. Perspectives d'amélioration	37
II.2.7. Demande supplémentaire en électricité et craintes pour le réseau	40
II.2.8. Effet positif sur le réseau, sur la production d'énergie « verte » et v2g	42
II.2.9. Conclusion	44
II.3. Avantages, limites et possibles effets négatifs de la VE	46
II.3.1. Pollution, changement climatique et bruit	46
II.3.2. Diversité des sources d'approvisionnement	50
II.3.3. Utilisation de l'espace en ville	50
II.3.4. Coût d'achat et d'utilisation	51
II.3.5. Spécificités de fonctionnement pour l'automobiliste : recharger la batterie	52

II.3.6. Possibles effets négatifs	52
II.3.6.1. Effet rebond	53
II.3.6.2. Effet d'aubaine	54
II.3.6.3. Effet d'addition	54
II.3.6.4. Effet de substitution	55
II.3.7. Conclusion	55
II.4 Politiques publiques	57
II.4.1. Catégorisation des types de politiques publiques	57
II.4.1.1. Incitants financiers	57
II.4.1.2. Incitants non financiers	58
II.4.1.3. Législation	58
II.4.1.4. Financement et coordination de l'infrastructure	58
II.4.1.5. Standardisation	58
II.4.1.6. Comportement du consommateur	59
II.4.2. Exemples de politiques publiques	59
II.4.2.1. Subsidés à l'achat	59
II.4.2.2. Soutien à l'industrie	61
II.4.3. Politiques de l'Union Européenne	62
II.4.3.1. La réglementation sur les rejets de CO ₂	62
II.4.3.2. EU-ETS	64
II.4.3.3. Livre blanc des transports	65
II.4.4. Conclusion	67
Partie III. Vers un changement de paradigme ?	68
III.1. Théorie de la transition : une grille de lecture du système actuel de mobilité individuelle motorisée	68
III.2. Constructeurs Traditionnels : Renault et Nissan	69
III.3. Constructeur émergent : Tesla	71
III.4. La voiture devient un téléphone portable : le projet Better Place	72
III.5. Économie de fonctionnalité : <i>Car Sharing Clubs</i>	74
III.6. Conclusion : comment repenser la mobilité ?	77
Conclusion	82
Bibliographie	83

Table de illustrations (figures et tableaux)

Figures

<i>Figure 1 : Potentiel économique d'atténuation par secteur en 2030 (en dollars par tonne de CO₂ équivalent)</i>	47
<i>Figure 2 : Coût de réduction en € par tonne de CO_{2e} (ordonnée) et potentiel de réduction en gigatonnes de CO_{2e} par an (abscisse)</i>	48

Tableaux

<i>Tableau 1: Autonomie de la Nissan Leaf dans différentes conditions d'utilisation</i>	29
<i>Tableau 2 : Efficacité énergétique du réservoir à la roue pour les voitures électriques</i>	31
<i>Tableau 3 : Efficacité énergétique du réservoir à la roue pour les voitures thermiques</i>	31
<i>Tableau 4 : Efficacité énergétique du puits au réservoir pour les voitures électriques</i>	31
<i>Tableau 5 : Efficacité énergétique du puits au réservoir pour les voitures thermiques</i>	32
<i>Tableau 6 : Efficacité énergétique du puits à la roue pour les VE et les VT</i>	32
<i>Tableau 7 : Émissions de GES des VE et des VT selon différentes hypothèses</i>	33
<i>Tableau 8 : Potentiel de diminution des émissions de GES pour 10% de VE en 2020 en Belgique</i>	46
<i>Tableau 9 : Estimation du coût en carburant pour des voitures utilisant différents types de carburant (diesel, essence et électrique)</i>	51
<i>Tableau 10 : Montant et destination des prêts alloués dans le cadre de l'ATVMLP</i>	61

Liste des acronymes et abréviations

Note préliminaire : dans le cadre de cette liste, le terme « véhicule » est utilisé au sens restreint de voiture, et sera utilisé comme tel tout au long de ce mémoire, conformément à ce que l'on trouve souvent dans la littérature. Pour autant, le véhicule électrique peut tout aussi bien être un deux-roues électrique ou un camion électrique et dans ce cas sera spécifié comme tel.

ACV : analyse cycle de vie.

CO_{2e} : CO₂ équivalent, potentiel de forçage radiatif total d'une activité prenant en compte l'ensemble des GES et en les ramenant à l'unité du potentiel de forçage radiatif du CO₂.

CE : Commission européenne.

Charb. : charbon.

DG : direction générale (de la commission européenne).

EPA : Environmental Protection Agency, agence américaine de protection de l'environnement.

Ess. : Essence dans le sens de carburant pour moteur à combustion interne issu principalement de la distillation du pétrole.

FAP : filtre à particules.

GES : gaz à effet de serre, ensemble des gaz responsables de l'effet de serre au nombre desquels on compte principalement le dioxyde de carbone (CO₂), le protoxyde d'azote (N₂O) et le méthane (CH₄).

GIEC : Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat.

MPG : en anglais *miles per gallon*, mile par gallon, sert de référence de consommation permettant de comparer les voitures au Etats-Unis. Le mile correspond environ à 1,6 km et le gallon environ à 3,78 l.

PM : en anglais *particulate matter*, particules fines.

UE : Union Européenne.

VE : véhicule électrique, en anglais *electric vehicle* (EV), dans la pratique on l'utilise au sens restrictif de véhicules électriques à batteries (VEB) alors qu'un véhicule à pile à combustible peut aussi être considéré comme un véhicule électrique bien que dépourvu de batteries.

VEB : véhicule électrique à batterie, en anglais *battery electric vehicle* (BEV).

VEH : véhicule électrique hybride (non rechargeable), en anglais *hybrid electric vehicle* (HEV), même si le nom hybride pourrait faire croire qu'on se réfère à tout type d'hybridation, dans la pratique le nom ne désigne que les hybrides thermiques-électriques. Il s'agit de voitures dont la batterie est rechargée en roulant (lors de phases de décélération et de freinage) et non sur une prise de courant (par opposition au VEHR).

VEHR : véhicule hybride électrique rechargeable, en anglais *plug-in hybrid electric vehicle* (PHEV), c'est-à-dire qu'il se recharge sur une prise de courant. Même si le nom hybride pourrait faire croire qu'on se réfère à tout type d'hybridation, dans la pratique le nom ne désigne que les hybrides thermique-électrique.

VT : véhicule thermique (parasynonyme de véhicule à moteur à combustion interne ou à explosion) désigne les véhicules à essence et au diesel. En anglais le terme *Internal Combustion Engine Vehicle* (ICEV) est plus souvent utilisé.

V2G : *vehicle to grid*, système qui permet à la voiture électrique de communiquer avec le réseau électrique afin de recharger sa batterie ou d'injecter de l'électricité sur le réseau de façon « intelligente ».

WWF : World Wide Fund for Nature (voir <http://www.wwf.org/>).

Introduction

Le mode de vie des sociétés dans les pays dits développés¹ se caractérise par une grande influence de la voiture individuelle pour le transport de personnes. Elle a permis l'étalement de l'habitat, la concentration des zones de travail en dehors des villes et une augmentation, sans précédent dans l'histoire de l'humanité, de la mobilité individuelle. Longtemps considérée comme un facteur d'émancipation et bénéficiant toujours, plus particulièrement dans les pays en développement, d'un fort pouvoir d'attraction, la voiture est devenue pour de nombreux habitants de la Terre indispensable à leur façon de vivre et indissociable de leur confort. Elle confère donc aux acteurs économiques qui la soutiennent un statut privilégié, renforcé par la non remise en question du modèle de possession d'une voiture individuelle à moteur thermique.²

Pour autant les esprits les plus alertes ne manquent pas de dénoncer les incidences négatives de ce modèle, incidences qui commencent à être partagées par une part croissante de la population, en tous cas dans les pays développés. Ces incidences sont de toutes sortes et concernent un large spectre de conséquences. Elles couvrent par exemple l'aménagement du territoire ou l'approvisionnement énergétique mais aussi des nuisances environnementales (consommation de matière et d'énergie, émission de gaz à effet de serre, pollutions, occupation de l'espace) ainsi que sociales et économiques (coûts importants liés à l'automobile qui provoquent l'exclusion d'une partie de la population, embouteillages, effets sur la santé publique).

Face à ces problèmes, la voiture électrique est présentée par certains comme une solution et compte des partisans, y compris parmi ceux qui se préoccupent de la défense de l'environnement. Elle permet de se passer du pétrole, considéré comme un carburant polluant et appelé à se raréfier, et de ne rejeter aucune émission directe, même si la plus élémentaire des honnêtetés intellectuelles exige de prendre en compte les émissions dues à la génération de l'électricité. La voiture électrique permettrait aussi de diminuer le bruit grâce à un moteur particulièrement silencieux. Certains voient même dans ses batteries un adjuvant précieux pour l'électricité générée à base de sources d'énergie renouvelables. Car celles-ci sont des énergies de flux (énergie solaire et éolienne) dont le stockage est problématique au contraire des énergies de stock (pétrole, gaz, charbon) qui ne présentent pas cette faiblesse. Les batteries permettraient alternativement de stocker la génération électrique excédentaire, caractéristique de l'électricité produite à base de sources d'énergie renouvelables qui est intrinsèquement intermittente et donc imprévisible à court terme, et de libérer de l'électricité sur le réseau lorsque la génération est déficitaire, lors de pics de consommation.

Après une première partie en forme de brève introduction qui plantera le décor, nous entrerons dans le vif du sujet. La deuxième partie se veut une analyse critique du bilan environnemental et énergétique de la voiture électrique, sur la base des connaissances existantes. Elle s'ouvre, de façon sans doute un peu étonnante, par un chapitre sur la question des batteries, qui doivent leur préséance à leur rôle central dans ce qui fait la différence – et surtout la limite – entre les voitures électriques et celles à moteur thermique. Vient ensuite un chapitre central qui compare l'efficacité énergétique et les émissions de ces deux types de motorisations et pose la question des impacts – positifs ou négatifs – pour le réseau électrique de l'électrification d'une partie de la flotte automobile. Le chapitre suivant tente de saisir les conséquences, en termes de nuisances et de changements pour ses utilisateurs, que représenterait l'électrification de la motorisation automobile. Il sera question d'identifier ce qui pourrait évoluer positivement, ce qui ne serait pas modifié et ce qui risque d'empirer. Le dernier chapitre s'intéresse à l'influence des politiques publiques sur le possible avènement de la voiture électrique.

1 Nous reprenons pour ce terme la vision critiquable mais à notre avis pertinente pour la problématique que nous étudions, qui divise le monde sur une base socio-économique en trois groupes ; les pays développés (soit les pays de l'OCDE), les pays émergents (tels que le Brésil, la Russie, l'Inde, la Chine, l'Afrique du Sud ou le Mexique) et les pays en développement (au nombre desquels la majorité des pays de l'Afrique centrale).

2 Que nous appellerons aussi indistinctement moteur à combustion interne.

La troisième partie est davantage prospective et pose la question de l'avènement d'un changement de paradigme dans le système de transport routier individuel motorisé, changement dont la voiture électrique serait une partie intégrante. En partant de différents exemples analysés à travers la grille de la théorie de la transition, elle tente d'y voir clair dans les intentions des différents acteurs et de brosser à gros traits les contours de ce que pourrait être une refondation de la mobilité individuelle, compatible avec les limites de la Terre. Ainsi, au bout de notre parcours, nous pourrions tenter de répondre à notre interrogation initiale : « *La voiture électrique : véritable révolution ou fausse bonne idée ?* ».

Partie I. Le système actuel de transport individuel motorisé : contexte et nuisances

I.1. Contexte

I.1.1. Importance de la voiture individuelle et ordres de grandeur

L'automobile est sans conteste une des inventions qui a le plus radicalement transformé la société dans laquelle nous vivons. Inventée dès la fin du XIXe siècle, mais produite industriellement à partir du début du XXe siècle, elle se démocratise réellement après la seconde guerre mondiale. Par rapport à d'autres moyens de transport, la voiture permet de s'affranchir de contraintes spatiales, en offrant la possibilité de se déplacer rapidement sur de longues distances pourvu que des routes soient à disposition. Mais elle permet aussi, par rapport aux transports collectifs, de s'extraire des contraintes temporelles puisque le conducteur est lui-même bénéficiaire du transport et qu'il choisit donc quand il souhaite se déplacer [Dobruszkes, 2009]. En ce sens elle a longtemps représenté – et continue encore pour une part à représenter – un vecteur de libération pour l'Homme.

Il y a aujourd'hui dans le monde, selon les estimations, environ 800 millions de voitures particulières en circulation.³ En Belgique, ce sont un peu plus de 5 millions de voitures particulières qui circulent, un nombre qui a environ doublé depuis la fin des années septante et plus d'un demi-million de voitures particulières neuves sont immatriculées annuellement [STATBEL, 2010]⁴. Le taux de motorisation belge est par ailleurs de 467 voitures pour 1000 habitants, un peu en dessous de la moyenne européenne.

Les distances parcourues par an en Belgique sur le réseau routier par tout type de véhicules (en véhicule-km) donnent littéralement le tournis : 97,7 milliards (en 2008). L'augmentation de cette distance est tout aussi vertigineuse puisque par rapport à 1970 où « seuls » 29,35 milliards de km étaient parcourus, cela représente une différence de 233,1% [STATBEL, 2010]. Si on divise ce chiffre par la taille du parc belge de véhicules on obtient une moyenne d'environ 15.000 km parcourus annuellement par véhicule⁵.

I.1.2. Type de carburant utilisé par le secteur des transports routiers

L'énergie primaire utilisée par le secteur des transports routiers est dominée de façon écrasante par les ressources fossiles. Au niveau mondial, l'International Energy Agency avance les chiffres de 95% d'énergie primaire d'origine fossile (issue du pétrole brut) pour le secteur, le reste se composant principalement d'agrocarburants [IEA, 2010]. Cette situation est un cas unique et rend le secteur des transports extrêmement dépendant des hydrocarbures liquides fossiles. La raison de cette dépendance réside dans la quasi omniprésence du moteur à combustion interne, qui utilise l'énergie chimique contenue dans les hydrocarbures pour la convertir en énergie motrice. Or ces hydrocarbures sont obtenus de la façon la plus économiquement rentable par l'extraction et la distillation du pétrole brut.

Mais si le secteur des transports est dépendant du pétrole, l'inverse est tout aussi vrai. La moitié environ du pétrole brut extrait de par le monde sert de carburant pour les transports; pour les pays de l'OCDE, en partie désindustrialisés et dont l'économie repose plus sur les flux de transports, cette proportion monte à deux tiers.

3 Voir [Sperling, 2009]. Ce nombre n'est pas connu avec précision en raison du fait que certains pays ne fournissent pas ou ne tiennent pas une comptabilité précise. Les mêmes auteurs estiment qu'un peu plus d'un milliard de véhicules motorisés circulent actuellement dans le monde.

4 Il s'agit précisément pour 2009 d'un parc de 5.192.566 voitures et de 540.542 nouveaux véhicules particuliers immatriculés en 2008.

5 En estimant pour les chiffres non disponibles du parc de véhicules de 2008, une moyenne entre ceux de 2007 et de 2009.

Si on ajoute à cela les usages indirectement liés aux transports comme l'asphaltage de routes, la fabrication de lubrifiants et la pétrochimie à usage de véhicules, cette proportion augmente encore de 3 à 4% [Kendall, 2008 : 22-23]. On voit donc que ces deux secteurs sont, sans grande surprise, intimement liés et ce depuis de nombreuses décennies.

Leurs destins sont unis depuis la genèse même de l'industrie automobile et on peut même dire que ces deux secteurs, automobile et pétrolier, jouent, avec l'électricité, à une sorte de *ménage à trois* qui risque de connaître un nouvel épisode dans les années à venir. À ses débuts au milieu de XIXe siècle, l'industrie pétrolière trouva ses débouchés dans les applications d'éclairage. À l'époque on utilisait à cette fin la graisse de baleine, mais à force de prélever dans la population de baleines au-delà de son taux de renouvellement, les baleines se raréfièrent quasiment jusqu'à l'extinction. Les prix grimpèrent et on préféra à la graisse de baleine le kérosène issu du pétrole, meilleur marché et abondant. On peut donc dire que le pétrole, aujourd'hui montré du doigt pour ses méfaits sur l'environnement, permit paradoxalement de sauver le plus grand des mammifères terrestres. Pourtant, assez rapidement l'électricité vint remplacer à son tour le pétrole et l'ampoule électrique s'imposera comme la façon la plus pratique et la plus sûre de permettre l'éclairage artificiel. A la fin du XIXe siècle, cette évolution mit pratiquement fin à l'industrie pétrolière, en panne de débouché, qui traversa une crise dont seul l'avènement de l'automobile lui permit de sortir [Heinberg, 2005]. Le moteur à combustion interne nécessitait un type de carburant auquel le pétrole répondait parfaitement et le mariage de ces deux industries fut rapidement célébré. Plus d'un siècle s'écoula sans transformation technique majeure, la voiture d'aujourd'hui étant fort proche de ce qu'elle était à ses débuts. Actuellement les compagnies pétrolières et l'industrie automobile ont tellement gagné en importance, que si l'on classe les entreprises mondiales par chiffre d'affaires, 6 des 10 premières font partie de l'un ou l'autre de ces secteurs⁶. Et aujourd'hui, alors qu'on commence à prendre la mesure de la raréfaction du pétrole, c'est l'électricité⁷ qui est appelée au chevet de l'automobile

1.1.3. Puissance et consommation des véhicules

La puissance actuelle des voitures particulières, exprimée pour le grand public en chevaux-vapeur⁸ (ch) se rapporte en fait à une estimation de la véritable force de traction d'un cheval. A l'origine certains moyens de transports, mêmes collectifs comme les premiers tramways, étaient tirés par des chevaux et on a donc gardé cette habitude de mesurer la puissance de cette façon. Or si on se penche sur les spécifications techniques des voitures en circulation dans nos pays aujourd'hui, mises à part les petites citadines, elles ont toutes des puissances de plus d'une centaine de chevaux-vapeur. Par ailleurs, il est possible de faire fonctionner ces moteurs sur des distances de plusieurs centaines de kilomètres avec un plein de carburant. Cela permet de se rendre compte que l'utilisateur de voitures actuelles a à sa disposition, une quantité d'énergie et une puissance motrice pour ses besoins de transport tout à fait spectaculaires. Si on remonte dans le temps d'à peine 150 ans, même les plus riches habitants de la planète ne pouvaient rêver d'avoir à leur disposition de tels moyens.

La consommation et la puissance moyennes des véhicules aux États-Unis⁹ depuis 1975 montrent des évolutions très intéressantes. Suite aux chocs pétroliers successifs de 1974 et 1979, la consommation

6 La liste complète selon le magazine Fortune (en gras les 6 sociétés du duo pétrole-automobile) : Wall-Mart, **Royal Dutch Shell**, **Exxon Mobil**, **BP**, **Toyota**, JPH, **Sinopec**, State Grid, Axa, **China National Petroleum**. Notons qu'un an plus tôt la liste comprenait encore **Chevron**, **Total** et **ConocoPhillips** classés en 2009 au 5e, 6e et 7e rang. Voir http://money.cnn.com/magazines/fortune/global500/2010/full_list/

7 Rappelons d'emblée que l'électricité est générée à l'heure actuelle majoritairement (environ deux tiers) à l'aide de combustibles fossiles (surtout charbon et gaz et un peu de pétrole) dans les centrales électriques. Voir [AIE, 2010 : 219].

8 Notons que cette unité de mesure n'est pas officielle pas plus que normalisée. Un cheval-vapeur vaut environ 736 W en Europe continentale et environ 746 W pour les anglo-saxons. Il faut croire qu'on fouettait les chevaux plus souvent dans l'empire britannique que sur le continent européen...

9 Il ne nous a malheureusement pas été permis de trouver de chiffres couvrant une aussi longue période pour l'Europe.

moyenne pour 100 km passe de 19 litres à 11 litres en moins de dix ans. Parallèlement, la puissance moyenne des automobiles chute, certes dans des proportions moindres, mais passe de 130 ch à 100 ch. Mais à partir de 1982 et jusqu'à nos jours, si la consommation reste relativement stable, la puissance va faire plus que doubler pour atteindre environ 220 ch. La masse moyenne des voitures va suivre exactement la même tendance, chutant de 1800 kg à 1450 kg entre 1975 et 1982 pour retrouver environ aujourd'hui son niveau de 1975 [Syrota, 2008 : 18]. On peut donc affirmer que les efforts d'efficience des moteurs entrepris par les constructeurs ont permis, en 35 ans, de mettre sur le marché des voitures de masse comparable, qui se déplacent avec 40% de carburant en moins et plus de deux fois plus de puissance (donc plus de capacité d'accélération et de vitesse maximale).

Rétrospectivement, on ne peut que regretter le manque de vision à long terme des constructeurs et le manque de courage politique des décideurs. Si la tendance à plus de sobriété, brièvement appliquée suite aux deux chocs pétroliers s'était maintenue jusqu'à aujourd'hui, nul doute que les consommations moyennes des véhicules particuliers seraient sensiblement plus faibles.

1.1.4. Lien entre voiture individuelle et dispersion de l'habitat et des activités économiques

Alors que jusqu'à la moitié du XXe siècle, les nouvelles zones d'habitat se développent le long des tracés du chemin de fer, la démocratisation de la voiture et du camion va bouleverser cette situation. L'automobile permet une dispersion de l'habitat qui va d'abord coloniser les abords des villes puis des lieux de plus en plus éloignés des centres urbains. De même, les activités économiques vont pouvoir s'établir un peu partout, pourvu qu'une route y mène, ce qui conduira au développement des parcs industriels et d'activités loin des villes. Mais ces lieux sont uniquement accessibles en voiture du fait d'une trop faible densité pour justifier économiquement une offre de transports en commun, ce qui aboutit à une situation de dépendance automobile. L'homme, en voulant s'affranchir des contraintes géographiques, devient en quelque sorte esclave de sa propre création et l'automobile devient indispensable dans les territoires qu'elle a permis de créer [Orfeuill, 2008].

Il est par ailleurs curieux de constater que si la voiture a accéléré la dispersion de l'habitat et des lieux d'activité économique, celle-ci fut entamée dans un certain nombre de villes occidentales par l'avènement des transports en commun électriques. Comme le rappelle Heinberg, les banlieues se développèrent suite à l'électrification des transports en commun dès la fin du XIXe siècle. Le centre de certaines villes se vida alors partiellement de ses habitants qui partirent s'installer loin du centre historique qui accueillit des activités économiques et commerciales [Heinberg, 2005]. Paradoxalement, les transports en commun, souvent cités comme « la » solution pour résoudre une partie des problèmes liés à l'automobile, ont initié le mouvement qui allait donner à la voiture sa place prépondérante dans le système de transport individuel actuel. Notons cependant que la voiture va initier l'émergence d'un étalement urbain différent, plus éloigné et plus étalé, puisque lié aux routes qui vont peu à peu tisser leur toile dans le paysage.

1.1.5. Peak Oil : la fin du pétrole bon marché

Un grain de sable est en train de gripper la machine bien huilée qui depuis des décennies règne en maître sur le monde du transport individuel. Aujourd'hui de plus en plus de voix s'élèvent, en particulier parmi des géologues ayant passé toute leur carrière dans l'étude de l'extraction du pétrole, pour mettre en garde sur le risque d'entrer prochainement dans une phase de manque de pétrole. Tout a commencé avec les prédictions de M. King Hubbert qui, comme nombre de prophètes, ne quasiment pas écouté lorsqu'il annonça en 1956 l'évolution des extractions futures aux États-Unis. La conclusion de ses recherches était que la production américaine de pétrole connaîtrait un pic entre 1966 et 1972 avant d'entamer un déclin pour finalement former graphiquement une courbe en forme de cloche. Cette courbe de production s'observait dans quasiment tous les puits, en raison du fait que le pétrole le plus facile à extraire était pompé en premier, ce qui faisait

rapidement augmenter la production. Il observa que la quantité produite arrivait ensuite à un plateau avant d'entamer une décrue plus ou moins longue. Effectivement la production américaine connut son apogée en 1970 et ne cessa de décroître depuis. Après Hubbert, d'autres géologues ont analysé ses travaux et réalisé d'autres recherches pour arriver aux mêmes conclusions. Ils situaient la date du pic à des années parfois différentes mais jamais après 2020.¹⁰

En plus de la diminution des ressources en pétrole disponibles, il est un autre problème qui risque de conduire à une situation où l'offre de pétrole ne parvient pas à suivre la demande pour maintenir les prix aux niveaux que nous avons connu ces dernières années. Patrick Brocorens, professeur à l'Université de Mons et membre de l'ASPO,¹¹ met ainsi en garde contre la faiblesse des investissements en infrastructures d'extraction du pétrole que connaît le monde aujourd'hui. Il faut en effet environ 6 à 7 ans pour développer de gros projets pétroliers avant leur mise en activité et compte tenu de la déplétion des gisements qui est stable (autour de 4% par an) on peut donc calculer à cette échéance la quantité qui pourra être extraite.¹² Il pose dès lors l'hypothèse que si la demande en pétrole continue à croître dans la même proportion que ces dernières années, celle-ci ne pourra plus être rencontrée par l'offre d'ici 3 ou 4 années. On se dirigerait alors vers une période de plateau ondulant caractérisé par des cycles de crise et de reprise économiques liés à la quantité de pétrole extraite. Chaque crise économique trouvant en partie son origine lorsque le plafond de production est atteint est suivie par une récession qui fait baisser la demande, le prix du pétrole et donc aussi les projets d'extractions, le tout étant alors suivi par une reprise économique (grâce à cette baisse du prix du pétrole) qui continue jusqu'à ce que le plafond suivant soit à nouveau atteint, et ainsi de suite.

Finalement, même si le pétrole ne vient pas à manquer pendant quelques années voire une décennie, il semble acquis qu'il se maintiendra à l'avenir à des niveaux de prix élevés. Même en retirant la part dans son prix qui est d'origine spéculative on a vu dans les dernières années les cours augmenter fortement avant que la récession économique mondiale ne mette fin à ces hausses. Une façon intéressante de mettre les choses en perspective est de comparer l'énergie nette du pétrole. Le géologue Youngquist s'est penché sur la question du ratio énergétique total du pétrole extrait. Il s'agit de calculer, pour chaque unité de pétrole extraite, la quantité d'énergie totale utilisée pour arriver à l'extraction, ramené à la même unité de mesure. Il estime ainsi que si ce ratio était aux Etats-Unis de 28 pour 1 en 1916, il n'était plus que de 2 pour 1 en 1985 et continuait à baisser [Youngquist, 1997 : 183]. Actuellement, au niveau mondial, les estimations vont de 11 pour 1 à 18 pour 1. D'après Palcher et Herweyer, le ratio énergétique montre effectivement une pente descendante passant de 35 pour 1 en 1990 à 18 pour 1 en 2005 et à 12 pour 1 en 2007 [Hall 2008].

Au problème du tarissement des ressources disponibles s'ajoute celui de l'augmentation de la demande. Si celle-ci est relativement modérée dans les pays de l'OCDE, elle est en forte hausse dans des pays comme la Chine ou l'Inde et cette tendance ne devrait pas s'arrêter dans les prochaines décennies [IEA, 2010]. On peut donc raisonnablement se poser la question de savoir pour combien de temps les vannes du pétrole resteront ouvertes. On peut se demander aussi, même si une partie du prix à la pompe est constitué de taxes, quel prix il faudra payer dans les prochaines années pour faire rouler les voitures dont nous sommes si dépendants. Plus encore, il faut s'interroger sur le prix environnemental que la société est prête à payer. Car si le prix du pétrole augmente c'est aussi parce qu'il est de plus en plus difficile à trouver et à extraire, ce qui indique sans doute aussi que les conséquences pour les écosystèmes ont également tendance à augmenter. Le forage de puits très profonds en mer fait prendre de grands risques pour l'environnement comme nous l'a rappelé la

10 Pour une discussion critique sur les réactions aux théories de Hubbert on se référera par exemple à Heinberg (Richard), *The Party's Over : Oil, War and the Fate of Industrial Societies*, New Society Publishers, 2005, 288 p.

11 L'ASPO est l'*Association for the Study of Peak Oil and Gas*, il s'agit d'un réseau de scientifiques issus d'un grand nombre d'universités et de centres de recherches qui étudient la question de la déplétion des ressources en pétrole et en gaz. Voir <http://www.peakoil.net/>

12 Voir Patrick Brocorens, « Energies fossiles : le meilleur allié des énergies renouvelables », présentation faite lors du colloque de l'APERRE « De la contribution à la transition: le renouvelable au-delà de l'énergie », Bruxelles, 12 mai 2011. [Disponible en ligne : http://www.apere.org/doc/110512_Patrick_Brocorens_ASPO.pdf]

catastrophe récente dans le golfe du Mexique.¹³ De même l'extraction depuis ce qu'on appelle les sources non conventionnelles de pétrole, comme les sables bitumeux, a un impact énorme sur les écosystèmes¹⁴. En Alberta (Canada) par exemple où l'extraction a déjà débuté, la forêt boréale est décimée et des lacs artificiels sont créés pour contenir les déchets de traitement des sables bitumeux. Ces lacs sont remplis d'une eau huileuse produite au rythme de deux fois et demi la quantité de pétrole extraite ; par ailleurs il faut traiter environ deux tonnes de sable pour produire un baril de pétrole.¹⁵

I.2. Nuisances du système de transport individuel motorisé actuel fondé sur la voiture particulière

I.2.1. Nuisances environnementales

I.2.1.1. Flux de matière et d'énergie

Comme toute activité industrielle, la fabrication d'automobiles nécessite de la matière et de l'énergie. Il en va bien sûr de même pour les activités pétrolières. Or l'énergie n'étant pas présente en tant que telle dans la nature, il faut donc trouver des sources d'énergie, éventuellement l'extraire, la transporter et la transformer pour en faire de l'énergie utile. Chacune de ces étapes n'étant pas sans impact sur l'environnement.

L'approvisionnement en matière première est également source d'impacts environnementaux. Avec l'avènement du concept d'ACL (analyse cycle de vie), même le grand public commence à comprendre que les effets des objets que nous utilisons ne se limitent pas à leur utilisation. Il faut aussi prendre en compte la fabrication, la fin de vie, les flux de transport en plus de la mise à disposition de la matière pour qu'elle puisse être transformée. On peut même avancer, selon une simple règle d'économie, que plus une matière se raréfie, plus son approvisionnement tendra à avoir des impacts sur l'environnement. En effet, même en tempérant ce constat par de nouvelles découvertes et des progrès technologiques dans l'extraction, ce sont généralement les sources les plus faciles à exploiter qui sont les premières à être utilisées¹⁶. Or quand la difficulté augmente, il faudra nécessairement utiliser davantage d'énergie et sans doute aussi transformer plus profondément l'écosystème. Le cas du pétrole cité plus haut en est une bonne illustration.

On ne peut donc se limiter, lorsqu'on parle des effets de la voiture sur l'environnement, à ce qui sort du pot d'échappement. Voilà pourquoi « voiture verte » est un oxymore qui a malheureusement gagné presque tous les acteurs du débat.¹⁷ Prenons deux exemples pour illustrer ce propos.

La Toyota Prius, une voiture hybride consommant peu par rapport à d'autres véhicules de masse et de dimension similaire est érigée en véritable symbole par les défenseurs autoproclamés de l'environnement et connaît un vrai succès commercial (environ 2 millions d'exemplaires vendus depuis son lancement il y a 13 ans). Elle a été analysée sur son cycle de vie par le fabricant lui-même. Le résultat montre des effets

13 Le 20 avril 2010, Deepwater Horizon, une plateforme pétrolière de la compagnie British Petroleum située dans le Golfe du Mexique subit une explosion qui provoqua une marée noire majeure due à la fuite de pétrole hors du puits qui dura environ 5 mois. Pour une liste extensive de références sur le sujet, voir :

http://en.wikipedia.org/wiki/Deepwater_Horizon_oil_spill

14 Pour une discussion sur ce sujet voir [Youngquist, 2008]

15 Sur le cas précis des sables bitumeux au Canada voir l'alerte donnée par Greenpeace :

<http://www.greenpeace.org/canada/fr/campagnes/sables-bitumineux/>

16 C'est ce qu'on appelle fort joliment en anglais *the low hanging fruit* qu'on peut traduire par "le fruit à portée de main", renvoyant à l'idée que dans la nature, les animaux prélèveront d'abord les fruits les plus facilement accessibles sur un arbre.

17 On ne peut à ce titre que regretter que des ONG comme Greenpeace, sans doute pour être compris du plus grand nombre, tombe dans la facilité de ce vocabulaire inadéquat et trompeur. Voir

<http://www.greenpeace.org/international/campaigns/climate-change/cars/>

contrastés sur ses bénéfices environnementaux supposés.¹⁸

D'autre part un constructeur allemand bien connu, BMW, qui est classé par le *Dow Jones Sustainability Index* de façon assez inattendue meilleure marque depuis 10 ans pour des critères de soutenabilité au sens du développement durable.¹⁹ Il est étonnant que ce constructeur, plus souvent associé à de grosses berlines énergivores, se voie décerner les lauriers d'un classement environnemental. Ce qui lui vaut ce classement, ce sont ses efforts, pour le pilier environnemental du développement durable, de réduction des impacts au niveau de la production en termes des déchets, d'énergie ou d'usage de l'eau. Il faut ajouter aussi que le constructeur produit des voitures qui, compte tenu de leurs performances, sont moins polluantes que celles de la concurrence. La question de la pertinence d'un tel classement continue à se poser, même en lui reconnaissant le mérite d'attirer l'attention sur le cycle de vie complet d'une voiture.

I.2.1.2. Émissions de gaz à effet de serre

Le Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat (GIEC) met en garde dans ses rapports successifs sur les conséquences d'un dérèglement du système climatique mondial, si la température augmente de plus de deux degrés Celsius par rapport au niveau préindustriel. Or il est maintenant validé scientifiquement qu'un certain nombre de gaz stockés dans l'atmosphère provoquent un réchauffement de la planète par effet de serre, en piégeant une partie du rayonnement infrarouge d'origine solaire, réémis par la terre. Ces gaz à « effet de serre » (GES) sont principalement le dioxyde de carbone (CO₂), le méthane (CH₄), les halocarbones, l'oxyde nitreux (N₂O) et l'ozone troposphérique (O₃). Par ailleurs le GIEC estime hautement probable que les émissions causées par les activités humaines sont à l'origine de l'augmentation de cet effet de serre qui provoque un réchauffement climatique. Ce réchauffement est estimé avoir atteint 0,74°C en 2005 [GIEC, 2007].

Parmi les secteurs d'activité les plus émetteurs de GES au niveau mondial, les transports sont responsables directement de 13,1% des GES. De cette partie, 45% environ sont imputables aux voitures particulières [GIEC, 2007b : 328]. Cette proportion varie évidemment grandement d'un continent à l'autre et d'un pays à l'autre en fonction de la part relative des autres activités émettrices de GES et du taux de motorisation de la région en question. Ainsi en Europe, le secteur des transports est responsable directement de l'émission de 24 % des GES et aux États-Unis il atteint 31 % [Eurostat, 2009 : 154]. Si cette proportion peut sembler limitée au niveau mondial, il est utile de rappeler que mis à part le secteur de la production d'électricité, c'est le secteur du transport routier qui a le plus augmenté ses émissions de GES sur la période 1970-2005 [GIEC, 2007c : 104].

En ce qui concerne le rapport entre l'utilisation seule et le reste du cycle de vie d'une voiture à moteur thermique (VT), l'Agence De l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie (ADEME) considère que pour chaque tonne de voiture construite il est émis 5,5 t d'équivalent CO₂ [ADEME, 2007 : 60-63]. Il faudrait ajouter aussi les émissions dues au traitement en fin de vie du véhicule mais en première approximation, sa méthodologie aboutit à 85% des GES émis lors de l'utilisation et 15% pour le reste du cycle de vie d'une voiture.

I.2.1.3. Pollutions

En dehors du CO₂, principal GES mais qui n'est pas un polluant atmosphérique, un certain nombre de polluants sont émis directement ou indirectement par le secteur des transports. Ceux-ci vont contaminer

18 La Toyota Prius serait plus faiblement émettrice qu'une voiture similaire pour les rejets de CO₂, d'oxydes d'azote et d'oxyde de soufre mais légèrement plus émettrice de particules fines et d'hydrocarbures. Malheureusement, comme cette étude a été réalisée par le constructeur lui-même, très peu d'informations sont disponibles. Voir <http://www.autonews.com/apps/pbcs.dll/article?AID=/20101018/OEM01/310189979>

19 Voir http://www.sustainability-index.com/djsi_pdf/Bios08/BMW_08.pdf

principalement l'air, mais aussi les sols et l'eau, soit directement lors de l'utilisation de la VT soit en amont ou en aval, lors des autres phases de son cycle de vie. On notera ainsi principalement²⁰ [IBGE, 2006 : 86] :

- les particules (PM), dues à la combustion incomplète du carburant (principalement pour les moteurs diesel) ainsi qu'à l'usure et aux frottements des éléments du véhicule ;
- les oxydes d'azote (NO et NO₂ principalement, notés NO_x) qui participent au phénomène des pluies acides et à la destruction de l'ozone de haute altitude (ozone stratosphérique) ;
- les composés organiques volatils (COV) qui peuvent s'évaporer (lors du remplissage du réservoir ou lorsque le combustible est pompé vers le moteur) ; ils sont potentiellement cancérigènes et participent à la formation de particules et d'ozone de basse altitude (ozone troposphérique).

Il faut encore ajouter à cette liste des produits aujourd'hui interdits dans la plupart des pays mais anciennement utilisés. Or à cause de l'inertie du parc de véhicules et de leur seconde vie dans des pays en développement, ils restent d'actualité :

- les chlorofluorocarbones (CFC) pour les systèmes de réfrigération détruisant la couche d'ozone de haute altitude ;
- le plomb (Pb) anciennement ajouté à l'essence.

I.2.1.4. Aménagement et occupation de l'espace

L'utilisation de l'automobile conduit à la réquisition d'une partie de l'espace public ou privé, à la fois lorsqu'elle est utilisée et lorsqu'elle est stationnée. On va en effet construire ou prévoir des infrastructures (voies routières et places de parking principalement) qui ont un impact environnemental. D'abord de par la construction et l'entretien même : pour ne parler que des GES, un km d'autoroute rejette environ 95 t de CO₂ équivalent (CO_{2e}) par an²¹. Ensuite parce que le réseau routier conduit à un maillage parfois serré qui empêche le déplacement des non-motorisés (piétons, vélos et vélomoteurs pour les voies rapides) mais aussi pour la faune voire la flore, perturbant ainsi les écosystèmes. Pour pallier cet effet des tunnels ou des ponts sont construits, parfois même exclusivement à destination de la faune.

Par ailleurs ces infrastructures vont entrer en concurrence, dans les villes plus qu'ailleurs, avec d'autres types d'affectation. Il sera donc souvent nécessaire de détruire des bâtiments²² ou de limiter l'espace réservé aux autres usagers de l'espace public (trottoirs, pistes cyclables, arbres, etc.) pour faire place aux automobiles.

I.2.1.5. Bruit

Bien que mesurable précisément, l'impact du bruit des transports est un sujet délicat à appréhender. D'abord parce que la sensibilité au bruit, comme pour celle aux polluants, varie d'un individu à l'autre. Ensuite parce que ses effets ne sont pas toujours perceptibles ou reconnus par les individus qui le subissent. Pour autant, le bruit est généralement identifié dans les enquêtes d'opinion comme une nuisance. En Belgique spécifiquement, une enquête de l'Agence Européenne de l'Environnement en 1998 a révélé que 65% des belges se déclaraient incommodés par le trafic. Par ailleurs des chercheurs l'ont identifié comme cause d'effets néfastes sur la santé. Il peut n'occasionner qu'une simple gêne ou perturber la concentration ou la

20 Nous ne retenons ici que les polluants qui dans les villes, trouvent leur origine au moins pour 25% dans les émissions directes des transports [IBGE, 2006]. Il faudrait pour être complet ajouter par exemple les hydrocarbures aromatiques polycycliques et le dioxyde de soufre.

21 D'après le Bilan Carbone réalisé pour Vinci en 2009 qui affiche un réseau autoroutier de 4384 km et des rejets directs de 420 110 t CO_{2e}. Voir <http://www.vinci-autoroutes.com/209/view-3-article.html>

22 Pour voir un exemple de ce phénomène à l'oeuvre aujourd'hui, voir ce qui se passe à Pékin où les vieux quartiers (*Hutong*) aux ruelles étroites sont l'un après l'autre détruits pour laisser place à de larges avenues permettant le passage de toujours plus d'automobiles.

communication dans les cas les plus légers mais peut aussi être la cause de stress, de perturbation du sommeil ou de troubles cardio-vasculaires voire endocriniens dans les cas les plus sévères [IBGE, 2006 : 103-104].

Le bruit dû à la circulation automobile forme une sorte de tapis sonore permanent dans les villes et trouve son origine dans différentes sources.²³ Aux vitesses les plus faibles (jusqu'à environ 50 km par heure) c'est le bruit du moteur et de l'échappement qui domine. Une fois cette vitesse dépassée, c'est le bruit des frottements avec l'air et du contact du pneu avec la route qui prévaut.

1.2.2. Nuisances économiques et sociales

Il est impossible ici de citer tous les effets négatifs qui peuvent découler de l'utilisation de la voiture individuelle et de sa place dans notre mode de vie. On peut citer pêle-mêle les impacts sur la santé (pollutions, accidents, sédentarisation), la dépendance énergétique aux combustibles fossiles qui motive des politiques étrangères douteuses, le coût des infrastructures, etc. Néanmoins nous en retiendrons deux qui sont intéressantes dans une perspective d'électrification du parc automobile. D'abord le coût de la motorisation : on peut estimer que les dépenses mensuelles pour une voiture moyenne achetée neuve s'élèvent à 600 € environ.²⁴ Avec la dispersion des zones d'activité économique qui rend l'accès à celles-ci difficile voire impossible en l'absence de moyen de transport motorisé, le risque existe qu'on arrive à une situation où il faut une voiture pour aller travailler et un travail pour pouvoir payer sa voiture. Nous verrons que la VE va modifier à la fois l'amplitude et la répartition des coûts supportés par le possesseur d'une voiture.

Ensuite il y a le problème grandissant des embouteillages, qui devient inquiétant plus particulièrement à l'intérieur et aux abords des grandes villes. Une étude de l'OCDE a par exemple estimé à 2% du PIB le coût occasionné par les encombrements routiers dans les pays industrialisés [IBGE, 2006 : 117]. Dans un pays comme la Chine qui adopte les « bienfaits » de notre mode de vie à vitesse accélérée mais en subit les conséquences négatives tout aussi rapidement, on a récemment assisté à un phénomène nouveau et préoccupant. Un embouteillage permanent de 100 km de long a frappé une route reliant Pékin à la ville de Zhangjiakou. Pendant au moins dix jours, cet embouteillage, déclenché par de récents travaux mais dû à la forte augmentation de la fréquentation de la route, a forcé les conducteurs à prendre leur mal en patience.²⁵ Nous verrons que le développement de la VE risque de modifier cette situation, en l'espèce dans le sens d'une aggravation des problèmes.

I.3. Question de recherche

Étant donné le contexte de dépendance à la voiture et la somme des nuisances environnementales que cette dépendance occasionne, le présent travail va tenter de répondre à deux questions. La voiture électrique est-elle une bonne solution, d'un point de vue environnemental, pour répondre aux effets négatifs identifiés ? Par ailleurs, est-ce que l'avènement d'une électrification, au moins partielle, du parc automobile, correspond au début d'un changement de paradigme dans le monde des transports routiers individuels ?

Étant donné que nous avons une formation en sciences humaines et que l'université à laquelle nous appartenons ne dispose pas d'un centre de recherche dans ce domaine, il ne nous est pas possible d'avoir

23 Il faut ajouter aussi l'usage, souvent intempestif et par ailleurs interdit dans les agglomérations, de l'avertisseur sonore, aussi appelé par antonomase "Klaxon".

24 Il est difficile de calculer ce montant et en l'absence de meilleure source nous nous référons pour donner un ordre de grandeur aux chiffres discutables de l'ADEME. Voir <http://www.ademe.fr/particuliers/fiches/voiture/rub3.htm>

25 Le Wall Street Journal rapporte que les conducteurs bloqués pendant des heures, jouent aux cartes ou aux échecs et sont contraints d'acheter boisson et nourriture à des prix exorbitants aux habitants des localités traversées qui ont installé des kiosques le long de la route. Voir <http://online.wsj.com/article/SB10001424052748704125604575449173989748704.html>

accès directement à des données permettant de répondre à la première de ces questions. Nous avons donc décidé de nous appuyer sur la littérature scientifique et de « vulgarisation scientifique », lorsque la première n'était pas disponible, en gardant notre esprit critique en éveil pour tenter de comprendre les différences de résultats ou de conclusions qu'on peut parfois y trouver.

La seconde question sera abordée de façon moins exhaustive et tentera, par différents exemples, de montrer des initiatives qui prétendent participer ou participent concrètement à un changement de paradigme dans le monde des transports routiers individuels. Là aussi nous tenterons de faire preuve d'esprit critique pour essayer de déjouer le vrai du faux, le réaliste de l'utopique et l'idéalisme du « greenwashing ». Ainsi nous pourrions proposer notre réponse à la question centrale qui nous préoccupe : la voiture électrique est-elle une véritable révolution ou une fausse bonne idée ?

Partie II. Analyse critique des connaissances existantes

II.1. Les batteries

II.1.1. Comparaison des technologies

Voyons quelles sont les technologies de batteries d'accumulateurs²⁶ qui sont à la disposition des constructeurs de VE. Nous les détaillerons brièvement par ordre croissant de densité énergétique, c'est-à-dire de quantité d'énergie stockable par unité de poids.

Les batteries au plomb représentent la technologie la plus ancienne qui, par ailleurs, équipe aujourd'hui quasiment toutes les VT pour servir au démarrage du moteur. Pour autant, les batteries au plomb, si elles furent utilisées dans les premiers temps des VE, sont aujourd'hui largement délaissées. La raison en est leurs caractéristiques énergétiques et de puissance plus faibles par unité de masse que les autres solutions disponibles.

Les batteries au nickel-cadmium, largement utilisées au XXe siècle, souffrent en partie des mêmes problèmes que celles au plomb en termes de performances. De plus la toxicité du cadmium contenu dans ces batteries fait que leur usage est très encadré²⁷ et que leur application risque d'être limitée [Bonnaure, 2009].

Les batteries nickel-hydrure métallique (NiMH) sont largement utilisées à l'heure actuelle dans les VEH (comme l'emblématique Toyota Prius) et sont réputées avoir une longue durée de vie et une meilleure densité énergétique que les deux premières. Pour autant leurs performances restent encore trop faibles pour être le seul conteneur d'énergie d'une voiture.

Les batteries sodium chlorure de nickel (NaNiCl, appelées aussi ZEBRA) ont une plus grande densité énergétique mais ne peuvent pas délivrer assez de puissance pour prétendre être utilisées dans des voitures électriques ou hybrides en raison du poids actuel des voitures. Leur usage se cantonne donc plutôt à des véhicules lourds et lents ou ultra légers [Kalhammer, 2007 : 40-42].

Les batteries au lithium sont unanimement reconnues comme étant la technologie dominante pour un usage automobile, au moins pour la prochaine décennie. Quasiment tous les prototypes actuellement annoncés ou à l'essai se basent sur l'une ou l'autre des technologies de batteries au lithium et ce tant pour les motorisations purement électriques que pour les hybrides thermiques-électriques. De toutes les batteries produites industriellement à l'heure actuelle pour un usage nomade, ce sont celles qui présentent le meilleur rapport masse-puissance et masse-énergie. Par ailleurs elles ne souffrent pas de « l'effet mémoire » (une perte de capacité lorsqu'elles sont rechargées avant d'être complètement déchargées). Il existe en fait différentes technologies de batteries au lithium. La plus largement utilisée est la batterie Lithium-ion, popularisée par l'électronique portable (téléphones, ordinateurs, appareils photo, etc.) et faisant l'objet de nombreux projets de recherche et développement pour une application automobile. C'est la plus largement répandue dans les projets de VE chez les constructeurs. Pour autant d'autres technologies sont à l'étude et à différents stades de développement, comme la batterie Lithium-Ion Polymère (Li-Po), la Lithium-air, la Lithium-phosphate (LiFePO) et la Lithium Métal Polymère (LMP) pour ne citer que les principales.

Malgré cet engouement, les batteries au lithium ne sont pas exemptes de points faibles : elles ont tendance à surchauffer (avec risque de prendre feu) en utilisation trop intensive et si elles sont rechargées trop

26 Par souci de concision et conformément à ce que l'on trouve dans la littérature, nous les appellerons dorénavant simplement batteries.

27 Voir à ce propos la réglementation européenne (directive 2006/66/CE) qui en limite l'usage aux secteurs où leur collecte en fin de vie est bien assurée.

longtemps [T&E, 2009 et Ineris, 2011]. Si elles prennent feu, en dehors des dégâts matériels que cela peut occasionner, il existe un risque de pollution par dégagement de produits nocifs dangereux, dont le fluorure d'hydrogène. Une controverse existe aussi sur les batteries au lithium faisant usage du manganèse et qui seraient plus susceptibles de connaître des défaillances risquant de les voir prendre feu que celles utilisant du phosphate de fer.²⁸ Par ailleurs, les batteries occasionnent une augmentation sensible de la masse du véhicule, même si des améliorations sont considérées comme possibles dans un avenir relativement proche, permettant de doubler la densité énergétique [Kromer, 2007]. A titre d'exemple la Nissan Leaf, une VE récemment mise sur le marché et affichant une autonomie théorique de 160 km nécessite une batterie de 200 kg d'une capacité de 24 kWh.

II.1.2. Le lithium comme facteur limitant

Les batteries au lithium-ion (Li-ion), considérées comme la solution la plus réaliste pour équiper les VE, nécessitent une certaine quantité de matières premières pour leur fabrication. On peut distinguer parmi celles-ci des métaux relativement abondants comme l'aluminium, le cuivre ou le fer. D'autres par contre, sont plus rares comme par exemple le nickel, le cobalt ou le manganèse, mais malgré une possible hausse de leurs prix, ceux-ci ne semblent pas devoir poser de problème d'approvisionnement [Lache, 2008 : 42]. Il semble que ce soit en fait le lithium, sous forme de carbonate de lithium (Li_2CO_3), qui constitue le facteur limitant et qui selon certains auteurs risque de manquer en cas d'adoption massive de la VE. Pourtant il ne représente qu'une petite partie des matériaux présents dans une batterie. Selon des sources très divergentes, le lithium ne constitue que 0,9 % à 1,75 % d'une batterie au lithium [citées par Zimmer, 2009]; d'autres auteurs estiment la quantité plus importante, autour de 0,3 kg de lithium pur ou 1,5 kg de carbonate de lithium par kWh de batterie [Tahil, 2006].

Prédire les problèmes d'approvisionnement d'un matériau est fort périlleux et nécessite d'avoir accès à un grand nombre d'information. Il faut connaître la *reserve base* (la quantité de matériau que les experts considèrent présent dans la croûte terrestre), les *reserves* (ce qui est économiquement extractible avec la technologie disponible à un moment donné) et la quantité qui peut être produite (c'est-à-dire ce que l'industrie d'extraction peut fournir avec ses infrastructures à l'industrie de transformation à un moment donné). Ensuite il faudra comparer ces chiffres à l'évolution de la demande, qui, pour le lithium, se situe à environ 16.000 t en 2008 [Evans, 2008]. L'estimation de la *reserve base* faite par l'USGS²⁹ est de 11 millions de tonnes, même si on trouve des auteurs qui la situent au-delà, à près de 30 millions de tonnes par exemple.³⁰ Cette *reserve base* se situe pour 80 % en Amérique latine, plus précisément en Bolivie, au Chili et en Argentine. Pour ce qui est des *reserves*, l'USGS l'estime à 4,1 millions de tonnes. En considérant les estimations de Tahil soit 0,3 kg de lithium par kWh et des batteries de 24 kWh (donc 7,2 kg de lithium par VE), cette quantité serait donc suffisante pour permettre d'équiper environ 570 millions de VE, un peu plus de la moitié des voitures particulières. Voyons pourquoi ce calcul simpliste ne résiste sans doute pas à un examen plus approfondi de la réalité.

Tout d'abord, nous avons considéré une batterie de 24 kWh ce qui représente, d'après les tests réalisés sur la

28 Cette controverse, qui a trouvé un écho dans la presse française, en raison du choix technologique fait par Renault et Peugeot-Citroën d'opter pour la technologie utilisant du manganèse, a été lancée notamment par le chercheur du CNRS Michel Armand. Ce dernier qui travaille sur la question de la sécurité et de la conception des batteries au lithium depuis environ 20 ans. Il faut cependant rappeler que ce chercheur est à la fois juge et partie dans le débat, étant le détenteur d'un brevet sur la technologie utilisant le phosphate de fer, rivale de celle au manganèse qu'il juge dangereuse. Voir : http://lexpansion.lexpress.fr/entreprise/questions-sur-les-dangers-de-la-voiture-electrique_258068.html

29 United States Geological Survey, institut gouvernemental américain qui étudie les sciences de la Terre. Voir <http://www.usgs.gov/aboutusgs/>

30 Pour un éventail d'estimation voir [Zimmer, 2009 : 23].

Nissan Leaf par l'EPA³¹, une autonomie théorique de 150 km environ. C'est bien loin de ce qu'on peut attendre à l'heure actuelle d'une VT qui ne serait donc pas remplacée dans tous ses usages et fausse la comparaison. Ensuite, parce que des estimations de ressources sont sujettes à caution et plus encore pour une industrie minière relativement récente et de petite taille comme celle du lithium. Si la plupart des auteurs ne voient pas les ressources en lithium comme un frein à l'adoption de la VE, il se trouve quelques voix pour s'en inquiéter. Tahil, dans son étude minutieuse sur le lithium, soutient que l'industrie automobile a besoin pour ses batteries de carbonate de lithium avec un haut degré de pureté, ce qui diminue grandement les réserves [Tahil, 2008]. Par ailleurs il faut aussi rappeler que la production réelle est pour l'heure assez limitée à environ 25.000 tonnes³² par an, principalement au Chili, en Australie, en Argentine, en Chine et en Russie. Enfin il faut garder à l'esprit que l'industrie automobile n'est pas la seule à utiliser des batteries au lithium et que celui-ci trouve également des applications dans d'autres domaines que celui des batteries. La demande de batteries au lithium pour l'électronique portable est en croissance de 25% par an, ce qui limite les quantités disponibles. De plus, l'augmentation prévue de la production de lithium ne sera suffisante, d'après Tahil, que pour absorber l'augmentation de la demande due à ce secteur en croissance. Tout au plus pourrait-on disposer, suivant un scénario optimiste d'augmentation de la production, de suffisamment de lithium pour faire 4 à 5 millions de VEHR avec des batteries de 16 kWh à l'horizon 2015.³³ Il y aurait donc à la fois un problème de ressources et de capacités de production. L'électrification de l'ensemble du parc automobile avec des batteries au lithium ne serait donc pas possible [Tahil, 2008]. Si comme le pensent d'autres auteurs elle est réalisable [Evans, 2008a et Evans, 2008], notamment parce que d'autres sources comme le spodumène peuvent être utilisées pour les batteries de voiture, elle nécessiterait assurément des investissements en infrastructure énormes. A cela s'ajoute un problème politique : convaincre certains pays réticents à voir l'exploitation débiter chez eux, comme la Bolivie, qui dispose selon l'USGS de la moitié de la *reserve base* mondiale et qui sera évoqué plus loin. Il est cependant utile de rappeler que la batterie au lithium n'est qu'une technologie et que l'avenir de la VE pourrait s'envisager, à plus long terme, avec d'autres types de batteries.

II.1.3. Solutions à la limite d'autonomie

Comme nous l'avons vu les VE, en l'état actuel de la technologie et même moyennant un surcoût important, ont un rayon d'action limité. Ceci constitue d'ailleurs, avec leur prix, leur principal point faible par rapport à une VT. Cette limite est un obstacle important à l'adoption à grande échelle de la VE et provoque la peur de la panne d'électricité que les anglais appellent *range anxiety*. Or il existe des solutions de différentes sortes pour lever en partie cette contrainte.

II.1.3.1. Bornes de recharge

La solution la plus fréquemment avancée est d'équiper la voirie et les parkings (privés ou publics) de bornes de recharge. Puisque les VE ont moins d'autonomie, la parade est de les recharger souvent. Par ailleurs pour les possesseurs de VE qui n'ont pas de garage, la seule possibilité de recharge est l'utilisation de bornes de recharge. Celles-ci posent cependant un certain nombre de problèmes.

D'abord il convient de remarquer que ces bornes ayant un coût important, se posera donc la question de savoir qui le supportera. On peut émettre en gros trois hypothèses : les pouvoirs publics, les compagnies de distribution ou de génération d'électricité et enfin des opérateurs privés. Si ce sont les pouvoirs publics qui

31 L'Environmental Protection Agency est l'agence qui définit aux Etats-Unis la consommation théorique des véhicules.

32 Quantité extraite selon l'USGS (voir <http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/lithium/mcs-2008-lithi.pdf>)

33 Ce nombre est à comparer à la production mondiale annuelle qui se situe autour de 60 millions de véhicules pour 2009, en baisse par rapport à 2008 (voir <http://oica.net/category/production-statistics/>).

financent le réseau, se pose alors le problème de justice sociale de se lancer dans des investissements onéreux qui profiteront largement à la frange la plus aisée de la population et dont le bénéfice environnemental n'est pas forcément à la hauteur de l'investissement. Nous reviendrons sur ce problème plus loin. Il ne sera en tout cas pas tenable économiquement de continuer à proposer ce service gratuitement, comme c'est le cas dans le cadre de projets pilotes comme à Londres et à Paris. Si au contraire des compagnies électriques ou des opérateurs privés financent le réseau de bornes, il s'agira de veiller à ce que les systèmes soient compatibles entre eux pour éviter leur prolifération. Mais alors le coût du réseau de bornes fera augmenter le prix payé au kWh ce qui rendra les VE moins attractifs économiquement. La borne nécessitera dans tous les cas un système d'identification de l'utilisateur, certainement s'il est prévu de lui faire payer la recharge.

Ensuite il faut que les constructeurs de bornes et de VE se mettent d'accord sur un standard pour que tous les véhicules puissent être rechargés sur les bornes. Actuellement, il existe certaines villes équipées de bornes, mais celles de Paris par exemple ont un embout spécifique qui n'est pas compatible avec les modèles actuels de VE. La standardisation concerne à la fois le connecteur et la puissance de chargement qui doit être compatible avec la batterie du VE. Précisons aussi qu'il existe plusieurs types de bornes permettant, pour les plus puissantes, de recharger une batterie de VE en une demi-heure grâce à un ampérage nettement supérieur à ce qu'on trouve dans les habitations. Cependant ce type de recharge rapide a tendance à dégrader légèrement la batterie.³⁴

Il conviendra aussi d'intégrer ces bornes harmonieusement dans l'espace public. On a déjà évoqué la grande gourmandise de l'automobile, véritable dévoreuse d'espace public, surtout dans les villes. La question se posera donc de savoir s'il faut réserver des emplacements aux VE pour leur permettre d'accéder aux bornes de recharge. Les parkings constituent bien sûr un endroit idéal même si certains ont des idées plus originales comme les anciennes cabines téléphoniques rendues quasiment caduques par le succès des téléphones portables.³⁵ Un autre problème est celui du vandalisme : les temps de recharge pouvant être longs, un système doit s'assurer que personne ne peut retirer la prise ou endommager le véhicule.

En conclusion on peut dire qu'il existe encore énormément d'incertitudes au sujet des bornes de recharges. Certains se posent même la question de leur utilité : des études ont montré que les utilisateurs actuels de VE n'en faisaient que rarement usage.³⁶ La rentabilité de la mise en place de ces bornes est donc sans doute sujette à caution, même si les utilisateurs des flottes de test de VE ne sont sans doute pas représentatifs de la population entière. Les critères pour les sélectionner comprennent généralement la possession d'un garage, ce qui n'est pas le cas de la majorité de la population, certainement dans les villes. Beaucoup de questions restent donc ouvertes.

II.1.3.2. Solutions technologiques

Une solution technologique, qui pour certains observateurs est la solution idéale pour la transition vers les VE, est la voiture électrique hybride rechargeable (VEHR). Il s'agit en fait d'essayer de tirer parti dès maintenant des avantages de la VE tout en compensant les limitations en termes de rayon d'action dues à la batterie, par l'ajout d'un moteur thermique. Celui-ci peut avoir trois usages : remplacer le moteur électrique lorsque la batterie est épuisée, fonctionner de concert avec le moteur électrique pour plus d'efficacité ou recharger la batterie lorsque celle-ci ne contient plus d'énergie. Le véhicule est alors une masse plus importante et est donc moins efficace énergétiquement. Par ailleurs, la cohabitation des deux systèmes a

34 Même si les données manquent encore pour étudier ce phénomène, trop peu de VE étant en circulation, les experts sont généralement assez rassurants et ne pensent pas que cette dégradation soit trop importante.

35 Il existe au moins deux projets de ce type, en Autriche et en Espagne. Voir par exemple http://www.just-auto.com/news/plan-to-turn-phone-boxes-into-ev-charging-stations_id104270.aspx?lk=dm

36 Voir <http://gas2.org/2010/03/08/public-electric-car-charging-stations-may-go-largely-unused/>

aussi un impact sur le bilan environnemental et le prix. Les analystes pensent cependant pour la plupart que c'est d'abord ce type de véhicule, pouvant se mouvoir à la fois grâce aux carburants traditionnels et à l'électricité, qui sera adopté par les automobilistes [Kendall, 2008].

Les constructeurs de VE ont bien sûr conscience du problème et essayent grâce à l'électronique embarquée de rassurer les conducteurs. On trouve ainsi sur la Nissan Leaf récemment commercialisée un système de positionnement par satellite (GPS) qui indique l'emplacement des bornes de recharge disponibles dans l'environnement immédiat du véhicule. Par ailleurs, en fonction de l'énergie restante dans la batterie et du type de mode de conduite sélectionné par le conducteur, le rayon d'action résiduel est indiqué numériquement ainsi que graphiquement sur la carte du GPS.³⁷

Une autre solution technologique est la mise en place d'un système assez ambitieux d'échange de batteries dans des stations spécialement prévues à cet effet. La société Better Place³⁸ a mis au point un système de ce type en partenariat avec de grands constructeurs automobiles, dont Renault et Nissan qui fournissent les premières voitures compatibles avec ce système. Lorsque la batterie du véhicule est près d'être déchargée, le conducteur se rend dans une station d'échange où un bras mécanisé remplace la batterie par une autre préalablement chargée. A l'heure actuelle un test est réalisé à Tokyo où trois taxis fonctionnent avec ce système.³⁹

L'idée n'est en fait pas nouvelle. *The Economist* rapporte l'histoire d'une compagnie de bus électriques dans les années 1900 à Londres. Celle-ci faisait également appel au système d'échange de batteries pour compenser le rayon d'action limité à 60 km que lui permettait de parcourir les batteries au plomb de l'époque. Malgré un certain succès, l'entreprise fit faillite mais pas en raison de problèmes techniques : le système était au point, populaire auprès de ses utilisateurs, et il ne fallait que trois minutes pour remplacer les batteries.⁴⁰

II.1.3.3. Solutions Comportementales

Comme nous le verrons plus loin, la VE est l'occasion de repenser la mobilité. De nos jours les automobilistes choisissent généralement d'acheter un véhicule en fonction de l'utilisation maximale qu'ils en feront. Pourtant cette utilisation maximale ne se produit réellement que de rares fois, ce qui fait qu'on voit dans les embouteillages des files de voitures spacieuses et sous-occupées avec seulement leur conducteur. De même, une étude du département des transports américain révélait qu'en 2007 la distance parcourue par voiture et par jour était de 52,3 km [Kendall, 2008 : 100]. En Europe, les distances sont très nettement inférieures avec des moyennes de déplacements quotidiens en automobile de 26 km [Eurostat, 2009]. Les batteries des VE actuelles sur le marché permettant de parcourir théoriquement 160 km, la part des déplacements qui dépassent cette limite n'est en fait que de quelques pourcents.

II.1.4. Bilan environnemental et recyclage des batteries au lithium

Il est assez curieux de voir que dans l'ensemble de la littérature sur le sujet des VE, l'accent est souvent mis sur la question du lithium au détriment des autres matières présentes dans les batteries. Une étude réalisée par le Laboratoire Fédéral suisse de la Science et Technologie des Matériaux traite spécifiquement de la question de l'impact environnemental total de la batterie [Notter, 2010]. Mais cette étude élude en partie la question en faisant le choix d'analyser une batterie au lithium où le nickel et le cobalt sont remplacés par le manganèse (plus abondant et meilleur marché) alors que ce choix technologique est spéculatif et ne reflète

37 Voir <http://green.autoblog.com/2010/07/22/chelsea-sexton-nissan-leaf-uses-information-as-gateway-drug/>

38 Voir Chapitre III.4, pour une présentation de la société : <http://www.betterplace.com/>

39 Voir <http://www.betterplace.com/the-company-pressroom-pressreleases-detail/index/id/better-place-extends-tokyo-trial-for-additional-three-months>

40 Il s'agit en fait plutôt d'un problème de fraude financière. Voir *The Economist* : http://www.economist.com/node/9719105?story_id=9719105

pas la majorité des batteries actuelles même si certains constructeurs automobiles ont décidé d'y avoir recours. Il est donc très difficile de connaître l'impact environnemental d'une forte augmentation de la quantité de batteries à produire dans le cas d'une vaste électrification des automobiles. Les auteurs qui se posent la question de l'extraction des matériaux utiles à la construction de la batterie se concentrent sur le lithium (en reconnaissant parfois cette limite) et c'est ce que nous commencerons par faire.

Le lithium est un élément chimique qui n'est pas présent à l'état pur dans la croûte terrestre. On ne le trouve en concentration importante que dans très peu d'endroits sur Terre. Pour cette raison son extraction n'est économiquement rentable que sous la forme soit de chlorure de lithium (LiCl) et de carbonate de lithium (Li₂CO₃) et qu'on trouve principalement dans les déserts de sel d'Amérique latine qui sont en fait d'anciens lacs préhistoriques évaporés. Soit lorsqu'il est sous la forme minérale de silicate, à savoir le spodumène (LiAlSi₂O₆) ou la pétalite (LiAlSi₄O₁₀). On le trouve également dans l'eau de mer, dont la grande quantité sur Terre a pu faire dire à certains que son approvisionnement ne serait jamais problématique. Cependant la concentration dans l'eau de mer est si faible et la quantité d'énergie pour l'extraire si importante que cette solution semble aujourd'hui peu crédible, même si des projets de recherche sont toujours en cours.⁴¹ La source la plus probable de lithium dans le cas d'une forte demande due à l'industrie automobile est une zone assez circonscrite couvrant trois pays (Bolivie, Chili et Argentine) et regroupant les déserts de sels (*salar*) d'Uyuni, d'Atacama et d'Hombre Muerto. Cette zone contient d'après Tahil environ 80% des réserves de lithium à haut degré de pureté dont l'industrie automobile a besoin pour fabriquer des batteries.

Mais l'exploitation de ces réserves n'est pas sans poser des questions sur l'impact environnemental, puisque la moitié environ de la *reserve base* se trouverait dans une zone abritant un écosystème unique au monde. Le *salar de Uyuni* en Bolivie est une des plus vastes étendues planes du monde (le dénivelé n'est que d'environ 1 m sur sa surface totale de plus de 10.000 km²), et est considérée comme le paysage terrestre le plus brillant visible depuis l'espace. C'est un lieu de reproduction des flamants roses et un écosystème riche et unique caractérise en outre la partie du désert la plus riche en lithium. Ce lieu où les eaux de la rivière adjacente créent un lagon permanent est le refuge de nombreuses espèces d'oiseaux que l'exploitation mettrait certainement en péril. Le tourisme s'est d'ailleurs développé dans cette région pourtant très peu peuplée et quasiment dépourvue d'infrastructure d'accueil [Tahil, 2008].

D'autres auteurs estiment quant à eux que l'impact de cette exploitation est réduit [Evans, 2008] et qu'il est donc nécessaire de mener des études complémentaires pour clarifier cette question. Notons que deux auteurs en particulier, Tahil et Evans, se livrent à une guerre, par articles interposés, sur les réserves et l'impact environnemental de l'extraction du lithium. Tahil met en garde sur les réserves limitées, d'autant qu'une partie seulement est susceptible de fournir l'industrie automobile, et sur le possible aveuglement à vouloir tout miser sur le lithium. Outre les conséquences environnementales, il craint que ce pari ne conduise à se débarrasser de la dépendance au pétrole pour s'enchaîner à une autre dépendance, tout aussi limitée dans le temps et tout aussi circonscrite à un petit nombre de pays. Evans soutient la thèse inverse. Il a fait toute sa carrière de géologue (toujours en cours) dans l'extraction du lithium et ne considère pas les réserves comme étant limitées, et avec lui la majeure partie de la littérature sur le sujet, notamment parce qu'il considère l'ensemble des sources de lithium (y compris le spodumène et la pétalite) comme aptes à couvrir les besoins de l'industrie automobile. Par ailleurs il considère les menaces sur l'écosystème grandement exagérées [Evans, 2008a]. Son passé professionnel n'en fait pas un analyste impartial et on peut dès lors mettre en doute ses assertions, même s'il peut se targuer d'une connaissance approfondie du sujet.

En ce qui concerne l'ensemble de l'impact environnemental des batteries au lithium-ion, revenons à l'étude du

41 D'après le Financial Times, le Japon a ainsi abandonné un projet qui s'est étendu sur 30 ans en arrivant à la conclusion que l'extraction à partir d'eau de mer était 5 fois plus coûteuse que les méthodes traditionnelles. Pour autant la Corée du Sud continue les recherches en la matière. Voir http://search.ft.com/search?queryText=seawater+lithium&ftsearchType=type_news

laboratoire suisse [Notter, 2010]. Celle-ci consiste en une analyse cycle de vie (ACV) selon 4 méthodes de calcul⁴² d'une VE, en la comparant à une VT de même catégorie. Lors de cette étude, l'accent est mis tout particulièrement sur la batterie qui est l'élément qui pose actuellement le plus question quant aux impacts sur l'environnement. Pour le VE, l'équipe suisse a retenu une consommation de 0,17 kWh par km (en prenant soin d'inclure les consommations hors moteur) et pour la production d'électricité a utilisé le mix énergétique européen type de l'UCTE.⁴³ L'étude conclut que seuls 7 à 15% des impacts (selon qu'on retienne la méthode *Cumulative Energy Demand* ou *l'ecoindicator 99 H/A*) de la VE sont dus à la batterie, et que de ce pourcentage seuls 2,3 % sont dus au lithium contenu dans celle-ci. Les aspects générant le plus d'impact sont la fabrication de l'anode et de la cathode, et tout ce qui entoure les éléments chimiques (système de gestion de la batterie, câbles, boîtier en acier pour protéger ces éléments, etc.). Par ailleurs les pollutions atmosphériques ayant essentiellement des effets locaux, on peut considérer que la pollution d'une VT en ville risque d'avoir un impact sur la santé d'un plus grand nombre d'habitants que la fabrication de batteries et la génération d'électricité qui a lieu généralement dans des zones moins densément peuplées. Pour autant il ne faudrait pas tomber dans le piège de solutionner le problème des villes polluées en ne faisant que déplacer la pollution ailleurs, dans des zones souvent habitées par des populations socialement défavorisées ou dans des pays en développement. Nous reviendrons sur ces questions.

Une autre étude se penche sur les impacts environnementaux des batteries pour voitures, en comparant différentes technologies entre elles, également par le biais d'une ACV [Matheys, 2008]. Ses conclusions portent principalement sur une série de recommandations concernant la méthodologie à suivre pour faire une ACV de batterie de véhicule. Cependant, la comparaison entre différents types de batteries indique que celles au lithium-ion (Li-ion) et les batteries sodium chlorure de nickel (NaNiCl) ont moins d'impacts environnementaux que les trois autres envisagées (à savoir plomb, nickel-cadmium et nickel-hydrure métallique). Le score *Eco-Indicator 99 points* étant au moins 40 % plus bas pour les batteries Li-ion et NaNiCl que pour la moyenne des trois autres types de batteries. Elle prévoit même que les batteries au lithium ont un potentiel de diminution d'impact important avec la mise en place d'une filière de recyclage.

Comme nous l'avons vu, une des différences majeures entre une VE et une VT est la présence d'une batterie de grande capacité. Celle-ci représente un surcoût important à l'achat et devra sans doute être remplacée une fois sur la durée de vie du véhicule. D'après les résultats préliminaires d'une récente étude de l'Université d'état de l'Ohio,⁴⁴ c'est en fait l'âge de la batterie qui est le principal facteur de dégradation. Plus que les cycles de chargement ou les conditions d'utilisation, les chercheurs ont remarqué que les batteries les plus anciennes perdaient de leur capacité en raison d'une diminution de la concentration de la cathode en lithium dû à la combinaison irréversible d'une partie du lithium avec les composants de l'anode.

Il est cependant utile de préciser que la batterie ne devient pas subitement inutilisable et garde au contraire une certaine capacité à stocker de l'énergie, même après des années d'utilisation. Les deux constructeurs automobiles majeurs qui proposent déjà des VE à la vente, Nissan et General Motors (GM), offrent tous deux une garantie de 8 ans ou 160.000 km⁴⁵ sur la batterie,⁴⁶ ce qui montre une certaine confiance en sa capacité à durer. Des projets de recherche pour étudier les possibilités de seconde vie des batteries automobiles sont par ailleurs en cours. GM s'est ainsi par exemple associé à ABB pour tester la possibilité d'utiliser les batteries

42 Chacune mettant l'accent sur un des aspects suivants : potentiel de réchauffement climatique (*GWP*), demande cumulée en énergie non renouvelable (*CED*), l'écoindicateur 99 H/A (voir : <http://www.pre.nl/eco-indicator99/default.htm>) et potentiel de destruction des ressources abiotiques (*ADP*).

43 Voir <http://www.ucte.org/>

44 Voir http://www.mecheng.osu.edu/nlbb/files/nlbb/Battery_aging_09.pdf

45 Pour plus de facilité nous convertissons les miles en km en arrondissant à 1 mile = 1,6 km

46 Il n'a par contre bizarrement pas encore été annoncé quel pourcentage de sa capacité la batterie doit avoir perdue pour pouvoir être remplacée au frais du constructeur, ce qui est pourtant un élément essentiel de la garantie. On trouve généralement des chiffres de 20 % à 40 % de diminution de capacité à stocker l'énergie pour la batterie après 7 ans ou 160.000 km.

dans le cadre des réseaux électriques intelligents (*smart grids* voir plus loin) pour stocker l'électricité produite de façon intermittente par les sources d'énergie renouvelables (éolien et solaire).⁴⁷ Il convient de rappeler que ces sources non constantes sont parfois difficiles à intégrer dans la consommation d'électricité et présentent donc le risque d'être gaspillées, notamment l'éolien durant la nuit. D'autres projets sont également à l'étude pour les batteries déclassées pour l'automobile mais conservant une certaine capacité à stocker l'énergie. Les engins de manutention utilisés dans les hangars où des moteurs électriques sans émission sont indispensables, sont par exemple une piste prometteuse pour cette application. La question se pose cependant de savoir à quel point les besoins sont susceptibles d'absorber toute l'offre prévue en cas d'adoption massive de VE. Il y a d'ailleurs une grande incertitude quant à la valeur d'une VE après la période de garantie de la batterie, du fait du coût important qu'entraîne son remplacement. C'est donc également un domaine où des études sont en cours pour pouvoir envisager des utilisations de la batterie. La société anglaise de conseils CAP, qui s'est penchée sur la question, avoue ignorer totalement à l'heure actuelle comment attribuer une valeur monétaire à un VE d'occasion.⁴⁸

Lorsque la batterie sera complètement inutilisable, il sera alors possible de la recycler. Le recyclage nécessitera d'abord que les batteries vivent en circuit fermé, c'est-à-dire qu'elles soient récupérées dans un lieu *ad hoc* lorsqu'elles sont remplacées ou que le véhicule est en fin de vie. Ensuite il faut une expertise technique pour procéder au recyclage et il se trouve que de nombreuses entreprises se sont lancées dans l'aventure. Enfin il faudra, en l'absence de réglementation ou d'incitants, que les conditions économiques soient réunies pour qu'une industrie viable se mette en place. Voyons ce qu'il en est à l'heure actuelle.

Pour ce qui est de la collecte des batteries, elle se réalise déjà pour les batteries au plomb des VT qui sont très largement collectées dans les pays industrialisés. Dans les pays de l'Union européenne, la réglementation de la directive 2006/66/EC⁴⁹ prévoit des taux de collecte pour les batteries de tous types devant atteindre 45 % pour 2016. Pourtant, la filière de recyclage des voitures étant déjà largement en place dans les pays de l'OCDE, on s'attend à ce que ce pourcentage soit largement dépassé pour les batteries automobiles [BERR, 2008]. Il ne devrait pas être extrêmement difficile de récupérer les batteries remplacées qui devront l'être, à cause de leur poids et de leur emplacement dans le véhicule, par des techniciens formés pour cette activité. En ce qui concerne les VE en fin de vie, si elles suivent la filière normale de recyclage, leurs batteries seront collectées.

On ne peut pas dire par contre que le recyclage des batteries au lithium soit une activité largement pratiquée. Malgré l'annonce de la construction de quelques sites (y compris en Europe), la récupération des métaux contenus dans les batteries au lithium n'est pas encore une réalité aujourd'hui. Pourtant, des procédés industriels sont prêts à être déployés. Citons par exemple une recherche du *Japan Battery Recycle Centre* qui prévoit de récupérer environ 60 % du lithium contenu dans une batterie. Il est cependant utile de noter que le lithium en question ne sera pas utilisable pour la fabrication de batteries [cité par Zimmer, 2009 : 29]. Par ailleurs la société belge Umicore a développé un procédé permettant de récupérer 70 % des matériaux présents dans les batteries Li-Ion et 60 % dans les batteries NiMH. Le reste des composants étant l'électrolyte qui est évaporée après filtration des composés organiques volatils [Van Damme, 2009]. Ce qui a fait obstacle jusqu'ici est à fois la faible concentration des métaux économiquement rentables à récupérer dans des batteries de petite taille et le prix du lithium [BERR, 2008].

Les conditions économiques ne sont pas encore véritablement réunies pour que les batteries soient recyclées et il faudra donc sans doute dans un premier temps compter sur l'intervention des pouvoirs publics pour

47 Voir <http://www.abb.com/cawp/seitp202/d3e2f486303c1d47c12577a500479955.aspx>

48 Voir

<http://www.cap.co.uk/PressCentre/CAPNews/2010News/tabid/357/articleType/ArticleView/articleId/169/Default.aspx>

49 Voir <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2006:266:0001:0014:fr:PDF>

soutenir l'activité. Car même si certains métaux comme le cobalt et le nickel rendent le recyclage des batteries économiquement attractif, le prix du lithium reste quant à lui encore trop bas pour justifier les investissements. On arrive donc à une situation paradoxale : pour que les VE soient largement adoptées il faut que le prix des batteries baisse puisqu'elles représentent environ la moitié du prix d'achat et le seul surcoût d'une VE. Pour que le prix des batteries baisse, il faut que le prix du lithium n'augmente pas trop, même si il ne représente pas une part très importante du prix de la batterie.⁵⁰ Mais pour que le lithium soit recyclé il faut que son prix augmente, pour justifier économiquement le coût de son recyclage.

II.1.5. Conclusion

La technologie de batterie faisant usage du lithium semble la plus prometteuse à court et moyen terme pour une utilisation à des fins de stockage d'énergie à bord de VE. Pourtant, la question de savoir quel pourcentage du parc automobile actuel (et plus encore d'un parc futur en constante augmentation) pourrait être électrifié avec des batteries de ce type est sujet à controverse, eu égard à la difficulté de connaître les réserves disponibles de lithium qui semble être le facteur limitant pour ce type de batteries. Le type de batterie au lithium qui sera adopté reste aussi incertain d'autant que des questions de sécurité et de fiabilité restent en suspens. Les batteries actuelles imposant une autonomie réduite au VE par rapport à une VT, différentes solutions s'offrent aux constructeurs pour réduire ce désavantage. Des solutions techniques : installation de bornes de recharges, hybridation (adjonction d'un moteur thermique qui fonctionne de concert avec le moteur électrique, le remplace pour la traction ou recharge la batterie une fois que celle-ci est déchargée), système d'information destiné à rassurer le conducteur, système d'échange rapide de batteries. Mais aussi des solutions comportementales, passant par une redéfinition de nos besoins en mobilité et de la façon dont celle-ci prend forme, comme nous le verrons dans la suite de ce travail.

La question du bilan environnemental des batteries au lithium reste aussi ouverte. Comme l'extraction est à l'heure actuelle encore relativement limitée, l'impact sur les écosystèmes (notamment les déserts de sel de Bolivie) reste méconnu. En ce qui concerne l'ensemble des impacts, des ACV ont été réalisées et elles semblent indiquer que la batterie n'aggrave pas significativement le bilan de la VE. Ensuite le recyclage est techniquement au point mais non encore pratiqué à grande échelle pour des raisons de quantité de batteries obsolètes et de prix des matériaux récupérés. Il faut d'ailleurs rappeler que les batteries, même après leur utilisation pour un usage automobile, pourraient connaître une seconde vie dans d'autres applications, comme le stockage d'électricité produite à base de sources d'énergie renouvelables même si d'autres solutions semblent plus appropriées comme nous le verrons au chapitre suivant.

50 Au cours actuel qui est environ de 6000 \$ la tonne, le lithium ne représenterait que 216 \$ pour une batterie de 24 kWh, en se basant sur les estimations hautes de 1,5 kg de carbonate de lithium par kWh [Tahil, 2008]. Or on peut estimer que le prix de batteries de cette capacité se situe autour de 18.000 \$ d'après le constructeur Nissan. Voir <http://online.wsj.com/article/SB10001424052748704635204575242382820806878.html>

II.2. Énergie et émissions

Nous nous sommes penchés sur la question de la batterie qui, en l'état actuel des connaissances, ne semble être responsable que d'une part peu importante des impacts environnementaux dans le bilan total d'une VE. Il est donc temps de se poser la question de la consommation d'énergie lors de la phase d'utilisation des VE. C'est la question cruciale à laquelle il faut tenter de répondre pour savoir si la VE peut être en partie une meilleure solution que la VT. En effet, c'est lors de la phase d'utilisation que l'essentiel de l'énergie sera consommée et aussi que l'essentiel des GES et des polluants seront émis. Nous allons donc tenter de savoir, pour chacun des deux types d'automobiles, quelle quantité d'énergie est consommée par unité d'énergie utile (c'est à dire réellement utilisée pour faire tourner les roues) et à quelle quantité de GES et éventuellement de polluants cela correspond. Cet exercice n'est pas sans soulever des questions méthodologiques, qui expliquent d'une part la grande difficulté de cette tâche de quantification et de comparaison, et d'autre part la variété des résultats obtenus par les différents auteurs, selon les hypothèses qu'ils auront prises.

II.2.1. Questions méthodologiques

Les automobiles en vente sur les trois grands marchés « historiques » que sont les États-Unis, l'Europe et le Japon, doivent se soumettre, entre autres tests, à une évaluation de leur consommation et de leurs émissions. Dans un souci légitime de reproductibilité des tests et de comparabilité des résultats, ces tests ont toujours lieu dans des conditions semblables. Ils se déroulent en intérieur, sur des bancs à rouleaux et comportent une série d'accélération, de décélération, de temps à l'arrêt et à vitesse constante suivant un ordre précis. On établit ensuite la quantité de carburant utilisée tandis qu'une sonde au niveau de l'échappement calcule les émissions de CO₂ et d'autres polluants. Ces tests sont réalisés à température définie, après avoir « chauffé » le moteur et avec tous les équipements auxiliaires éteints même si certains commencent à évoluer pour refléter plus fidèlement la réalité de la consommation.⁵¹ En Europe, depuis 2000, c'est le *New European Driving Cycle* d'une durée de 20 minutes et qui est censé refléter la consommation moyenne en ville et sur route des véhicules vendus sur le marché européen.

Ces tests théoriques ne sont en fait que peu représentatifs de la réalité : la consommation réelle d'une voiture est généralement très supérieure à celle annoncée. En dehors de considérations environnementales, énergétiques et économiques, cet écart a aussi des conséquences pratiques. Pour une VT, consommer plus ne sera en pratique qu'un désagrément qui obligera l'utilisateur à aller plus souvent faire le plein. Pour une VE cet optimisme est potentiellement plus ennuyeux, puisque cela va affecter l'autonomie déjà considérée comme limitée des véhicules. Cette situation est aggravée par le fait que la batterie peut stocker généralement entre 20 et 30 kWh d'électricité suivant les modèles, alors qu'un réservoir d'hydrocarbures pourra contenir entre 400 et 600 kWh d'énergie thermique⁵² soit environ 20 fois plus. Une quantité fixe de kWh de consommation excédentaire non pris en compte aura donc un impact beaucoup plus important pour une VE que pour une VT. Cette procédure de test est de plus mal adaptée aux VE qui risquent à notre avis de présenter des consommations réelles encore plus éloignées des résultats des tests. Ceci est dû notamment au fonctionnement du système de chauffage de l'habitacle, aux caractéristiques de la batterie et au fonctionnement du moteur électrique.

Le système de chauffage, l'air conditionné ainsi que les autres équipements auxiliaires d'une VE tirent leur énergie directement de la batterie qui sert aussi à fournir l'énergie au moteur. Dans une VT par contre, le système de chauffage utilise l'énergie thermique « gratuite » du moteur.⁵³ Ce dernier dégage de la chaleur

51 Le nouveau test d'application aux États-Unis depuis 2008 prévoit une portion du test réalisée avec le système d'air conditionné allumé.

52 En considérant des réservoirs de 40 à 60 litres et 10 kWh par litre de carburant.

53 L'utilisation de l'air conditionné engendre lui dans une VT une surconsommation de carburant de l'ordre de 2,5 à

lors du processus de combustion, chaleur qui n'est pas utile pour la traction de la voiture mais qui est récupérée pour chauffer l'habitacle. La VE qui n'a pas ce problème de perte d'énergie par dégagement de chaleur ne peut pas non plus en profiter et le chauffage de l'habitacle consomme donc de l'énergie provenant de la batterie qui réduit du même coup l'autonomie du véhicule.⁵⁴ Il est cependant possible de diminuer quelque peu ce problème en préchauffant son véhicule en hiver lorsqu'il est branché sur le courant électrique. Son propriétaire peut programmer l'heure à laquelle il souhaite l'utiliser et demander au système de chauffage de préchauffer l'habitacle du véhicule en utilisant l'électricité du réseau électrique, pour éviter de décharger fortement la batterie au début de son trajet. Si l'utilisation des phares, du système audio et de l'électronique du véhicule n'est pas très gourmande en énergie et demande entre 0,6 kW et 1 kW, on estime qu'un système de climatisation peut nécessiter environ 2,5 kW voire jusqu'à 4 kW pour des utilisations à pleine puissance [Syrota, 2008 : 66].

La réaction de la batterie à des variations thermiques n'est pas davantage prise en compte dans les tests actuels. Sa capacité à stocker et à restituer de l'énergie peut être plus ou moins affectée par des températures extrêmes, c'est-à-dire très élevées ou très basses. Comme nous l'avons vu, il existe différents types de batteries et chacune a une plage de température idéale de fonctionnement en dehors de laquelle ses performances sont plus ou moins dégradées. La première génération d'EV1 de General Motors, fonctionnant avec des batteries au plomb, était peu à l'aise à faible température, ce qui a rendu l'utilisation de ce véhicule problématique en hiver.⁵⁵ Des recherches sont bien évidemment en cours dans ce domaine pour limiter ce problème, mais il est important de noter que les tests actuels ne tiennent pas compte de cette problématique. Or il y a un effet d'addition, puisque lors de températures extérieures extrêmes, à la dégradation des performances des batteries s'ajoute la consommation des systèmes auxiliaires les plus énergivores, à savoir le système de chauffage en hiver ou d'air conditionné en été.

Un autre problème de la batterie non pris en compte par les tests est celui de l'auto-décharge. Un réservoir de VT stocke le carburant de façon étanche et après une semaine ou un mois sans l'utiliser, la VT contiendra toujours la même quantité de carburant. Ceci n'est pas le cas avec les batteries des VE qui perdent peu à peu l'énergie qu'elles stockent, dans des proportions différentes en fonction des technologies. La littérature scientifique rencontrée se penche sur la question, mais surtout dans le cadre de tests de laboratoire et souvent au niveau de la cellule [Prakash 2009]. On trouve par contre des études plus générales qui estiment l'auto-décharge entre 5% et 15% de diminution de la charge énergétique de la batterie dans le cadre d'une utilisation normale. En ce qui concerne les batteries au Lithium, il semble que l'auto-décharge soit de l'ordre de 10% par mois [ADEME, 2005].

Le fonctionnement du moteur électrique est également différent du moteur à combustion interne. Contrairement à ce dernier, un moteur électrique ne doit pas tourner au ralenti lorsque le moteur est allumé mais que la voiture est à l'arrêt. Il n'y a dès lors pas de consommation d'énergie dans une VE qui est à l'arrêt dans la circulation.⁵⁶ Par ailleurs, les moteurs électriques qui équipent les VE disposent d'un système de récupération d'énergie au freinage et lors de décélérations. Ce système permet de récupérer une partie de l'énergie qui dans une VT serait dissipée en chaleur et perdue. Ce frein par le moteur permet en outre de limiter l'usure du système de freinage mécanique « traditionnel » qui n'est dès lors sollicité que pour des

7,5% [GIEC, 2007b : 331].

54 Le constructeur automobile Volvo a contourné ce problème en équipant son prototype de VE d'un système de chauffage d'environ 6kW pouvant fonctionner avec différents types de combustibles (essence, bioéthanol, etc) pour éviter de puiser dans l'énergie contenue dans la batterie. Voir <http://green.autoblog.com/2010/01/21/volvo-c30-electric-vehicle-uses-ethanol-for-heat/>

55 William Borthwick (de la DG Energie et Transport de la CE) rapporte lors d'une conférence que les EV1 de General Motors en test à New-York avaient une autonomie de seulement 20 km au plus froid de l'hiver contre 120 à 160 km en conditions optimales d'utilisation.

56 Il en sera de même pour les VT équipées du système « stop & start » dont le moteur est automatiquement coupé lorsque le véhicule est à l'arrêt.

freinages d'urgence, et d'augmenter la durée de vie des éléments constitutifs du système de freinage. Notons que ces deux éléments (pas de consommation à l'arrêt et récupération d'énergie au freinage) participent à la plus grande efficacité de la VE par rapport à la VT en milieu urbain où les arrêts et fortes décélérations sont plus fréquents (en raison des feux de circulation, passages pour piétons, carrefours, embouteillages, etc.) qu'en milieu périurbain ou sur autoroute.

A propos du type de route, il est important de signaler que les VE sont plus adaptées que les VT à la vitesse réduite et au milieu urbain, comme nous le verrons plus loin. Ceci est dû notamment au fonctionnement du moteur électrique qui est très efficace sur une plage de régime plus large que le moteur thermique [Kendall, 2008].

Une fois les tests réalisés, les résultats sont exprimés, en Europe, en litres de carburant permettant de parcourir 100 km (pour le cycle urbain, le cycle périurbain et la moyenne des deux) pour la consommation ainsi qu'en g de CO₂ par km pour les émissions directes.⁵⁷ Aux Etats-Unis, le résultat est exprimé en *miles per gallon* de carburant (MPG). Une fiche reprenant diverses informations de consommation est rédigée par l'*Environmental Protection Agency* (EPA) et renseigne également les émissions de GES et de polluants. A partir de la consommation, un montant moyen de coût annuel en carburant est aussi indiqué et la différence (positive ou négative) par rapport à la moyenne des véhicules comparables, disponibles sur le marché. Mais ces mesures ne sont pas adaptées aux VE d'abord parce que celles-ci n'utilisant pas de carburant, il n'est pas possible de définir un nombre de litres pour faire 100 km ou un nombre de miles qu'on peut parcourir avec un gallon. Ensuite parce que au contraire d'une quantité de carburant issu du pétrole, qui lors de sa combustion dégage une quantité définie de gaz,⁵⁸ le moteur électrique n'émet directement aucun gaz. Il faut donc se pencher sur la production d'électricité mais celle-ci émet des quantités très variables en fonction de la source énergétique utilisée, du rendement de l'installation et du périmètre qu'on prend en compte. Pour pouvoir comparer les VT et les VE avec un minimum de rigueur scientifique, il faudra donc considérer un périmètre le plus large possible, afin qu'il soit le plus proche possible de la réalité, comme nous le verrons plus loin.

Le marché américain, sur lequel une VE et une voiture électrique hybride rechargeable (VEHR) viennent d'être lancées, a été confronté à ce problème de labélisation de consommation énergétique et d'émissions. La solution trouvée par l'EPA a été de simplifier la réalité et de donner des informations considérées comme utiles au consommateur en fonction du type de motorisation.

Pour la VE (en l'occurrence la Nissan Leaf), l'EPA a tenté de trouver une équivalence entre la consommation d'électricité et la consommation de carburant d'origine pétrolière qui s'exprime traditionnellement en MPG. Considérant qu'un gallon d'essence contient 33,7 kWh, il a été calculé la distance que la VE considérée peut parcourir avec cette quantité d'électricité. La VE étant, comme nous le verrons, plus efficace que la VT, elle obtient donc des scores de consommation plus favorables que les VT.⁵⁹ Le score des VE ne dit donc pas grand-chose en soi, sinon qu'il rappelle que les VE sont plus efficaces et qu'il permet une comparaison facile quoique peu utile avec les VT. En plus de la consommation, la fiche indique deux informations importantes pour les VE : l'autonomie moyenne ainsi que le temps de recharge sur une prise à 240 V.⁶⁰ Pour finir, notons que l'information donnée par l'EPA tombe dans la facilité concernant son évaluation environnementale de la VE, en annonçant des rejets directs de 0 g de CO₂ par *mile* et un score de 10/10 pour

57 Le périmètre pris en compte ne concerne donc que les émissions directes, c.-à-d. ce qui sort du pot d'échappement et non les émissions de l'ensemble de la filière.

58 Celle-ci pourra différer légèrement en fonction de l'efficacité du moteur.

59 La Nissan Leaf est ainsi considérée comme ayant une consommation de 99 MPGe (*miles per gallon équivalent*) à comparer avec la Toyota Prius qui est la voiture la plus sobre du marché et qui obtient 50 MPG. La moyenne du parc automobile aux Etats-Unis était de 23 MPG en 2008. Voir http://www.eia.doe.gov/emeu/aer/pdf/perspectives_2009.pdf

60 Notons que l'ampérage n'est pas précisé.

les rejets de polluants atmosphériques. Des résultats corrects *stricto sensu* mais masquant la réalité en ne tenant compte que des rejets directs.

Pour ce véhicule, un test a été également réalisé qui montre bien à quel point les conditions extérieures peuvent faire varier considérablement l'autonomie d'une VE. Avec une même quantité d'énergie il est possible de réaliser entre 222 et 76 km en fonction du type de circulation rencontrée, de la vitesse et des conséquences des conditions climatiques (influençant à la fois le fonctionnement de la batterie et surtout pénalisant l'autonomie dans le cas d'une utilisation intensive de la climatisation), comme le montre le tableau ci-dessous.

Tableau 1: Autonomie de la Nissan Leaf dans différentes conditions d'utilisation

Conditions de conduite	Vitesse moyenne	Température	Climatisation	Autonomie
Vitesse constante	61 km/h	20° C	non	222 km
Trafic urbain	39 km/h	25° C	non	169 km
Autoroute	89 km/h	35° C	air conditionné	110 km
Trafic urbain avec ralentissements	24 km/h	-10° C	chauffage	100 km
Trafic urbain avec forts ralentissements	10 km/h	30° C	air conditionné	76 km

(source : Forbes⁶¹ et Autobloggreen⁶²)

Pour la VEHR (en l'occurrence la Chevrolet Volt), l'EPA a décidé de renseigner une consommation en utilisation purement électrique, une en utilisation avec le moteur thermique continuellement en fonctionnement et une sur un parcours mixte (comprenant une partie en mode électrique et une partie avec le moteur thermique). Par ailleurs le rayon d'action moyen à la fois en mode électrique seul et avec le moteur thermique est également renseigné, en plus des consommations électriques moyennes en fonction d'une série de distances parcourues.

II.2.2. Solutions proposées pour répondre à ces questions méthodologiques

Pour éviter de devoir torturer les chiffres pour rendre la comparaison possible entre les différents types de motorisation, une solution plus élégante serait de trouver une unité commune. C'est ce que propose Kendall qui suggère de passer du litre ou du gallon de carburant au kWh [Kendall, 2008]. On calculerait donc, pour un véhicule donné et peu importe sa motorisation, le nombre de km parcourus par kWh ou le nombre de kWh nécessaires par km (ou pour 100 km afin de garder une parenté avec les mesures actuelles). Cette idée semble bonne puisqu'elle fait ressortir l'aspect de consommation énergétique mais fait perdre la dimension environnementale d'émission de CO₂ chère au législateur européen.

On pourrait, pour pallier ce problème, ajouter une indication de grammes de CO₂ par km parcouru pour chaque VE, mais cette quantité dépendra alors fortement de l'hypothèse de production d'électricité retenue pour faire le calcul. En effet, on peut prendre différentes approches sans qu'aucune ne soit forcément meilleure que les autres. On peut considérer les émissions de production d'électricité selon des périmètres différents, soit :

- au niveau d'un (sous-)continent : en partant du principe que les véhicules seront introduits sur des marchés et que les marchés en question sont souvent (sous-)continentaux (l'Amérique, l'Europe, l'Inde, etc.) ;

61 Voir <http://blogs.forbes.com/energysource/2010/06/11/warning-your-mileage-may-vary/>

62 Voir <http://green.autoblog.com/2010/06/14/nissan-pegs-leaf-range-between-47-and-138-miles-individual-resu/>

- au niveau d'un groupe de pays limitrophes : en partant du principe que les marchés de l'électricité sont interconnectés par groupes de pays. En cas d'une forte augmentation de la demande en Belgique par exemple, le réseau belge étant très interconnecté avec ses voisins français et néerlandais, il pourra éventuellement se voir injecter de l'électricité en provenance de ces pays [CREG, 2010 : 11];
- au niveau d'un pays : en partant du principe que la majorité de l'électricité consommée dans un pays est produite par ce pays ;
- sur la base de la production de nuit d'un pays ou d'une zone plus large : en posant l'hypothèse que les VE seront principalement rechargées la nuit quand l'électricité est moins chère ;
- sur la base de la production supplémentaire : en partant du principe que s'il faut produire de l'électricité en plus pour le transport automobile de façon relativement inattendue pour le réseau qui a une certaine inertie, c'est ce type de production qu'il faut prendre en compte et non ce qui est déjà produit pour les autres usages. Or la difficulté réside dans le fait que le type de production supplémentaire varie au long de la journée ;
- sur la base du type de production d'un fournisseur d'électricité précis : puisque le marché de l'électricité en Europe est ouvert à la concurrence, les fournisseurs d'électricité d'un même pays ou région ont des mix énergétiques⁶³ différents pour la production d'électricité.

Comme on le voit les hypothèses sont très nombreuses d'autant que certaines reprises dans cette liste sont combinables.

Certains périmètres poseront cependant des problèmes de pertinence. On pense notamment au problème que soulèvent des décisions politiques à grande échelle qui doivent s'appliquer sur de plus petits territoires présentant des réalités très disparates. L'exemple du périmètre européen, pourtant très utilisé pour la prise de décisions, est à cet égard un cas d'école. La moyenne d'émission de CO₂ de la production d'électricité européenne qui se situe à 359 gCO₂ par kWh⁶⁴ cache en fait des disparités gigantesques : on trouve, au sommet du classement dégressif des émetteurs, la Grèce avec 736 gCO₂ par kWh et à la fin de ce classement l'Islande et la Norvège avec respectivement 1 et 7 gCO₂ par kWh. Cette situation rendra donc les calculs peu pertinents si on se place au niveau d'un pays particulier en préconisant une politique basée sur des calculs faits avec la moyenne européenne.

Il faudra en tous cas veiller à prendre en compte, sur le modèle des ACV, un ensemble plus large d'activités ayant permis de faire fonctionner le véhicule. La terminologie utilisée pour spécifier le périmètre pris en compte sera alors le puits, le réservoir et la roue. Ces expressions ayant été inventées dans le contexte de l'hégémonie des VT, les termes « puits » et « réservoir » doivent être compris comme des fonctions plus que comme des objets. Pour les VE il faut donc comprendre « source d'énergie utilisée pour la transformation en électricité » à la place de puits et « batterie » à la place de réservoir. On distinguera alors généralement deux temps qui, pris ensemble, permettent d'avoir une vision globale de l'utilisation de l'énergie ou des émissions de GES :

- du puits au réservoir (*Well-to-tank ou WTT*) : on prend en compte la prospection, l'extraction, la transformation et le transport du carburant jusqu'à son arrivée dans le réservoir du véhicule ;
- du réservoir à la roue (*Tank-to-wheel ou TTW*) : on prend en compte l'utilisation du carburant par le moteur;
- du puits à la roue (*Well-to-wheel ou WTW*) : on multiplie (pour des rendements énergétiques) ou on

63 Le mix énergétique désigne la proportion des différentes sources d'énergie permettant la production d'énergie finale pour une zone considérée.

64 C'est la quantité calculée sur la période 2006-2008. On peut supposer qu'en raison de la crise économique mondiale, l'IEA, pour ne pas fausser les chiffres de 2008 montrant une diminution des émissions de par la contraction de la demande en électricité, a choisi de publier, en plus des chiffres de 2008, une moyenne de 2006 à 2008 donnant une vue moins tronquée de la tendance [IEA, 2010a : 107].

additionne (pour des émissions) les deux premiers, ce qui offre la vue la plus complète.

II.2.3. Efficience comparée voiture électrique et voiture thermique

Maintenant que nous avons fait le tour des difficultés inhérentes au calcul de l'efficience énergétique et des émissions des VE, préalable essentiel à toute comparaison avec une VT, penchons-nous d'abord sur les résultats obtenus par quelques auteurs qui se sont essayés à calculer l'efficience. Nous reprenons les résultats pour l'efficience du réservoir à la roue dans le tableau ci-dessous :

Tableau 2 : Efficience énergétique du réservoir à la roue pour les voitures électriques

Source	Transmission	Moteur	Électronique	Batterie	Total (du réservoir à la roue)
Syrota, 2008	80%			-	65%
IEW, 2010	100%	90%	90%	70%	57%
EABEV, 2009		90-95%	96-98%	75-85,5%	72% ⁶⁵
Kendall, 2008	-	-	-	-	65%
IEA, 2005	-	89%	-	83%	74%

Pour ce qui est des VT, l'efficience est en comparaison bien moins grande en raison de plusieurs facteurs. D'abord, il se fait que le moteur thermique, plus encore que le moteur électrique, atteint son efficience maximum lorsqu'il est proche de son régime maximum. Or le régime maximum n'est que rarement atteint, surtout en circulation urbaine. Ceci explique que la consommation extra-urbaine est supérieure à la consommation urbaine pour les VT [Kendall, 2008]. Ensuite le moteur à combustion interne perd une grande quantité d'énergie dissipée en chaleur dans le moteur lui-même. Enfin, parce lorsque le moteur est utilisé en conditions réelles dans le trafic, les arrêts aux feux et dans les embouteillages se font avec le moteur qui continue à tourner. Les calculs d'efficience de différents auteurs donnent les résultats suivants :

Tableau 3 : Efficience énergétique du réservoir à la roue pour les voitures thermiques

Source	Transmission	Moteur	Véhicule à l'arrêt	Total (du réservoir à la roue)
Syrota, 2008	-	-	-	25%
IEW, 2010	95%	25%	-	24%
EABEV, 2009				18% (ess.) 22% (diesel)
Kendall, 2008	95%	23% (ess.) 30% (diesel)	5-10% de pertes	18% (ess.) 23% (diesel)
IEA, 2005	95%	20%	-	19%

Comme nous l'avons vu, pour prendre en compte de façon plus adéquate les VE, il faut également se pencher sur ce qui se passe du puits au réservoir, afin de pouvoir calculer une vue d'ensemble du puits à la roue.

Tableau 4 : Efficience énergétique du puits au réservoir pour les voitures électriques

⁶⁵ En moyenne, pour une batterie au Lithium et ne serait que de 60% pour une batterie au plomb. En calculant sur la base du détail des chiffres fournis on arrive à un résultat de 64,8-79,6%.

Source	Extraction	Transformation	Transport	Total (du puits au réservoir)
Syrota, 2008				
IEW, 2010	35%		90%	31,5%
EABEV, 2009	40%		92%	37%
Kendall, 2008	35% (charbon) 42% (gaz)		92%	32% (charbon) / 38,6% (gaz)
IEA, 2005	50%		92%	46%

En ce qui concerne les VT, faisons de même et voyons l'efficacité du puits au réservoir :

Tableau 5 : Efficacité énergétique du puits au réservoir pour les voitures thermiques

Source	Extraction	Transformation	Transport	Total (du puits au réservoir)
Syrota, 2008				
IEW, 2010	87%			87%
EABEV, 2009				83%
Kendall, 2008				83%
IEA, 2005	90%		98%	88,2%

On voit donc que pour une vue d'ensemble, du puits à la roue, les situations sont très contrastées. Les VE sont très efficaces du réservoir à la roue mais très peu du puits au réservoir et pour les VT c'est exactement le contraire.

Tableau 6 : Efficacité énergétique du puits à la roue pour les VE et les VT

Source	Voitures électrique			Voiture thermique		
	Puits au réservoir	Réservoir à la roue	Puits à la roue	Puits au réservoir	Réservoir à la roue	Puits à la roue
Syrota, 2008		65%			25%	
IEW, 2010	31,5%	57%	17,9%	87%	24%	20,9%
EABEV, 2009	37%	72%	27%	83%	18% (ess.) 22% (diesel)	15% (ess.) 18% (diesel)
Kendall, 2008	32% (charb.) 38,6% (gaz)	65%	20,8% (charb.) 25,1% (gaz)	83%	18% (ess.) 23% (diesel)	15% (ess.) 19,1% (diesel)
IEA, 2005	46%	74%	34%	88,2%	19%	16,8%

On remarque une grande disparité dans les chiffres avancés par les différents auteurs, surtout en ce qui concerne les VE. Ceci peut s'expliquer à notre avis par différentes raisons. D'abord par le manque de

connaissances pratiques sur le sujet des VE. Malgré les tests en cours et la présence de quelques véhicules sur les routes, aucun constructeur n'a mis sur le marché un grand nombre de VE permettant de faire des moyennes précises pour des véhicules « grand public ». Ensuite par les évolutions technologiques qui ont lieu de façon plus spectaculaire dans le domaine des VE que des VT de par leur nouveauté et les investissements massifs réalisés sous l'impulsion des constructeurs et plus récemment des pouvoirs publics. On peut par exemple estimer que l'utilisation de batteries au lithium a permis une augmentation de 10% de l'efficacité du réservoir à la roue [EABEV, 2009 et Weiss, 2000]. Enfin aussi sans doute par l'orientation idéologique ou la source de financement de certains auteurs. On voit par exemple les chiffres retenus par Inter-Environnement Wallonie (IEW) plutôt prudents sur l'efficacité des VE. Or cette prudence est revendiquée dans le texte même de l'étude qui fait référence à la désillusion des agrocarburants. Ces derniers, porteurs de grands espoirs auprès des défenseurs de l'environnement, se sont révélés d'après un grand nombre d'études pire que le mal qu'ils prétendaient combattre. Dès lors, « *de nombreuses ONG d'environnement veulent avoir tout apaisement à ce sujet [les effets pervers des batteries] avant de se positionner sur la question* » [IEW, 2010:10]. En ce qui concerne les VT, IEW calcule une efficacité plus optimiste que les autres auteurs, non pas pour faire la promotion des moteurs à hydrocarbures mais sans doute également dans le souci de ne pas comparer les VE avec des véhicules plus inefficaces qu'ils ne le sont. Un autre auteur, pourtant également publié par une organisation qui se définit comme de « défense de l'environnement » (le WWF), se montre plus enthousiaste pour la VE. Kendall montre que la VE peut avoir un effet très bénéfique pour les émissions de CO₂, surtout lorsque l'électricité est produite par une voie qui en rejette peu. Cela pousse à se poser la question de savoir si Kendall n'est pas influencé d'une façon ou d'une autre et s'il n'a pas un a priori en faveur de la VE, même s'il est difficile de répondre à cette question.

On ajoutera aussi bien sûr les difficultés méthodologiques que nous avons évoquées plus haut. Celles-ci peuvent sans doute expliquer les chiffres très optimistes d'efficacité du puits à la roue avancés pour le VE par l'étude de l'IEA. On peut supposer que toutes les sources de pertes d'efficacité n'ont pas été considérées, surtout qu'à l'époque de cette étude les batteries au lithium qui auraient pu expliquer une efficacité si haute n'équipaient pas encore les VE.

II.2.4. Émissions de GES

Comme nous l'avons vu précédemment, c'est lors de la phase d'utilisation qu'un véhicule émet le plus de GES et les VE ne changent pas fondamentalement la donne. Pour rappel, l'ADEME considère que les émissions de GES d'une voiture se répartissent entre 85% lors de la phase d'utilisation et 15% pour le reste du cycle de vie [ADEME, 2007 : 60-63]. D'autres auteurs estiment que la répartition est de 80% pour l'utilisation et 20% pour la construction [Ecolane, 2006]. En ce qui concerne les VE, ils sont réputés ajouter environ 7 à 15% d'impacts environnementaux à la phase de construction, ceux-ci étant dus à la fabrication de la batterie [Notter, 2010]. On comprend donc que mis à part l'entretien du véhicule, ce sera quasiment exclusivement la production d'électricité qui sera responsable, lors de l'utilisation d'une VE, des émissions de GES. En partant de ce constat, la grande question à laquelle il faut répondre pour pouvoir comparer la VE et la VT est de connaître les émissions de la production d'électricité.

Or cette production d'électricité n'émet pas une quantité fixe de CO₂, ce qui oblige les auteurs qui fournissent des estimations à poser des hypothèses et à fournir, pour certains d'entre eux, des résultats multiples. Le tableau ci-dessous offre une vue d'ensemble des résultats de quelques-unes de ces estimations, qui sont des ACV dont les résultats très différents s'expliquent principalement par le type de production d'électricité retenu par les auteurs pour leurs hypothèses.

Tableau 7 : Émissions de GES des VE et des VT selon différentes hypothèses

Source	Périmètre	Hypothèse(s) sur le mix énergétique pour l'électricité	Émissions des VT	Émissions des VE	Différence
IEW, 2010	Europe	Émissions de 465 gCO ₂ /kWh	1310 gCO ₂ /kWh	910 gCO ₂ /kWh	400 gCO ₂ /kWh (-31%)
Kendall, 2008	Europe (moyenne)	Émissions de 370 gCO ₂ /kWh	1460 gCO ₂ /kWh*	619 gCO ₂ /kWh	841 gCO ₂ /kWh (-58%)
	Europe (Grèce)	Émissions de 781 gCO ₂ /kWh	1460 gCO ₂ /kWh*	1306 gCO ₂ /kWh	154 gCO ₂ /kWh (-11%)
	Europe (Autriche)	Émissions de 221 gCO ₂ /kWh	1460 gCO ₂ /kWh*	370 gCO ₂ /kWh	1090 gCO ₂ /kWh (-75%)
	Etats-Unis (moyenne)	Émissions de 620 gCO ₂ /kWh	1460 gCO ₂ /kWh*	1037 gCO ₂ /kWh	423 gCO ₂ /kWh (-29%)
	Etats-Unis (Indiana)	Émissions de 937 gCO ₂ /kWh	1460 gCO ₂ /kWh*	1567 gCO ₂ /kWh	107 gCO ₂ /kWh (+7%)
	Etats-Unis (California)	Émissions de 273 gCO ₂ /kWh	1460 gCO ₂ /kWh*	457 gCO ₂ /kWh	1003 gCO ₂ /kWh (-69%)
Boxwell, 2010	Royaume-Uni	Electricité de nuit : émission de 330 gCO ₂ /kWh	164,46 gCO ₂ /km (Toyota Aygo)	49,66 gCO ₂ /km (Mitsubishi i-MiEV)	114,8 gCO ₂ /km (-70%)
	Etats-Unis	Electricité à base de charbon : émission de 990 gCO ₂ /kWh	164,46 gCO ₂ /km (Toyota Aygo)	139,98 gCO ₂ /km (Mitsubishi i-MiEV)	24,48 gCO ₂ /km (-15%)
Van Mierlo, 2010	Belgique	Emissions moyennes du pays	221 gCO ₂ /km (essence, euro 5)	51 gCO ₂ /km	170 gCO ₂ /km (-77%)
	Belgique	Emissions moyennes du pays	181 gCO ₂ /km (diesel, euro 5)	51 gCO ₂ /km	130 gCO ₂ /km (-72%)
EABEV, 2009	Europe en 2006 (moyenne)	Émissions de 443 gCO ₂ /kWh (et batterie au plomb)	1435 gCO ₂ /kWh**	738 gCO ₂ /kWh	697 gCO ₂ /kWh (-49%)
	Europe en 2006 (moyenne)	Émissions de 443 gCO ₂ /kWh (et batterie au lithium)	1435 gCO ₂ /kWh**	616 gCO ₂ /kWh	819 gCO ₂ /kWh (-57%)
	Belgique en 2003	Émissions de 290 gCO ₂ /kWh (et batterie au lithium)	1435 gCO ₂ /kWh**	403 gCO ₂ /kWh	1032 gCO ₂ /kWh (-72%)
Boureima, 2009	Belgique en 2009	Emissions moyennes du pays	-	-	-78%
Ecolane, 2006	Royaume-Uni	Emissions moyennes du pays	-	-	-43%
Ecolane, 2006	Royaume-	Electricité à partir	-	-	Au moins -80%

Source	Périmètre	Hypothèse(s) sur le mix énergétique pour l'électricité	Émissions des VT	Émissions des VE	Différence
	Uni	d'énergies renouvelables			

* = moyenne des émissions que Kendall rapporte pour les voitures à essence (1619 gCO₂/kWh) et au diesel (1300 gCO₂/kWh). Notons que cette moyenne, même si elle ne modifie pas fondamentalement la tendance observée, gomme des différences régionales qu'il faudrait sans doute prendre en compte. En Europe (et surtout en Belgique) les voitures au diesel sont nettement plus répandues [Eurostat, 2009] qu'aux Etats-Unis où leur nombre est plus confidentiel, autour de 4% [Sperling, 2009], ce qui conduit pour ce pays à une légère sous-évaluation des émissions en prenant la moyenne comme nous l'avons fait.

** = moyenne des émissions que l'EABEV rapporte pour les voitures à essence (1490 gCO₂/kWh) et au diesel (1380 gCO₂/kWh). Les remarques ci-dessus sont également d'application.

Si l'on compare les résultats d'IEW et de Kendall sur les émissions de CO₂, on voit que par rapport aux calculs d'efficience réalisés, les différences sont encore plus prononcées. Par rapport à la moyenne de tous les auteurs, IEW a retenu une efficience basse pour la VE et haute pour la VT et par ailleurs des émissions de CO₂ hautes pour la génération d'électricité et basses pour les moteurs des VT. On arrive donc par rapport à l'écart d'efficience, qui n'était que faible pour ces deux auteurs, à des résultats beaucoup plus différents en ce qui concerne l'écart des émissions de CO₂ entre la VE et la VT. On peut à vrai dire s'étonner des émissions de 465 grammes de CO₂ par kWh retenues par IEW tant elles semblent éloignées de ce qu'on trouve dans d'autres sources publiées la même année. L'IEA par exemple les situe pour l'Europe à 343 grammes de CO₂ par kWh pour la moyenne des années 2006-2008 [IEA 2010a : 107].

Les résultats de l'étude d'Ecolane montrent, par rapport aux autres études, un avantage moindre pour les VE, en termes de réduction de CO₂. Ces résultats s'expliquent en fait par l'impact environnemental important retenu dans cette étude pour la fabrication des batteries. De l'aveu même des auteurs, l'avantage des VE est relativement plus modeste qu'escompté, précisément à cause de la fabrication de batteries [Ecolane, 2006]. A l'époque, celles-ci étaient majoritairement des batteries au plomb et d'après les auteurs, si la phase d'utilisation des VE permet de diminuer très substantiellement les émissions, celles-ci sont importantes lors de la fabrication de la batterie. Il convient de rappeler qu'aujourd'hui plus aucun projet de VE, venant des acteurs importants de l'industrie automobile et même de plus petits fabricants, n'utilise cette technologie qui a été supplantée par les batteries au lithium.

Les chiffres présentés par Boxwell doivent être pris avec la plus grande prudence puisque, de son propre aveu, il n'a pas fait preuve d'une méthodologie scientifique pour les récolter. Il a au contraire réalisé un parcours qu'il décrit brièvement et qu'il a réalisé pendant l'hiver 2010. Par ailleurs, les voitures comparées, si elles sont de même taille, ne sont pas de masses semblables puisque la VE pèse environ 200 kg de plus que la VT (Toyota Aygo). On peut supposer que cette différence est due à la présence des batteries.⁶⁶ De plus, la VT est une des voitures les plus sobres de sa catégorie puisque selon le cycle européen elle n'émet directement que 106 gCO₂ par km. Pour autant, il nous semble intéressant de les présenter parce qu'ils s'appuient sur des tests grandeur nature et non de calculs réalisés en laboratoire, faits sur des voitures grand public et non des prototypes. Or les VE n'étant arrivées que récemment sur le marché, surtout celles avec des batteries au lithium et produites à grande échelle, ce type d'information est très peu fréquent.

66 Une estimation situe l'énergie par unité de masse des batteries de la Mitsubishi i-MiEV précisément à 80 Wh/kg. Voir <http://www.greencarcongress.com/2008/05/the-battery-pac.html>

II.2.5. Émission de polluants atmosphériques

Avec l'attention toute particulière que la société accorde au CO₂, suite aux discours du GIEC et à la prise de conscience du problème du réchauffement climatique, certaines études font l'impasse d'une analyse des émissions de polluants ou lui accordent une moins grande importance. Pourtant il serait très préjudiciable que l'aveuglement à ne vouloir résoudre que le problème du changement climatique conduise à une augmentation substantielle de ces polluants. C'est d'ailleurs ce qui a pu être observé récemment avec la politique de réduction fiscale à l'achat de voiture, basée uniquement sur les émissions de CO₂ et qui a favorisé la mise sur le marché d'un grand nombre de petites voitures au diesel bon marché. Or celles-ci ne sont pour la plupart pas équipées de filtre à particules ce qui les rendait donc, en termes de pollution atmosphérique, bien plus polluantes que les voitures à essence. Voyons ce qu'il en est pour les VE.

Il est aussi important de souligner d'entrée que la grande différence entre les GES et les polluants atmosphériques est que si les premiers ont des conséquences globales, à savoir le changement du climat de la planète, les seconds agissent plus localement. Dès lors dans le cas de VE qui n'émet pas directement, la population potentiellement affectée par la pollution est limitée. En effet, la partie de l'électricité à base de combustibles fossiles est générée dans des centrales généralement implantées loin des zones densément peuplées. Ceci permet par exemple de limiter les effets de certaines émissions qui seraient divisées par quatre dans le cas des PM_{2,5} et du CO quand elles ont lieu dans des zones rurales plutôt que dans des villes [IEA, 2007 : 229]. Pour autant on perçoit directement l'injustice sociale qui consisterait à permettre aux citoyens, décomplexés par l'exportation hors des villes des émissions de leurs voitures, de continuer à utiliser de grandes quantités d'énergie pour leurs déplacements en ville, alors que les effets en termes de pollution de l'air sont malgré tout subis autour des sites de génération de l'électricité. Certes une partie moins importante de la population serait touchée, ce qui constitue un progrès et donc une voie intéressante à suivre, mais il ne faudrait pas pour autant croire que tout impact sur la santé a disparu.

L'étude réalisée par le Laboratoire Fédéral Suisse de Science et Technologie des Matériaux [Notter, 2010] conclut que la VT fait augmenter entre 23,5% et 61,6% les impacts environnementaux totaux, selon les méthodes de calcul. Pour ce qui est des émissions de polluants atmosphériques, les VE émettent plus que les VT : l'augmentation est de 21% pour les PM₁₀, de 12,1% pour les oxydes d'azote (NO_x) et de 25,3% pour l'oxyde de soufre (SO₂). Le tableau général est donc contrasté puisque si les VE réduisent les émissions de GES, elles provoquent, d'après cette étude, une augmentation de la pollution atmosphérique. Il est cependant important de souligner que ces impacts de polluants sont dus à la génération de l'électricité pour leur plus grande partie. Or l'étude prend un mix énergétique européen moyen non précisé, si ce n'est qu'il contient plus de 50% d'énergie fossile. Ce n'est donc pas d'abord la VE en tant que telle qui est la source principale de cette pollution mais la génération d'électricité, et une diminution du recours à l'énergie fossile serait donc directement bénéfique en termes de réduction de polluants atmosphériques.

L'étude réalisée en Grande-Bretagne par le Département des Transports ne dit pas autre chose en mettant en garde contre une possible hausse des niveaux de NO_x et de SO_x, pouvant occasionner des conséquences négatives en termes d'acidification de l'air. Pour autant, les prévisions faites par les auteurs montrent que dès 2020 et plus encore en 2030, en considérant un recours plus large aux sources d'énergie renouvelables et au nucléaire pour la production d'électricité, le bilan des VE en termes d'acidification de l'air serait comparable à celui de VT [BERR, 2008 : 18].

En ce qui concerne spécifiquement le cas de la Belgique, étudié depuis longtemps par une équipe de chercheurs de la VUB sous la houlette de Joeri Van Mierlo, la situation serait différente. Une étude récente montre que l'acidification de l'air résultant de l'ensemble du cycle de vie d'une VE serait environ trois fois moindre que pour une VT. En ce qui concerne l'impact sur la santé humaine,⁶⁷ celui d'une VE serait quatre

67 Ce paramètre a été évalué dans le cadre de cette étude selon la méthode Impact 2002+ développée par l'Université

fois moins important comparé à une VT [Boureima, 2009]. La singularité de la situation belge tient sans doute dans son mix énergétique de production d'électricité moins polluant que la moyenne européenne. Un basculement vers la VE permettrait donc une diminution des rejets de polluants. Pourtant cette règle ne pourrait pas s'appliquer à tous les pays : une analyse prenant en compte l'ensemble des impacts pour la santé humaine montre que si l'électricité des VE est produite par des centrales au charbon ou au pétrole, l'impact est environ deux fois plus important que dans le cas d'une VT [Van Mierlo, 2010].

Une autre étude, réalisée par l'ACEEE (American Council for Energy-Efficient Economy), est à peine plus optimiste sur le potentiel de réduction de polluants atmosphériques. On peut y lire que les VE font diminuer les rejets de NO_x par rapport au VT, en moyenne de 23%. Par contre, les émissions de SO_x sont augmentées lors de l'utilisation de VE de 157% en moyenne sur le territoire des Etats-Unis. Il existe cependant de grandes variations en fonction des états : dans les états du centre-est où l'électricité est fortement générée à partir de charbon, l'augmentation est de 354%. Au contraire, en Californie où le mix énergétique de l'électricité est nettement moins carboné, les rejets de SO_x seraient diminués de 29%. C'est donc la nature du mix énergétique ainsi que le type de normes auxquelles répondent les installations de génération d'électricité qui va conditionner lourdement les rejets de SO_x. Plus encore que ces distinctions, l'étude conclut que l'adoption à grande échelle de VE aurait des bénéfices en termes de santé pour les populations, mais que c'est principalement grâce au déplacement des émissions vers les zones rurales [ACEEE, 2006].

Il y a en fait un second avantage direct pour la qualité de l'air à voir les pots d'échappement supprimés, même si c'est pour être remplacés par les cheminées de centrales : le moment de la journée auquel les polluants sont émis dans l'atmosphère. Si les batteries des VE sont rechargées la nuit, l'électricité est produite alors également la nuit. Or la formation d'ozone troposphérique due aux rejets de centrales électriques est nettement moins importante la nuit. La raison en est l'absence de lumière du soleil qui durant la journée favorise la formation d'ozone de basse altitude [Zimmer, 2009 : 127]. Pour autant, il semble y avoir un certain consensus chez les auteurs qui estiment, en dehors du cas particulier de la Belgique, que dans le contexte de production d'électricité actuel des pays étudiés (moyenne européenne, États-Unis et Royaume-Uni), en termes de pollution atmosphérique, on assisterait plutôt à une aggravation des émissions avec l'adoption de VE. Malgré tout, le déplacement de cette pollution, vers des zones moins densément peuplées, ferait plus que compenser son augmentation et le résultat final serait bénéfique pour la santé publique.

Rappelons aussi que d'une part, comme le montre les émissions de certains pays,⁶⁸ l'adoption massive de production d'électricité à partir de sources d'énergie renouvelables peut largement améliorer la situation alors qu'il n'y a pas pour les VT de perspectives d'amélioration dans des proportions équivalentes. D'autre part, il est indéniablement plus facile de s'occuper d'une centrale que des centaines de millions de pots d'échappement : l'émission stationnaire est plus aisée à contrôler et à rendre moins polluante que les émissions mobiles [Kendall, 2008 : 89]. Si une centrale est optimisée ou fermée pour être remplacée par une autre moins polluante, les effets sont immédiats pour toute la flotte de VE rechargée par celle-ci. Pour obtenir le même résultat, il faut remplacer chacune des VT, ce qui prend environ une quinzaine d'années, vu l'inertie du parc automobile.

II.2.6. Perspectives d'amélioration

Avec la prise de conscience, même au sein de l'industrie automobile, de l'émergence de nouvelles contraintes environnementales et énergétiques, des solutions, pour certaines ignorées pendant des décennies, commencent à apparaître dans le discours et les actes des constructeurs. Il existe en fait selon certains auteurs un très grand potentiel de réduction des besoins énergétiques des automobiles. Pour rappel, l'efficacité a fait

du Michigan. Voir : <http://www.sph.umich.edu/riskcenter/jolliet/impact2002+.htm>
68 Pour une liste quasiment exhaustive voir [IEA, 2010a].

d'énormes progrès ces trente dernières années, permettant de consommer autant voire légèrement moins, avec des voitures toujours plus puissantes et toujours plus lourdes. Mais dans le même temps les distances ont augmenté et avec elles les émissions. Or comme le montre le rapport Syrota, s'il existe un lien direct, qu'on peut comprendre intuitivement, entre masse et consommation qui augmentent de concert, il en va de même pour la puissance. Plus un véhicule est puissant, c'est-à-dire plus grande est sa capacité d'accélération et sa vitesse de pointe, et plus sa consommation sera importante, comme le montre l'analyse de différentes motorisations équipant le même véhicule [Syrota, 2008]. Pourquoi dès lors ne pas détourner les gains d'efficacité réalisés, engloutis par l'amélioration des performances pour les rediriger vers plus de sobriété ? C'est la solution qui commence à être adoptée et qu'on appelle *downsizing* c'est à dire que les moteurs sont de plus petite cylindrée et donc moins puissants et moins consommateurs de carburant. Cette technique à elle seule permettrait de diminuer de 10 à 25% la consommation des VT [Syrota, 2008 : 64]. Or cela n'aurait en réalité que peu de conséquences pratiques sur la véritable valeur d'usage des voitures puisque d'une part la vitesse est limitée dans quasiment tous les pays et souvent très substantiellement en dessous de la capacité maximum des véhicules et que d'autre part les capacités d'accélération ne sont jamais vraiment utilisées (ou ne devraient pas l'être) en tous cas en ville, de par leur dangerosité.

Le seul frein ici est celui du diktat des constructeurs, brillamment relayé par la presse spécialisée qui ne manque pas de tailler en pièces tout ce qui ne répond pas au « plaisir de conduite ». Une limitation de puissance des véhicules serait difficile à faire appliquer, les constructeurs brandissant le prétexte de la liberté d'action des individus et leur soi-disant appétit (en fait largement construit par la publicité et la mythologie qui existe autour de la voiture) pour des automobiles plus rapides et plus puissantes. Il serait cependant à notre avis salutaire que la société se regarde en face et se pose les bonnes questions, à l'heure où son comportement peut avoir des conséquences irréversibles, y compris pour elle-même.

En plus de cette diminution de la puissance, d'autres améliorations technologiques au niveau du moteur peuvent avoir un impact bénéfique sur la consommation de VT. La commande électronique des soupapes, le taux de compression variable ou la réduction des frottements internes permettraient, appliqués de concert, de diminuer la consommation des nouveaux véhicules de 20 à 40%, et ce à peine en une décennie [Syrota, 2008 : 64].

En dehors du moteur, une série d'améliorations sont également possibles pour diminuer encore la consommation des automobiles, quel que soit leur type de motorisation, au nombre desquelles on peut citer :

- l'aérodynamisme : la résistance à l'air jouant un rôle crucial dans le besoin en énergie permettant le déplacement, le coefficient de pénétration dans l'air est un paramètre important de la consommation des véhicules ;
- le contact roue-sol : les pneus à faible résistance au roulement et un système de vérification permanente de la pression des pneus ;
- la consommation des équipements auxiliaires : les systèmes d'air conditionné qui peuvent augmenter sensiblement la consommation ;
- diminution de la masse : l'utilisation de nouveaux matériaux plus légers pour diminuer la masse à déplacer.

Au niveau des comportements de conduite et de la gestion du trafic, une grande marge de progression existe apparemment aussi pour réduire la consommation des automobiles, regroupées sous le concept d'éco-conduite [Van Mierlo, 2004]. Il s'agit à la fois de comportements, c'est-à-dire apprendre à utiliser de façon rationnelle son véhicule (accélérations douces, anticipation des arrêts, vitesse constante, etc.) et de dispositifs techniques d'aide à la conduite. Le but est de réaliser des déplacements en consommant moins d'énergie, ces améliorations pouvant s'avérer efficaces, surtout en ville. L'éco-conduite pourrait permettre, selon certains auteurs, de réduire la consommation d'énergie de 5 à 20% en donnant à l'automobiliste des informations pertinentes sur le tableau de bord. Se basant sur des données issues à la fois du moteur et d'un système de

navigation intégrant le trafic environnant, ces informations permettraient à l'automobiliste de modifier sa façon de conduire vers plus de sobriété [Syrota, 2008 : 119].

En ce qui concerne les dispositifs techniques, un projet européen, *eCoMove*,⁶⁹ regroupant constructeurs, équipementiers, compagnies de télécommunication et universités tente de trouver des solutions pour rendre la conduite plus efficace. Les pistes envisagées sont principalement des systèmes d'intelligence embarquée permettant aux véhicules de communiquer entre eux (*vehicule to vehicule* ou *V2V*) et avec l'infrastructure (*vehicule to infrastructure* ou *V2I*) c'est à dire des systèmes d'information. Le but étant de fluidifier le trafic, de proposer des routes alternatives dans le cas d'embouteillages, de régler les feux de signalisation en fonction de la densité du trafic, etc. Une étude de ces propositions, faite par des membres de l'Université de Twente, indique que le potentiel de réduction existe. Ces conclusions montrent une possible diminution de 20% de la consommation des véhicules lourds en leur donnant la priorité aux feux de signalisation, une diminution de 5% des émissions de CO₂ et de NO_x pour les véhicules tenus au courant de l'état des feux de signalisation (tout en augmentant les rejets de PM₁₀ de 2,6%), une diminution du temps d'attente et des arrêts de 16 à 47% en fonction du pourcentage de véhicules équipés du système de *V2I* [Vreeswijk, 2010].

Un autre projet européen baptisé SARTRE⁷⁰ (pour *Safe Road Trains for the Environment*) propose de façon assez radicale de former des trains de voitures lorsque celles-ci circulent sur des routes rapides. Un véhicule de tête, de préférence ayant des dimensions imposantes, est chargé de vaincre la résistance à l'air pour les véhicules qui le suivent à courte distance et roulant tous à vitesse constante, dans le but de leur faire profiter du gain aérodynamique. Le système prévoit alors que les conducteurs des « véhicules-wagons » se laissent conduire et peuvent porter leur attention sur autre chose que la route et prédit une diminution des émissions de CO₂ de l'ordre de 20%.

Ces systèmes techniques sont cependant encore largement au stade d'études et au-delà de leur faisabilité pratique à grande échelle, le coût des infrastructures à mettre en place pourrait être un sérieux frein à leur déploiement. On peut par ailleurs sérieusement se poser la question de savoir si ces deux études proposent vraiment des solutions. Fluidifier le trafic automobile, ce qui le rend plus attrayant, amène inexorablement à son augmentation. Ceci serait dès lors contre-productif dans la perspective d'une volonté de diminution des émissions du secteur des transports, diminution qui passe forcément aussi par une diminution des flux. L'amélioration de la façon de conduire des conducteurs ne présente au contraire pas ce risque et mériterait plus d'efforts pour la diffuser largement.

Pour ce qui est spécifique à la VE, les gains possibles sont de deux ordres : au niveau de l'efficacité du système de traction et de la diminution des émissions dues à la génération d'électricité. Il est indéniable que l'ensemble de la chaîne de traction électrique (moteur électrique, batterie, transmission, système de contrôle) utilisé plutôt confidentiellement dans le contexte automobile ces dernières années, présente des possibilités d'amélioration, même si son efficacité est déjà assez grande. Il semble, sans surprise, que ce soit au niveau de la batterie que les progrès les plus importants puissent être faits [Kendall, 2008 : 82] puisque c'est l'élément ayant la plus faible efficacité. Pourtant c'est surtout grâce aux efforts réalisés au niveau de la production d'électricité que les VE pourront améliorer leur bilan environnemental.

Au niveau précisément des émissions de CO₂ dues à la génération d'électricité, si on se penche sur les efforts consentis par les pays européens (membres de l'OCDE) durant les vingt dernières années environ (de 1990 à 2008), une diminution substantielle est observée. Les émissions sont en effet passées de 435 à 335 gCO₂/kWh, soit une diminution de 23%. Au niveau mondial par contre, la tendance est à une légère augmentation : sur les quinze dernières années environ (1995 à 2008) les émissions sont passées de 470 à 502 gCO₂/kWh, soit une augmentation de 7% [IEA 2010a : 107].

69 Voir <http://www.ecomove-project.eu/>

70 Voir <http://www.sartre-project.eu/en/Sidor/default.aspx>

Comparés à ce qui se passe ailleurs dans le monde, les objectifs européens sont assez ambitieux et pourtant considérés comme réalistes par les observateurs du secteur.⁷¹ Le paquet climat-énergie, une série de mesures destinées à lutter contre le changement climatique et à augmenter la sécurité énergétique, fut lancé en 2008 par l'Union européenne. Les objectifs furent formalisés dans la directive 2009/28/CE et sont souvent appelés *objectifs 20-20-20*, chiffres indiquant l'ambition d'atteindre en Europe, à l'horizon 2020 :

- une diminution des émissions de GES de 20% par rapport au niveau de 1990 ;
- de porter à 20% la part d'énergie finale provenant de sources d'énergie renouvelables dans la consommation ;
- de réduire de 20% la consommation d'énergie primaire par rapport à ce qui était projeté comme consommation en 2020 au moment du lancement de ce plan d'action.

On peut donc s'attendre à une diminution, quoique dans des proportions encore incertaines, des rejets en GES dus à la génération d'électricité.

Il serait même possible à plus long terme, d'après un récent rapport du WWF, d'utiliser 100% de sources renouvelables pour les besoins en énergie de l'humanité en 2050.⁷² En conjuguant réduction des consommations (pour revenir au niveau de consommation de 2000) et développement soutenu des différentes sources d'énergie renouvelables [WWF, 2011]. Et pour tordre le cou à une idée reçue, largement répandue sur les coûts de ce type de scénario, l'étude montre que cette transition serait financièrement bénéfique en plus de ses avantages écologiques. Même si le contexte des transports, notamment la part de transports individuels et les flux étaient très différent (dans le sens d'une diminution) de ce que nous connaissons aujourd'hui, l'utilisation de VE s'inscrirait pleinement dans ce scénario, de par sa meilleure efficacité énergétique et la possibilité qu'elle offrirait d'utiliser de l'électricité produite avec des sources d'énergie renouvelables.

Il semble donc que si les deux types de véhicules ont de réelles perspectives d'amélioration, la VE pourra bénéficier à la fois des réductions en termes de consommation énergétique (masse, aérodynamisme, contact roue-sol) applicables à tous types de véhicule, et de la diminution des émissions de la production d'électricité par l'augmentation de la part générée à base de sources d'énergie renouvelables.

II.2.7. Demande supplémentaire en électricité et craintes pour le réseau

Une crainte avancée par certains détracteurs de la VE est de voir la demande en électricité augmenter très fortement et d'être obligé d'y répondre en ayant recours à des sources d'énergie très polluantes comme le charbon. D'autres pensent que l'électrification des voitures aura pour conséquence une augmentation du recours à l'énergie nucléaire ou servira en tous cas de prétexte pour ne pas réduire son utilisation. En effet, les centrales nucléaires n'ont, de par leur fonctionnement, pas la possibilité de réagir rapidement à la demande et fonctionnent donc en continu. L'électricité produite la nuit est donc perdue si elle ne répond à aucune demande. Le lobby nucléaire est dès lors tout à fait enthousiaste à l'idée qu'une grande quantité de VE rechargées la nuit réduise ce gaspillage et augmente la légitimité de cette industrie. Cette argumentation est également en partie valable pour les centrales au charbon qui souffrent du même défaut et fonctionnent en continu.

Cette crainte est battue en brèche au moins par un double argument. D'une part, les deux débats

71 Voir par exemple les projections de l'EWEA (European Wind Energy Association) qui prévoient un dépassement de l'objectif de 20% d'énergie finale à base de source d'énergie renouvelables et que 34% de l'électricité sera produite de la sorte.

([http://www.ewea.org/index.php?id=60&no_cache=1&tx_ttnews\[tt_news\]=1892&tx_ttnews\[backPid\]=259&cHash=e259034a79ee04282fc9f8a516ba883e](http://www.ewea.org/index.php?id=60&no_cache=1&tx_ttnews[tt_news]=1892&tx_ttnews[backPid]=259&cHash=e259034a79ee04282fc9f8a516ba883e))

72 Pour séduisante qu'elle soit, il convient de se poser la question de savoir si cette étude ne se veut pas auto-réalisatrice de ses prémonitions.

(l'électrification de la propulsion des voitures et l'utilisation du nucléaire ou du charbon pour la production d'électricité) n'ont pas de lien logique entre eux. La VE n'a pas besoin d'énergie nucléaire ou de tout autre type d'énergie pour être rechargée et inversement on n'a pas attendu l'arrivée des VE pour se mettre à construire des centrales nucléaires. D'autre part, les énergies renouvelables, et particulièrement l'éolien, peut tout aussi bien jouer ce rôle de production électrique excédentaire à capter la nuit par les VE [Kendall, 2008 : 172]. Le cas nous a été rapporté pour la ville de Hambourg, où il arrive que la production d'électricité par les éoliennes soit arrêtée lorsque la demande nocturne est trop faible.⁷³ Il est par contre à notre avis légitime d'être attentif à ce que la VE ne serve pas de prétexte aux partisans de l'énergie nucléaire pour pérenniser le choix de cette technologie pour la génération d'électricité. S'il manque une vision à long terme dans les choix énergétiques visant à se passer du nucléaire et que les VE se développent largement dans les prochaines décennies, alors l'industrie nucléaire pourrait brandir la menace d'une pénurie d'électricité en cas de réduction imposée de ses activités.

Pour revenir à la peur de voir la demande en électricité augmenter fortement avec l'arrivée massive de VE, des simulations ont été réalisées, notamment pour différents pays européens. Pour la Grande-Bretagne, une étude réalisée en partenariat par différents acteurs (notamment des constructeurs et des fournisseurs d'électricité) part de l'hypothèse de l'arrivée de VE à hauteur de 10% du parc automobile actuel. L'impact pour le réseau est alors estimé par rapport à la capacité de production en heures de pointe, en partant du principe que c'est à ce moment qu'il peut y avoir un besoin supplémentaire en capacités de production. Quatre scénarios ont été étudiés :

- rechargement domestique sans contrôle ;
- rechargement domestique avec contrôle en dehors des heures de pointe ;
- rechargement domestique avec la technologie *smart grids*⁷⁴ ;
- rechargement public sans contrôle durant la journée.

Le scénario qui a le plus d'impact pour le réseau, à savoir le rechargement domestique sans contrôle, n'augmenterait la demande en électricité en heures de pointe que de 2% soit environ de 1 GW [Ricardo, 2009].

Pour la Belgique, Inter-Environnement Wallonie a calculé, en prenant des consommations relativement basses pour les VE de 10 km par kWh, que si 10% des km parcourus en Belgique l'étaient par un moteur électrique, cela ne représenterait que 1,5 à 2% d'augmentation de la production électrique actuelle. Dans le cas d'une électrification totale du parc automobile, on assisterait selon leurs calculs à une augmentation de 17% [IEW, 2010 : 12]. Ce nombre est très proche de ce qui a été calculé par Eurelectric⁷⁵ dans le cas d'un basculement de tout le parc automobile européen à l'électricité, qui se traduirait par une augmentation de 15% de la consommation [Eurelectric, 2009]. On sait cependant à quel point cette hypothèse d'électrification complète avec la situation de production et de consommation actuelle est purement théorique, à la fois de par le nombre restreint de modèles de VE disponibles, les capacités de production des constructeurs et l'inertie du parc automobile. Si elle a lieu ce sera dans un avenir lointain (plusieurs décennies) et donc dans un contexte de capacité et de moyens de production du réseau électrique impossibles à prévoir.

Voyons l'impact que pourrait avoir un nombre fixe de voitures, ce qui donne une idée de la situation plus plausible dans laquelle le réseau électrique pourrait se trouver dans les années à venir. Kendall a calculé en considérant une consommation plus réaliste de 6,2 km par kWh et la moyenne nationale américaine de

73 Présentation de Heinrich Klingenberg (Directeur de hySOLUTIONS) lors de la conférence sur les voitures électriques donnée dans le cadre de la *European Union Sustainable Energy Week* de Mars 2010.

74 Le terme fait référence à un réseau intelligent qui vise à plus d'efficacité par une communication et un comportement cohérent entre la production et la consommation d'électricité.

75 Eurelectric est le lobby européen des producteurs d'électricité.

19.000 km par an, qu'un million de voitures électriques parcourant cette distance représenteraient 3,06 TWh d'électricité. Or cela ne représenterait que 0,08% de la consommation électrique des Etats-Unis ou à peine 0,5% de celle de l'Allemagne, en prenant les mêmes consommations et le même nombre de km parcourus [Kendall, 2008 : 123]. En partant du constat que la capacité du réseau est sous exploitée, certaines études montrent même que dans le cadre d'une utilisation encadrée, un grand pourcentage de la flotte automobile pourrait passer à la traction électrique sans problème. Le Pacific Northwest National Laboratory estime ainsi par exemple que pour les Etats-Unis, en postulant uniquement des recharges débutant en soirée, le réseau actuel serait capable de supporter la recharge de 43% des voitures en circulation actuellement. En parvenant à faire recharger les VE tout au long de la journée et de façon coordonnée, cette proportion monterait à 73% [Kintner-Meyer, 2007 : 11]. Il convient toutefois de rappeler que des disparités importantes existent entre les régions des Etats-Unis et que l'interconnexion n'étant pas optimale, ce tableau est sans doute un peu optimiste.

On peut donc dire que l'impact sur le réseau sera principalement dépendant de deux facteurs : le nombre de VE et le moment choisi pour les recharger. Or le nombre prévu par les estimations les plus optimistes tablent sur 10% de ventes de nouvelles voitures pour 2020 qui seraient des VE, ce qui ne semble pas devoir poser de problèmes majeurs pour le réseau. Au-delà de cette date, il est bien sûr encore plus difficile de faire des prédictions, même si on peut raisonnablement supposer que cette quantité augmentera du fait des avantages des VE et de conditions économiques plus favorables. Réduction de prix des VE d'une part (grâce à la diminution du prix des batteries, à la possibilité de faire des économies d'échelle, etc.) et de l'augmentation du prix du pétrole d'autre part. Ce n'est donc qu'après cette date que l'introduction des VE pourra rendre nécessaire d'augmenter la capacité du réseau. Pour certains auteurs ce moment risque d'être assez proche et il conviendra alors de considérer ensemble (et non plus indépendamment comme c'est le cas aujourd'hui) le développement de la capacité du réseau électrique et celui des VE [Zimmer, 2009]. D'autres études sont d'un avis différent et mettent en avant que le réseau est sous utilisé et que la technologie de *smart grids* permettrait, rien qu'avec la production actuelle, de subvenir aux besoins en électricité d'un grand nombre de VE. Il ne faudrait dès lors pas augmenter la capacité du réseau avant plusieurs décennies [Kromer, 2007 : 84].

En ce qui concerne l'impact du « comportement de rechargement » des VE par leurs propriétaires, il est très difficile à évaluer en raison d'un manque cruel de données empiriques. On peut par contre dire que l'impact sur le réseau sera sans surprise plus grand en cas de recharge rapide en heures de pointe et qu'il sera le plus faible par un chargement nocturne avec la technologie *smart grids* [Zimmer, 2009]. Par ailleurs, l'irrationalité du comportement humain n'est plus à démontrer et il faudra donc attendre d'avoir une flotte plus importante de VE en circulation pour pouvoir faire des extrapolations plus proches de la réalité.

II.2.8. Effet positif sur le réseau, sur la production d'énergie « verte » et v2g

Si l'introduction à grande échelle de VE inspire certaines craintes, elle est aussi porteuse de promesses d'effets positifs pour le réseau. Rappelons d'emblée qu'il s'agit ici aussi d'effets théoriques ; en effet, quoiqu'ils commencent à être étudiés sérieusement dans des projets de terrain pour les mettre à l'épreuve, ils ne sont nulle part à l'œuvre puisque la VE n'est pas utilisée en assez grande quantité. A priori, on ne voit pas bien en quoi l'augmentation de la demande en électricité qui résulte de l'arrivée de VE peut avoir un effet positif pour le réseau. Cela pourrait pourtant être le cas.

Premièrement, si la VE est rechargée la nuit, elle peut a priori, comme nous l'avons vu, le faire en utilisant de la production d'électricité qui actuellement n'est par moment pas utilisée. Deuxièmement, en allant un pas plus loin dans l'intégration de la VE dans le réseau, il est même théoriquement possible de faire de chaque VE une petite unité de stockage d'électricité. En s'appuyant sur l'existence d'un réseau de type *smart grid*, le concept de *vehicle-to-grid* (v2g) est l'idée que chaque VE a une batterie qui est a priori sous utilisée. D'une

part parce que le véhicule est à l'arrêt en moyenne plus de 80% du temps et d'autre part parce que la totalité de l'énergie qu'elle contient n'est pas utilisée entre deux périodes de recharge. On pourrait donc en principe permettre au réseau de disposer de ce surplus de capacité. Celui-ci serait alors utilisé pour stocker l'électricité en période de creux de consommation lorsque la production est excédentaire, et inversement pour restituer l'électricité en période de pic de consommation lorsque la production est déficitaire. Ce concept prévoit aussi généralement la possibilité pour le propriétaire d'une VE de jouir d'un bénéfice économique : soit parce qu'il achète son électricité en heures creuses à un prix plancher pour la revendre en heures de pointe à un prix plafond, soit parce qu'il s'engage contractuellement et contre rémunération à mettre à disposition du réseau un pourcentage de la capacité de stockage de sa batterie, lorsque son véhicule n'est pas utilisé. Troisièmement certaines études envisagent le déploiement futur d'un parc de voitures électriques connectées au réseau, comme l'opportunité idéale de diminuer la part de combustibles fossiles pour la production électrique. Dans un contexte de production intermittente et imprévisible à court terme qui est celui de l'électricité à base d'énergies renouvelables, les batteries pourraient jouer un rôle de tampon qui faciliterait l'adéquation entre la production et la consommation. Par ailleurs, le vent a tendance à être plus soutenu la nuit [T&E, 2009 : 32], période à laquelle il serait judicieux de forcer le rechargement des batteries en raison de la faiblesse de la consommation. On pourrait dès lors profiter pleinement du potentiel de cette source d'énergie renouvelable en plein essor.

Une récente étude de la Commission de Régulation de l'Electricité et du Gaz (CREG) s'est penchée sur la question et se montre assez optimiste sur les avantages pour le réseau de la VE. Elle part du postulat que le système v2g est fonctionnel et qu'un million de VE sont présentes sur le territoire belge [CREG, 2010]. Deux aspects ont été étudiés : l'impact sur les prix et sur les besoins en réserves électriques. Il en ressort d'abord que la capacité des VE à servir « d'éponge électrique » permettrait, si elle était régulée dans un but de maximisation des bénéfices pour la société, de faire baisser les coûts de l'électricité. En effet, comme le réseau doit être constamment en équilibre, les fournisseurs d'électricité prévoient la veille la consommation de leurs clients, quart d'heure par quart d'heure. Si le jour même ils se retrouvent avec un besoin supplémentaire inattendu suite à une brusque augmentation de la consommation, le marché est ainsi fait que le prix *spot* (prix d'achat pratiqué le jour même) va être très élevé.⁷⁶ Or la présence de la réserve d'électricité que constituent les batteries des VE permettrait de faire baisser ce prix *spot* (ce qui pourrait potentiellement bénéficier au consommateur) en augmentant la capacité de l'offre, ce qui diminuerait la volatilité des prix. En ce qui concerne l'impact sur les besoins en réserves d'électricité⁷⁷, l'étude montre que les réserves primaires pourraient être facilement couvertes par les batteries des VE sans conséquences, que ce soit en termes de vieillissement prématuré ou de diminution de la capacité disponible qui serait conservée à des fins de réserves. Par ailleurs les réserves secondaires pourraient également être couvertes en ne réservant que 8% de la capacité totale de batteries et en n'occasionnant qu'un léger vieillissement de celles-ci. En marge de ces conclusions, l'étude montre (sans le chiffrer) que l'introduction de la VE permettrait de diminuer le recours à des unités de production électrique de pointe (utilisées lors des pics de consommation) qui sont à la fois les plus polluantes et les plus chères à alimenter. L'étude relève cependant des inconnues importantes pouvant faire varier ses conclusions, notamment la méconnaissance du processus de vieillissement des batteries et le comportement des propriétaires de VE pour une part imprévisible, limites sur lesquelles nous reviendrons.

Malgré cet enthousiasme, on trouve aussi dans la littérature des détracteurs de cette vision positive pour le réseau de l'introduction des VE et plus encore du système v2g. Il semble en fait que d'autres solutions que la batterie des VE soient plus adaptées au stockage de l'électricité non consommée et à sa restitution en cas de

76 On dira alors que la volatilité du prix de l'offre est forte, c'est-à-dire que l'écart entre le prix moyen et le prix pratiqué est en l'occurrence important.

77 Afin de pouvoir faire face à une forte demande inattendue, le gestionnaire de réseau de transmission doit pouvoir disposer, pour assurer l'équilibre du réseau, de réserves d'électricité dont il existe 3 types (primaires, secondaires et tertiaires). Voir <https://www.entsoe.eu/>

pics de la demande. Citons d'abord le pompage-turbinage des stations hydroélectriques qui utilisent l'électricité lorsque la consommation est basse pour pomper l'eau dans les réservoirs. Lorsque la demande est forte, l'eau est alors relâchée dans les turbines pour produire de l'électricité. Notons que cette technique est tout à fait opérationnelle depuis de nombreuses années. En ce qui concerne le stockage par batteries, il peut être rendu plus efficace (meilleur rendement et auto-décharge plus faible) et meilleur marché par l'utilisation de systèmes de stockage stationnaire spécifiquement conçus pour une utilisation de ce type, comme les batteries Sodium-Soufre [Pluchet, 2010 : 50]. Il convient cependant de noter que si le système v2g devient une réalité, les batteries des VE, même moins adaptées, seraient présentes quoiqu'il arrive alors qu'un système de stockage stationnaire doit être acquis spécialement et ne sert qu'à cette fin de stockage.

Il existe en fait un grand nombre de problèmes potentiels et des freins au développement du système v2g. D'abord il repose sur des présupposés technologiques qui sont pour l'heure hypothétiques et théoriques ou n'existent qu'à petite échelle : *smart grids* d'une part et VE capables de réinjecter de l'électricité stockée dans leurs batteries sur le réseau d'autre part. Il convient de noter que les VE qui sont actuellement sur le marché et celles en projet ne sont pas pourvues d'un système de gestion de la batterie permettant l'envoi d'électricité sur le réseau. Ensuite, le système repose, comme nous l'avons vu, sur le comportement responsable des possesseurs de VE : les voitures doivent être branchées en permanence quand elles ne sont pas utilisées pour pouvoir être utiles au réseau. L'incitant financier devrait cependant pouvoir motiver le propriétaire à brancher son véhicule. Mais cela suppose aussi que les VE ne sont pas stationnées dans la rue mais branchées dans des garages, idéalement la journée sur le lieu de travail et la nuit au domicile de leurs propriétaires. On s'adresse donc à une population qui possède un garage ce qui limite le potentiel, quoiqu'il est probable que ce soit la même population qui achèterait une VE dans les conditions actuelles. Par ailleurs, si on promet une place de parking sur le lieu de travail cela incite à l'utilisation de voiture individuelle alors que la congestion automobile urbaine est déjà un problème réel de notre société. Enfin il reste la question de l'opportunité de l'utilisation des batteries de VE. Nous avons vu que d'autres solutions semblaient plus rationnelles, d'autant que l'effet de ces recharges et décharges sur le processus de dégradation des batteries qui reste méconnu, peut être au mieux minime, au pire important.

En somme on peut dire que beaucoup d'incertitudes planent encore concernant la faisabilité, le coût et la rentabilité du v2g. Il faudrait cependant, en dehors de ce débat-là, à tout le moins inciter voire imposer dès à présent que la recharge se fasse de façon contrôlée, principalement en heures creuses de consommation, donc sans doute la nuit. Le risque serait sinon d'avoir une accentuation des pics de consommation. Si par exemple tout le monde recharge sa VE chez lui en rentrant du travail de façon incontrôlée, le pic de 18h à 20h typique des mois d'hiver en Belgique [CREG, 2010 : 8] ferait certainement augmenter les émissions de CO₂ et de polluants (par le recours à des capacités de production plus émettrices) et pourrait même nécessiter de nouvelles installations d'unités de production.

II.2.9. Conclusion

La comparaison entre les VE et les VT pose de nombreuses questions méthodologiques qui rendent difficile (voire impossible) de fournir des réponses claires à la question de savoir la différence d'efficacité et d'émissions de GES entre ces deux types de véhicules. On peut néanmoins considérer, et ce sont les estimations que nous utiliserons pour la suite de ce travail, que la VE présente une efficacité du réservoir à la roue de l'ordre de 65% alors que pour la VT elle se situe autour de 25% pour les moteurs utilisant le diesel et de 18% pour les moteurs à essence. La VE est donc environ trois fois plus efficace que la VT. Lorsque l'ensemble de la filière est prise en compte, du puits à la roue, il est difficile de donner un ordre de grandeur pour la VE étant donné que les estimations rencontrées vont du simple au double sans doute en raison des différences d'hypothèses retenues en ce qui concerne le mix énergétique de production d'électricité considéré.

En ce qui concerne les émissions de GES, les estimations des différents auteurs sont encore plus divergentes, en raison à nouveau principalement du mix de production d'électricité choisi qui modifie considérablement les émissions de la VE. Pour la Belgique par exemple, pays dont les émissions dues à la production d'électricité sont plus faibles que la moyenne européenne (et *a fortiori* mondiale), on peut retenir que la VE émet de l'ordre de trois à quatre fois moins qu'une VT [IEA 2010a : 107 et Van Mierloo, 2010].

Les conséquences sur la pollution atmosphérique ne semblent pas plus clairement quantifiables. La plupart des auteurs estiment cependant que l'utilisation de VE, avec le mix énergétique électrique actuel au niveau mondial, aggraverait les rejets de polluants, même si la situation pays par pays est plus nuancée. Il convient cependant d'ajouter que les conséquences de ces pollutions étant surtout locales, il apparaît que l'impact sur la santé serait diminué par l'électrification de la propulsion automobile. Le déplacement des émissions vers des lieux de génération d'électricité généralement situés dans des zones moins peuplées ferait plus que compenser l'augmentation de rejets de polluants atmosphériques. Notons aussi qu'en tenant compte des efforts en cours et planifiés de réduction des émissions (de GES et de polluants), la situation pourrait s'améliorer au moins dans les pays qui se sont engagés à mettre en place ce type de mesures.

Les perspectives d'améliorer l'efficacité à la fois des VT et des VE, par des améliorations techniques (réduction de la masse des véhicules, downsizing des moteurs, augmentation de l'aérodynamisme, contact roue-sol, etc.), sont assez nombreuses et certaines techniques sont applicables aux deux types de motorisations.

L'impact sur le réseau est le dernier sujet traité dans ce chapitre et là encore il n'est pas possible de dégager de réponse claire à la question de savoir si la VE est plutôt un risque ou une opportunité. Risque de devoir renforcer la capacité du réseau et de la production et qui semble n'exister de façon aiguë que si une part très importante du parc automobile est électrifiée, ce qui n'est pas réaliste avant plusieurs décennies. Il sera cependant nécessaire de veiller à ce que le rechargement des batteries se fasse en dehors des heures de pointe, sous peine de réduire l'intérêt pour l'environnement, voire d'aggraver les incidences des voitures. La possibilité d'utiliser les batteries des VE comme réserves de stockage en cas de pics de production représente par contre une opportunité réelle, mais qui reste à l'heure actuelle une idée théorique non encore appliquée à grande échelle. Il semble de plus que d'autres solutions permettent de réaliser ce rôle avec un meilleur rendement, comme le pompage-turbinage dans les centrales hydroélectriques ou le stockage dans des unités statiques de grande capacité.

II.3. Avantages, limites et possibles effets négatifs de la VE

II.3.1. Pollution, changement climatique et bruit

On peut lire çà et là, et particulièrement dans la communication qui émane des constructeurs automobiles, que les VE ne polluent pas. D'autres, un peu plus modestes, annoncent plus simplement *zero emission* soit l'absence d'émission, en faisant référence implicitement aux émissions de polluants et de gaz à effet de serre. Ces affirmations sont en fait trompeuses : il s'agit bien sûr uniquement des émissions directes. Il est exact qu'il faille soustraire au bilan environnemental de la VE les pollutions et émissions dues au moteur thermique dont elles sont dépourvues. Néanmoins, il faut lui ajouter celles qui trouvent leur origine dans la génération de l'électricité ainsi que dans la batterie, comme nous l'avons vu. La VE est donc, de par sa plus grande efficacité énergétique, dans la majorité des cas moins émettrice de GES et plus émettrice de polluants que la VT, mais la différence d'émission entre ces deux types de voitures dépendra donc du mix énergétique considéré. Pour l'Europe la diminution en termes de CO_{2e} se situe autour de 50% et pour la Belgique la diminution est un peu plus importante, d'après les estimations que nous avons pu trouver. Notons cependant que comme le montrent les calculs de l'ADEME, pour faire véritablement baisser de façon spectaculaire les émissions de GES, en dehors de la mobilité douce (marche et vélo), ce sont uniquement les transports en commun ferrés électriques et sans énergie embarquée (train, tram et métro) qui représentent un véritable saut quantitatif en termes de diminution [ADEME, 2008].

Or il faut se placer dans un contexte mondial, puisque l'impact des GES est mondial. Il convient dès lors de diminuer, d'après les recommandations du GIEC, de 50% les émissions mondiales de GES par rapport au niveau de 1990 et de le faire rapidement, le pic devant avoir lieu au plus tard en 2015. Cela veut donc dire diminuer très sensiblement, plus que de 50% dans les pays de l'OCDE. En effet, en suivant un simple principe de justice sociale, il est logique de pouvoir permettre au « reste du monde » de continuer à se développer. D'autant plus que les GES d'origine anthropique présents dans l'atmosphère ont dans leur immense majorité servi exclusivement au développement des pays de l'OCDE. On peut donc dire que bien qu'appréciable, la diminution d'émissions de GES que représente l'utilisation de VE avec le mix électrique actuel ne serait pas suffisante. Qui plus est, il faut tenir compte du fait que seul un faible pourcentage du parc automobile mondial pourra être électrifié, en tous cas dans les prochaines décennies.

Certaines études se sont dès lors posé la question de savoir quelle part des émissions de GES pourraient être évitée par l'adoption d'une quantité définie ou par le basculement total du parc automobile vers la propulsion électrique. Une étude allemande réalisée pour le compte du WWF a ainsi estimé que 10 millions de VE circulant sur les routes d'Allemagne ne feraient chuter les émissions de GES du pays que de 1%.⁷⁸ Inter-Environnement Wallonie a réalisé le même exercice et s'est posé la question de savoir, si 10% du parc automobile belge roule à l'électricité en 2020, de combien cela ferait diminuer les émissions nationales de GES. Deux réponses sont données, en fonction des hypothèses d'émission pour les VE et pour les VT. Les résultats sont repris dans le tableau ci-dessous.

Tableau 8 : Potentiel de diminution des émissions de GES pour 10% de VE en 2020 en Belgique

Hypothèse	Emissions moyennes de GES des VT	Emissions moyennes de GES des VE	Diminution des émissions de GES en Belgique
Hypothèse 1 : peu d'efforts de réduction de la consommation des VT et développement des énergies	130 gCO ₂ par km	50 gCO ₂ par km	1,4%

⁷⁸ Cité par [Zimmer, 2009]. Voir : http://www.wwf.de/fileadmin/fm-wwf/pdf_neu/wwf_elektroautos_studie_final.pdf

renouvelables au-delà des objectifs européens			
Hypothèse 2 : gros efforts de réduction de la consommation des VT et peu d'efforts de développement des énergies renouvelables.	120 gCO ₂ par km	80 gCO ₂ par km	0,8%

(source : IEW, 2011 : 45)

On voit donc que la VE offre un potentiel de réduction au niveau national relativement modeste et qu'il convient dès lors certainement de considérer d'autres solutions pour diminuer l'impact du secteur des transports.

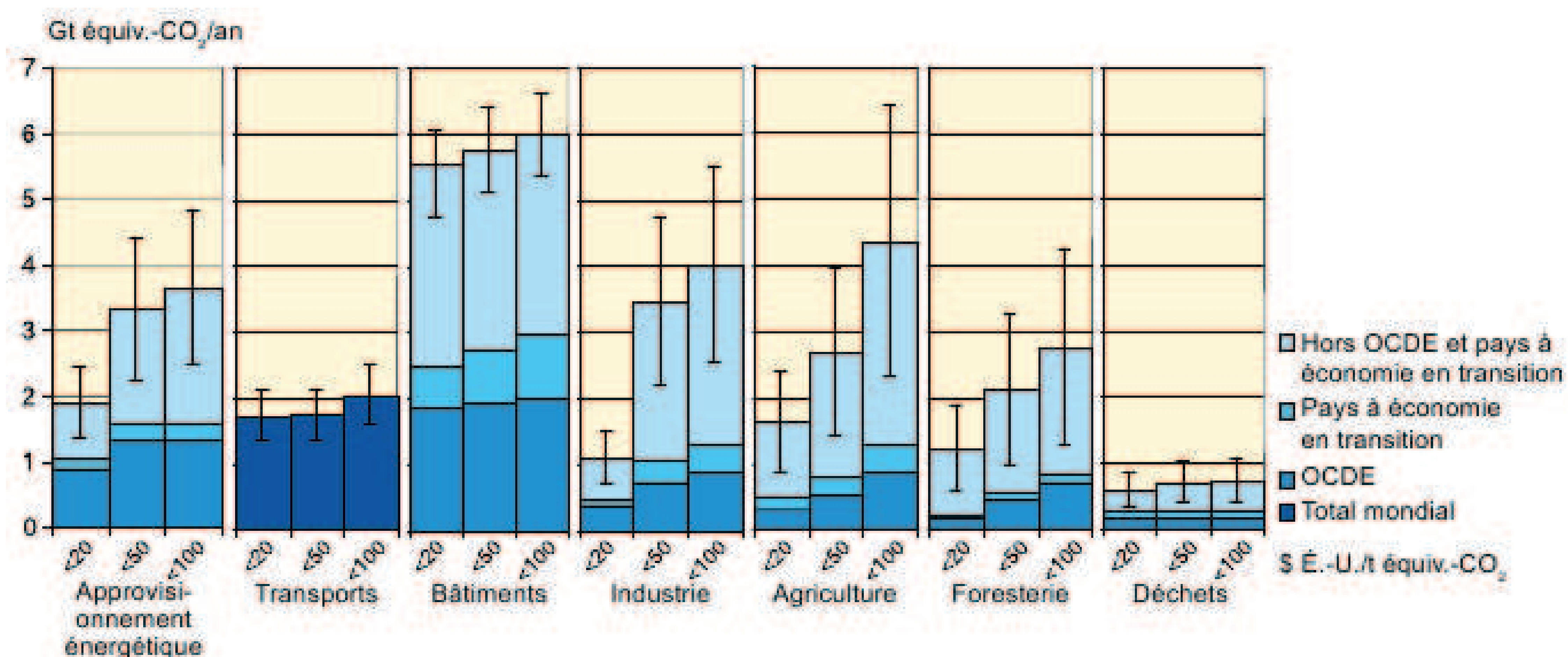
Ces estimations sont à mettre en balance avec d'autres qui tentent de calculer comment des changements de comportement de mobilité pourraient permettre de diminuer les distances parcourues et contribuer ainsi à des réductions d'émission de GES. Une étude de Element Energy Ltd, commanditée par le WWF s'est intéressée au cas de l'Écosse. Elle estime par exemple que si les améliorations de moteurs thermiques se poursuivaient selon les tendances actuelles et qu'on parvenait à limiter le nombre de km roulés au niveau de 2001, cela permettrait de diminuer les émissions de GES de 40% par rapport à 1990 [IEW, 2010 : 15].

Si l'on se place d'un point de vue financier, la diminution des GES devrait logiquement se faire d'abord dans les secteurs où cette diminution peut se faire au moindre coût. Devant l'urgence climatique, le bon sens dicte de commencer par ce qui requiert le moins d'investissements, d'autant qu'une série de mesures sont même porteuses de bénéfices financiers. Classer les mesures de réductions de GES en fonction de leur coût par unité de réduction, ce que le GIEC appelle la notion de « potentiel d'atténuation », est une tâche titanesque et bien évidemment tributaire des hypothèses prises en amont des calculs. Cependant, au moins deux organisations influentes, à savoir le GIEC et le cabinet de conseils McKinsey, se sont penchés sur la question.

Le GIEC a fait l'exercice de classer au niveau mondial et à l'horizon 2030, pour chacun des secteurs d'activité⁷⁹ les plus émetteurs de GES, le potentiel d'atténuation pour l'ensemble des mesures dont les prix sont inférieurs à 20, 50 et 100 dollars par tonne de CO_{2e} évitée. Il montre que quasiment tout le potentiel identifié pour les transports peut être atteint par des mesures dont le prix est inférieur à 20 dollars par tonne de CO_{2e} évitée [GIEC, 2007a : 59]. Or il est évident que les mesures visées ici sont l'optimisation des moteurs et l'hybridation non rechargeable, alors que l'électrification du parc automobile (VE et VEHR) se situe bien au-delà de ce coût. Par ailleurs, afin d'optimiser les investissements et si donc on se limite à des mesures en dessous de 20 dollars par tonne de CO_{2e} évitée, il convient de traiter, par ordre décroissant de potentiel d'atténuation, d'abord le secteur des bâtiments qui présente le plus haut potentiel, ensuite l'approvisionnement énergétique, les transports et l'agriculture. Ces conclusions sont présentées dans le graphique ci-après :

Figure 1 : Potentiel économique d'atténuation par secteur en 2030 (en dollars par tonne de CO₂ équivalent)

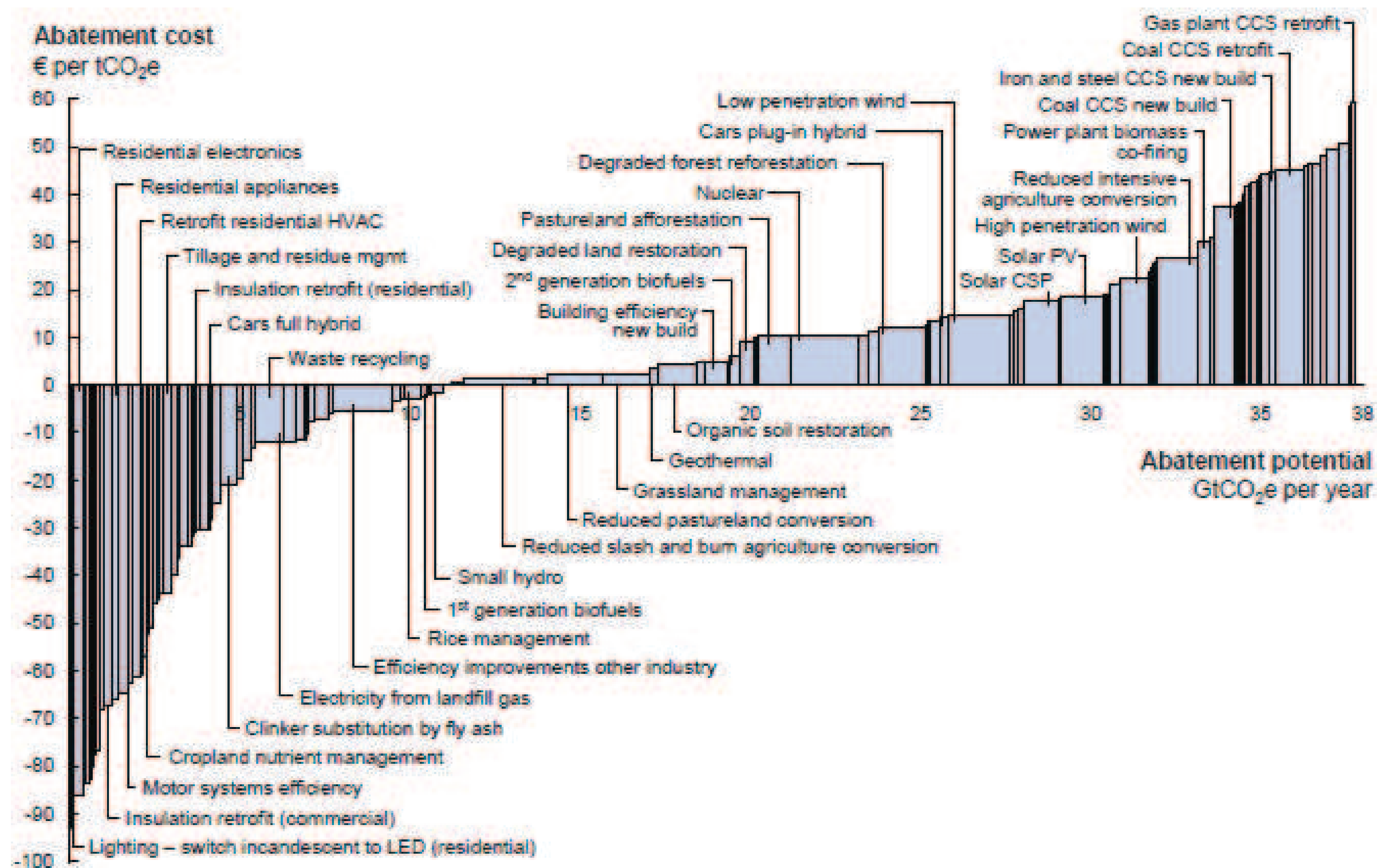
⁷⁹ Les secteurs en question sont : l'approvisionnement énergétique, les transports, les bâtiments, l'industrie, l'agriculture, la foresterie et les déchets.



(Source : [GIEC, 2007a : 59])

Les conclusions de McKinsey ne sont pas différentes. Publiées dans un rapport considérant également la situation d'ici à 2030 et illustrées sous la forme d'une courbe de coût de réduction de GES pour toutes les mesures en dessous de 60 € par tonne de CO_{2e} évitée, il permet de se rendre compte des secteurs à traiter prioritairement pour optimiser les investissements. On peut y voir que les domaines les plus rentables sont la consommation énergétique (des bâtiments, des appareils domestiques et des véhicules), la production d'électricité et des mesures d'arrêt de la déforestation et d'adoption d'une agriculture plus raisonnée [McKinsey, 2009a : 7].

Figure 2 : Coût de réduction en € par tonne de CO_{2e} (ordonnée) et potentiel de réduction en gigatonnes de CO_{2e} par an (abscisse)



(source : [McKinsey, 2009a : 7])

Or si le secteur des transports est considéré comme un secteur clef par cette étude, c'est au niveau technologique, par une optimisation des moteurs existants et ensuite par l'introduction de véhicules électriques hybrides non rechargeables (VEH), qu'il convient d'agir. Ce sont les deux seules mesures qui ont des coûts de réduction de GES négatifs, c'est à dire qu'elles sont rentables financièrement en plus de permettre de réduire les émissions de GES. L'optimisation des moteurs et les VEH rapporteraient ainsi respectivement environ 60 € et 30 € par tonne de CO_{2e} évitée. Ceci ne constitue pas une surprise : le coût de ces progrès technologiques est raisonnable et le potentiel d'amélioration est appréciable, jusqu'à une

diminution de 50% des consommations d'après certains auteurs [Syrota, 2008]. Les voitures hybrides rechargeables (VEHR) dont le coût est évalué autour de 15 € par tonne de CO_{2e} évitée, et plus encore les VE qui ne sont pas reprises dans la courbe et se situent donc au-delà de 60 € par tonne de CO_{2e} évitée, sont quant à elles considérées comme des mesures de réduction des GES très onéreuses [McKinsey, 2009a : 7]. L'étude rappelle aussi que la réduction de GES pour la VEHR et pour la VE dépend très fortement du mix énergétique de production d'électricité. Le potentiel de réduction est donc considéré comme très important mais plutôt à un horizon lointain, autour de 2050, en partant du postulat que la « décarbonisation » de la production électrique sera presque totale à cette date [McKinsey, 2009a : 97].

Au niveau de la pollution atmosphérique, nous avons vu que la VE permet une diminution des impacts sur la santé humaine, mais que celle-ci tient plus au déplacement des émissions qu'à leur diminution. La situation pourrait cependant s'améliorer par la production d'électricité via des sources d'énergie renouvelables.

En ce qui concerne le bruit, le moteur de la VE présente l'avantage d'être incomparablement moins bruyant qu'un moteur thermique, ce qui rend le véhicule quasiment silencieux à faible vitesse. Le son émis par un VT est dominé jusqu'à environ 50 km par heure par le son émis par le moteur. Jusqu'à cette vitesse la VE présente donc ce qui apparaît comme un avantage par rapport aux VT. Au-delà, le bruit d'une voiture en mouvement est occasionné par le contact du pneu sur le sol et par les frottements avec l'air, et les deux types de véhicules ont des niveaux sonores équivalents. Pourtant cet avantage apparent n'est pas sans poser un problème pour les usagers de l'espace public se situant dans l'environnement direct de la VE. Les piétons et les cyclistes se servent, souvent inconsciemment, de leur ouïe pour juger de la présence ou de l'absence de véhicules sur la voie publique et les VE très silencieux peuvent dès lors représenter un danger. Pour les personnes aveugles ou ayant des problèmes de vue ce danger est bien sûr encore plus vif.

Cette question est prise très au sérieux aux Etats-Unis où la *National Highway Traffic Safety Administration* (NHTSA) a étudié le phénomène sur la base des statistiques d'accidents impliquant des piétons et des cyclistes. L'étude constate que les voitures hybrides sont environ deux fois plus susceptibles de provoquer des accidents avec des piétons ou des cyclistes que des VT lorsque ceux-ci ont lieu à faible vitesse lors de manœuvres de stationnement, de ralentissement et d'arrêt du véhicule. La raison invoquée est l'absence de bruit qui caractérise les voitures hybrides à basse vitesse lorsque leur moteur thermique est coupé [NHTSA, 2009]. Il est même envisagé de rendre un système d'avertissement sonore obligatoire pour les VE puisqu'une loi appelée *pedestrian safety enhancement act* a récemment été adoptée obligeant les constructeurs à équiper les VE (et VEH) de systèmes sonores permettant aux piétons de les rendre « raisonnablement détectables ».⁸⁰ En Angleterre au contraire, les sons ajoutés aux véhicules automobiles pour des raisons de sécurité de piétons et cyclistes,⁸¹ doivent pouvoir être coupés la nuit (entre 23h00 et 6h00). La Nissan Leaf, équipée d'un système sonore qui s'enclenche automatiquement à faible vitesse, a dû être amputée de ce système pour pouvoir être mise sur le marché anglais.⁸² La Toyota Prius, une voiture hybride, propose par ailleurs depuis quelques années en option un avertisseur sonore qui s'enclenche à basse vitesse pour prévenir de son arrivée. Suite à l'adoption de la loi américaine, une série d'équipementiers automobiles planchent sur des systèmes analogues.⁸³ Le défi étant de trouver un effet sonore dont le niveau est au-delà du seuil permettant d'alerter l'entourage immédiat du véhicule tout en étant en deçà du seuil occasionnant une gêne pour ce même entourage. Le rêve d'une circulation urbaine rendue silencieuse par les VE s'évanouit, brisé par l'intérêt supérieur de la sécurité routière.

80 Pour le texte complet voir : http://frwebgate.access.gpo.gov/cgi-bin/getdoc.cgi?dbname=111_cong_bills&docid=f:s841enr.txt.pdf

81 Il s'agit en l'occurrence d'un avertisseur sonore intermittent qui équipe les autobus et les camions et qui retentit lorsque ceux-ci enclenchent la marche arrière.

82 Voir http://www.thenorthernecho.co.uk/business/8880765.Nissan_Leaf_facing_delay/

83 Voir par exemple le système imaginé par l'équipementier Delphi : http://delphi.com/news/pressReleases/pr_2011_02_15_001/

II.3.2. Diversité des sources d'approvisionnement

Le secteur des transports est fortement dépendant du pétrole. Or celui-ci est inégalement réparti sur Terre et donne lieu à des tensions entre états allant parfois jusqu'à des conflits armés.⁸⁴ On trouve donc des partisans de la VE parmi ceux qui voient d'un bon œil la substitution du pétrole par l'électricité comme énergie utilisée par l'automobile, dans un but de diversification des sources d'approvisionnement. En effet, l'électricité peut être produite de différentes façons alors que le pétrole est ou n'est pas disponible dans les sous-sols d'un pays. Si cet argument est pour une part valable, il n'en reste pas moins vrai que nombre de pays industrialisés produisent à l'heure actuelle une part importante de leur électricité avec des combustibles importés (gaz, uranium) et qu'on verrait donc dans ces pays une dépendance en chasser ou plutôt en renforcer une autre. Rappelons bien entendu que cette situation pourrait être modifiée par l'utilisation de sources d'énergie renouvelables.

Par ailleurs, les VE reposent actuellement sur des technologies qui font également appel à des matières premières inégalement réparties sur la surface du globe. Les batteries d'une part, dont on a vu que celles retenues actuellement pour un usage automobile reposent sur des architectures nécessitant du lithium, un métal qu'on ne trouve que dans quelques pays. D'autre part les aimants des moteurs électriques des VE nécessitent des « terres rares »,⁸⁵ en l'occurrence néodyme, dysprosium et samarium, métaux dont la production mondiale est quasiment exclusivement localisée en Chine. A propos de ces derniers, le gouvernement chinois a récemment pris la décision de réduire ses exportations de « terres rares » de 11% par rapport à 2010⁸⁶, ce qui a accentué l'envolée de leurs prix. Cette question est tellement stratégique que les autorités japonaises, qui craignent que la rareté de ces métaux soit un obstacle à leur industrie automobile, ont décidé de réagir. Un programme de recherche a été lancé, subsidié à hauteur d'environ 500 millions de dollars, pour le développement de moteurs électriques à destination de l'automobile réduisant l'utilisation de ces métaux. Pourtant si on voit que le risque de nouvelles dépendances existe, on peut imaginer que la technologie utilisée pour les moteurs puisse évoluer et que les batteries ne soient pas éternellement tributaires du lithium. De plus, les composants des moteurs électriques ainsi que des batteries hors d'usage peuvent être largement recyclés, alors que les combustibles fossiles, une fois leur énergie libérée par combustion, ne peuvent plus servir.

II.3.3. Utilisation de l'espace en ville

Si à première vue l'utilisation de l'espace urbain par l'automobile ne sera que peu modifiée par l'introduction de VE, et que les nuisances déjà identifiées ne seraient pas affectées, la situation pourrait être plus nuancée. En ce qui concerne la construction de routes, il semble improbable que des VE modifient la situation actuelle. Pour le problème des véhicules en stationnement, on pourrait assister à une diminution de l'utilisation de l'espace, si les voitures construites sont plus compactes en raison de leur destination à un usage urbain. Il convient de noter qu'à la vue des projets de VE des grands constructeurs automobiles, cette condition ne semble à première vue pas se réaliser. Le problème de la congestion urbaine pourrait également diminuer légèrement si les voitures étaient plus compactes, mais le risque est à notre avis plus grand que ce problème s'aggrave, dans le cas où plus de voitures seraient mises en circulation (risque que nous détaillons plus loin).

84 Voir à ce sujet les tensions internationales et les tractations qui ont conduit à la création de certains États pour des raisons de ressources pétrolières dans LAURENT (Eric), *La face cachée du pétrole*, Plon, 2006, 411p. Voir aussi une étude sur le lien entre ressources minières (pétrole et diamants) et conflits armés : <http://www.wider.unu.edu/stc/repec/pdfs/dp2001/dp2001-42.pdf>

85 Il s'agit d'un ensemble de métaux ayant des caractéristiques proches et regroupés sous ce nom.

86 Voir <http://www.shanghaidaily.com/article/?id=458564&type=Business> [nécessite la création d'un compte]

II.3.4. Coût d'achat et d'utilisation

Le coût d'achat d'une VE est substantiellement supérieur à celui d'une VT, principalement à cause de la batterie. Plusieurs facteurs secondaires entrent aussi en ligne de compte comme les économies d'échelle réalisées sur les moteurs à combustion plus répandus et les années d'expérience que l'industrie possède en la matière. Mais le principal facteur est bien entendu la présence d'une batterie de capacité nettement supérieure et destinée à un autre usage que dans une VT. Le coût de celle-ci est cependant difficile à estimer. D'une part parce que cette information est très sensible pour les constructeurs qui en font un véritable secret industriel et d'autre part parce que des évolutions technologiques rapides caractérisent ce domaine encore relativement nouveau. Il se situerait pour des projets de grande envergure entre 500 et 700 dollars par kWh.⁸⁷ Pour la Nissan Leaf qui dispose d'une batterie de 24 kWh, il serait donc environ de 15.000 dollars. Reste qu'on peut estimer actuellement, d'après beaucoup d'auteurs, le coût total d'une VE environ au double d'une VT équivalente [Syrota, 2008 : 67].

Pour calculer le coût d'utilisation d'une VE et le comparer à celui d'une VT prenons arbitrairement une voiture diesel consommant 6 litres pour réaliser 100 km. Avec une efficacité du réservoir à la roue de 25%, proche de celle estimée par les différents auteurs repris au chapitre 2.2 nous en sommes arrivés à une consommation d'énergie utile, c'est-à-dire celle utilisée pour faire tourner les roues et faire fonctionner les équipements auxiliaires, de 15 kWh. En partant de là et en estimant en première approximation que l'énergie utile nécessaire était la même pour les différents types de véhicules, nous avons calculé, en fonction des efficacités respectives de voitures à essence et électriques, la consommation pour ces autres types de voitures. Les résultats sont repris dans le tableau ci-dessous :

Tableau 9 : Estimation du coût en carburant pour des voitures utilisant différents types de carburant (diesel, essence et électrique)

Type de moteur	Consommation pour 100 km	Efficacité (réservoir à la roue)	Énergie utile	Prix carburant (23-02-2011) ⁸⁸	Coût en carburant pour 100 km
Diesel	6 litres, ~60 kWh	25%	15 kWh	1,38 €	8,28 €
Essence	8,3 litres, ~83 kWh	18%	15 kWh	1,55 €	12,87 €
Électrique	23 kWh	65%	15 kWh	0,20 €	4,60 €

(calculs propres d'après les estimations du chapitre II.2.)

On voit donc que si la VE est plus chère à l'achat, elle l'est nettement moins en utilisation. Comparée à l'achat d'une VT, la VE nécessite par contre de prendre en considération une batterie de grande capacité au coût élevé. Or en achetant la batterie, c'est en quelque sorte comme si on achetait en même temps une grande partie du coût des futurs pleins de carburant dès l'achat de la voiture. Pour un kilométrage annuel de 15.000 km, cela représente dans notre hypothèse une économie annuelle de 552 € par rapport à un véhicule roulant au diesel et de 1240,50 € par rapport à un véhicule roulant à l'essence. Rappelons cependant que le prix des carburants est très volatil et va, selon toute vraisemblance, continuer à augmenter dans les prochaines années. Par ailleurs, le prix de l'électricité, quoique moins fluctuant, n'est pas à l'abri des variations de prix et pourrait à l'avenir être taxé lorsqu'il est utilisé à des fins de mobilité, comme c'est le cas pour les combustibles pétroliers. Notons enfin qu'en considérant que le litre de carburant contient environ 10 kWh d'énergie (thermique), son prix par kWh reste plus faible, malgré la lourde taxation qui le grève, que le prix

87 Rob Lache, analyste de la Deutsche Bank et spécialiste de la question, l'estime par exemple à 650 dollars par kWh actuellement en prédisant qu'il pourrait être divisé par deux d'ici à 2020 en raison d'économies d'échelle. Voir <http://www.bloomberg.com/apps/news?pid=newsarchive&sid=aJEVrzt2t.8o&pos=10>

88 Les prix des carburants à base de pétrole proviennent du site http://www.carbu.be/official_prices.php#previsions, un prix moyen pour l'électricité a été calculé en fonction des informations provenant de la newsletter de l'APERRE de janvier 2011 : <http://www.apere.org/doc/Renouvelle30.pdf>

par kWh de l'électricité en moyenne pour la Belgique. Cette remarque ne vaut par contre pas si l'on considère le prix par kWh de l'électricité en tarif de nuit, qui est environ équivalent au prix des carburants pétroliers.

On peut craindre que les populations à plus faibles revenus soient exclues de la mobilité automobile électrique. En effet elles se trouvent a priori dans une position qui ne leur permet pas de faire un investissement important : payer le surcoût que représente l'achat d'une VE par rapport à une VT, même quand celui-ci pourra s'avérer rentable grâce aux économies réalisées en frais de fonctionnement.⁸⁹

II.3.5. Spécificités de fonctionnement pour l'automobiliste : recharger la batterie

Ce qui change fondamentalement pour un automobiliste qui conduit une VE tient quasiment exclusivement aux caractéristiques de la batterie. En raison de son prix par kWh, il n'est pas possible de proposer à l'heure actuelle des véhicules grand public disposant d'une autonomie théorique au-delà de 150 km environ, ce qui pose des problèmes identifiés au chapitre II.1. De plus, les installations électriques qu'on trouve couramment dans l'habitat en Europe disposent de prises (généralement de 220 V et 15 A) qui imposent un temps de recharge assez long. Pour la Nissan Leaf, il faut environ 7 heures pour recharger complètement les batteries de 24 kWh. Pour d'autres pays qui fonctionnent avec des voltages différents, comme les Etats-Unis où les prises de courant délivrent généralement 110 V, ce temps est encore bien plus long, estimé à environ 20 heures.⁹⁰ Si l'on compare cela avec un plein de carburant pétrolier à la pompe la différence est très significative. A titre de comparaison, le rapport Syrota a calculé qu'une pompe de station-service avec un débit d'environ 10 litres par minutes délivre 500 fois plus d'énergie par unité de temps qu'une prise électrique européenne dont la puissance est d'environ 3 kW [Syrota, 2008 : 66].

Cette limite de la VE fait que le propriétaire d'un tel véhicule est quasiment dans l'obligation de disposer d'un garage pour pouvoir recharger la batterie. Or on constate que les populations vivant dans des habitations disposant d'un garage font souvent partie des groupes à plus hauts revenus. La disposition d'un garage devient dès lors une nouvelle barrière socio-économique à l'utilisation d'une VE. De plus, la structure de l'habitat peut être très différente d'un pays à l'autre : si aux Etats-Unis on estime que 63% de la population vit dans une maison avec garage, cette proportion n'est que de 20% en France [Zimmer, 2009 : 63].

Si le possesseur d'une VE n'a pas de garage, on peut imaginer deux solutions. Soit il recharge son véhicule aux bornes de rechargement disponibles sur l'espace public, mais celles-ci ne sont pas à l'heure actuelle disponibles en très grand nombre et représentent un investissement conséquent pour les installer avec les problèmes que cela suppose, comme identifiés au chapitre II.1. Cette recharge peut se faire éventuellement à l'aide de chargeurs rapides ce qui diminue la gêne pour l'automobiliste. Mais la batterie risque alors de se dégrader, certainement si elle est soumise à ce type de recharge régulièrement, dans des proportions encore méconnues du fait de la nouveauté des VE. Soit il les recharge sur son lieu de travail, à supposer que celui-ci dispose d'un parking et que son employeur le lui permette. Mais alors la recharge se fait en « heures pleines » de production d'électricité et les conséquences pour le réseau peuvent conduire à une forte diminution de l'intérêt environnemental de l'utilisation des VE.

II.3.6. Possibles effets négatifs

La voiture électrique présente, par rapport à celle à moteur à combustion interne, des avantages indéniables de par sa technologie. Néanmoins elle fait naître aussi, en dehors de ses caractéristiques techniques, un

⁸⁹ En l'état actuel des prix, la VE n'est pas rentable, les économies en frais de carburant ne compensant pas le prix d'achat supérieur. On peut par contre considérer, d'après les estimations faites, que la VE sera rentable dans les prochaines décennies, si deux tendances se confirment : son coût qui va diminuant et l'augmentation du prix du pétrole.

⁹⁰ Voir <http://www.nissanusa.com/leaf-electric-car/faq/view/97#/leaf-electric-car/faq/view/97>

certain nombre d'inquiétudes parmi les observateurs les plus avertis qui s'y sont intéressés.⁹¹

II.3.6.1. Effet rebond

Les caractéristiques propres d'une VE par rapport à une VT risquent de générer un effet rebond, c'est-à-dire qu'un avantage apparent induit un changement de comportement qui annule les effets positifs de cet avantage. Autrement dit, une pollution, une émission ou une consommation est diminuée, ce qui en augmente une autre et au final la diminution est annulée : on arrive donc à un statu quo, voire à une augmentation. Dans le cas de VE il existe d'abord un risque d'effet rebond de nature économique. En effet, les VE sont comparativement plus chères à l'achat mais moins chères à l'usage que les VT, comme nous l'avons vu. L'automobiliste habitué à la structure de coûts d'une VT va donc trouver qu'une fois la VE payée, rouler est relativement bon marché et il risque dès lors de rouler plus. De plus, la consommation d'électricité à des fins de mobilité va être noyée, dans la facture électrique mensuelle, au milieu des autres consommations électriques. Le montant payé à la pompe est au contraire visible et porteur d'un aspect pédagogique qui donne concrètement un coût à l'usage de la VT.

Il existe par ailleurs un risque d'effet rebond environnemental de plusieurs sortes. D'abord, la pollution de la génération d'électricité étant localisée dans des centrales généralement loin de villes, elles frappent moins l'imaginaire qu'une épaisse fumée noire s'échappant d'une vieille voiture diesel mal entretenue. Le possesseur d'une VE a donc moins l'impression de polluer et risque de rouler plus. Cette impression est d'ailleurs renforcée par la publicité et toute la communication faite autour de la VE par les constructeurs. Ceux-ci n'hésitent pas à parler de « voiture verte » ou de « voiture propre » et à utiliser des symboles de la nature (feuilles, air pur, éoliennes) y compris jusque sur le tableau de bord du véhicule, pour vanter les vertus écologiques de leurs voitures. On peut ainsi voir un arbre qui perd ou gagne des feuilles en fonction de la consommation du véhicule dans une Honda Insight⁹² ou des papillons faisant référence à l'effet du même nom⁹³ dans une Ford Focus électrique.

Comme le souligne Kendall, l'Histoire nous enseigne que les gains en efficacité énergétique sont souvent compensés par une augmentation de la demande, à la fois par une augmentation de la fréquence d'utilisation et du nombre d'unités utilisées [Kendall, 2008 : 182]. Si on pose comme postulat que la VE émet 50% de GES en moins que la VT mais que par ailleurs son coût d'utilisation étant environ 50% plus faible (par rapport à un véhicule roulant au diesel) elle est deux fois plus utilisée, l'effet positif est alors nul en terme d'émissions de GES. Dans ce scénario par contre, la pollution atmosphérique resterait fortement diminuée mais uniquement localement, puisque déplacée vers les centrales de production d'électricité, et au total augmentée puisque la réduction que permet la VE est pour cet incidence inférieure à 50%.⁹⁴ Pire, comme le VE n'offre pas de réduction des autres incidences de la voiture individuelle (mis à part éventuellement le bruit) telle que l'utilisation de l'espace, la congestion urbaine ou les accidents, le bénéfice net pour la société serait négatif en cas d'augmentation de l'utilisation de l'automobile, même électrique.

Il existe aussi un risque d'effet rebond énergétique. En admettant l'hypothèse que la quantité de pétrole disponible est limitée et sera bientôt décroissante alors que la consommation continue à augmenter (ce qui la rendra donc de plus en plus chère) notamment de par la demande émanant du parc automobile qui va continuer à s'étendre, l'introduction de VE pourrait très bien s'ajouter aux VT au lieu de se substituer à elles. Les VE n'utilisant pas de pétrole, elles pourraient avoir un effet d'atténuation de l'augmentation du prix du

91 Nous empruntons ici la classification en 4 types d'effets à Inter-Environnement Wallonie [IEW, 2010]

92 Voir <http://www.moteurnature.com/actu/2009/honda-insight-hybride-2.php>

93 L'idée prônée est que le bien que le propriétaire de cette VE fait à la nature a des répercussions jusqu'à l'autre bout de la planète. Voir <http://www.youtube.com/watch?v=2KtdOu6xIQY> et <http://green.autoblog.com/2011/01/20/lignotock-new-ford-focus-electric/>

94 Pour la part qui est produite à partir de combustibles fossiles. Une situation où l'électricité est produite à base de sources d'énergie renouvelables modifie positivement cette situation.

carburant des VT qui n'augmenterait pas dans les mêmes proportions que si les VE n'étaient pas présentes. Les VE permettraient donc de poursuivre l'augmentation du parc automobile même dans un scénario de carburant d'origine pétrolière plus rare.

II.3.6.2. Effet d'aubaine

La société dans laquelle nous vivons est construite autour de l'automobile individuelle. L'industrie automobile a donc fort logiquement prospéré, spécialement après la seconde guerre mondiale, au point de pouvoir dans une certaine mesure dicter ses propres règles. Pour preuve le refus systématique pendant de nombreuses années de se soumettre à une limitation des rejets de CO₂ des véhicules. Devant la pression de la Commission européenne, l'industrie a fini par accepter en 1998 des mesures mais à la condition qu'elles ne soient pas contraignantes.⁹⁵ Celles-ci n'ayant pas été respectées, le Parlement européen et le Conseil ont proposé en 2007 une limite obligatoire en prévoyant des pénalités financières par véhicule vendu dépassant le seuil défini.⁹⁶ Finalement un accord a été trouvé en 2008 pour limiter les rejets de CO₂ à 130 g par km pour 2015 et à 95 g par km pour 2020.⁹⁷ La voiture a aussi exercé une certaine fascination, incarnant des valeurs de liberté, de progrès et de réussite sociale alors qu'aujourd'hui son image est quelque peu ternie par les problèmes de pollution et de sécurité routière.

La VE est dès lors vue, par l'industrie automobile, comme une triple réponse face aux crises actuelles de la société. Réponse à la crise énergétique, dans un contexte de rareté et de fin de l'énergie abondante et bon marché, la VE apparaît comme une solution très sensiblement moins énergivore que la VT. Réponse à la crise pétrolière, dans un futur plus ou moins proche de raréfaction et donc d'augmentation du prix du pétrole, substituer l'électricité au carburant fossile apparaît comme un choix payant à long terme. Réponse à la crise écologique enfin, en diminuant très fortement les émissions de CO₂ et en supprimant la pollution atmosphérique locale, voire en omettant de les signaler par des slogans trompeurs. Mais la VE est aussi pour l'industrie automobile une volonté de se repositionner comme les fabricants d'un produit dans l'air du temps. La mode actuelle est à l'écologie et malgré son statut privilégié, l'automobile n'échappe pas aux règles de la consommation. Pour être acheté, un produit de consommation doit véhiculer une image qui séduit l'acheteur et celui-ci semble porter aujourd'hui son choix sur des produits qu'il perçoit comme plus respectueux de l'environnement.

Mais fondamentalement le règne de l'automobile n'est pas remis en question. Ce qu'on voit au contraire c'est que les constructeurs essayent, dans un cadre de logique capitaliste, de garder leur position dominante dans l'offre de transport, en maintenant le modèle d'un véhicule personnel, surdimensionné, produit en masse et propriété de son utilisateur.

II.3.6.3. Effet d'addition

La VE ne peut pas rivaliser avec une VT sur le plan du rayon d'action, en l'état actuel du développement technologique des batteries. Par rapport à un réservoir de VT, les batteries ne contiennent que peu d'énergie et nécessitent de longues heures pour être rechargées. Les automobilistes habitués à un réservoir rapidement rempli de carburant et contenant assez d'énergie pour permettre de parcourir plusieurs centaines de

95 La promesse était de réduire les rejets de CO₂ à 140g par km pour l'ensemble des immatriculations annuelles de voitures dans la CE. L'objectif devait être atteint en 2008 pour les constructeurs européens et en 2009 pour les constructeurs asiatiques. Voir :

http://europa.eu/legislation_summaries/internal_market/single_market_for_goods/motor_vehicles/interactions_industry_policies/l28055_fr.htm

96 Voir

http://europa.eu/legislation_summaries/internal_market/single_market_for_goods/motor_vehicles/interactions_industry_policies/l28200_fr.htm

97 Voir http://ec.europa.eu/clima/policies/transport/vehicles/cars_en.htm

kilomètres ne retrouveront pas cette facilité avec une VE. Or les automobilistes ont tendance à acheter un véhicule qui puisse satisfaire l'utilisation maximale qu'ils en feront, quand bien même celle-ci est très peu fréquente. De plus la norme sociale dominante est la possession de voitures plutôt que le partage ou la location. Dès lors une VE risque de ne pas être considérée comme pouvant remplir le rôle de véhicule unique et d'obliger à l'achat d'un second véhicule pour couvrir l'ensemble des usages.

Cette situation est d'abord néfaste pour l'environnement puisque nous avons vu qu'une partie, certes non majoritaire mais pas négligeable des incidences d'une voiture proviennent de sa construction et de son recyclage en fin de vie. Ensuite se pose le problème de l'encombrement urbain et de l'utilisation induite par la simple présence d'un plus grand nombre de voitures. Mais il existe aussi une incidence sociale à cette situation : seuls les ménages à hauts revenus peuvent se permettre d'avoir plusieurs véhicules. Dès lors les ménages à faible revenu seraient de fait exclus des avantages liés à l'utilisation d'une VE.

II.3.6.4. Effet de substitution

La VE est surtout attractive dans le cadre d'un usage urbain. Elle permet de réduire la pollution atmosphérique locale, elle peut diminuer la pollution sonore et son rayon d'action la limite à des trajets autour d'une centaine de kilomètres avant de devoir être rechargée. Les constructeurs ne s'y sont d'ailleurs pas trompés, puisqu'un grand nombre de VE sont soit de strictes deux places, soit des voitures citadines. Le Parlement européen ne dit pas autre chose quand, dans une résolution du 6 mai 2010, il souligne que « (...) *en Europe, un grand nombre de villes et de zones urbaines densément peuplées présentent les conditions adéquates pour un lancement rapide des voitures électriques (...)*». ⁹⁸

Or en la cantonnant à la ville, la VE risque fort d'entrer en concurrence et de se substituer à des modes de déplacements bien plus efficaces (et environnementalement meilleurs) comme la marche, le vélo et surtout les transports en commun. Ce phénomène a déjà été observé pour des villes françaises comme Nantes et Grenoble, où la décision de desservir le centre-ville avec un tramway censé réduire la congestion automobile n'a pas eu les effets escomptés. Une étude a révélé que malgré un taux d'occupation important, les tramways n'ont pas détourné fortement les automobilistes de leurs voitures, mais plutôt attiré les usagers du bus supprimé, les fatigués de la marche ou du vélo, voire augmenté la mobilité en attirant simplement de nouveaux usagers qui auparavant ne se déplaçaient pas [Dobruszkes, 2009 : 138].

II.3.7. Conclusion

Malgré la promesse d'une diminution des émissions de GES, l'adoption de la VE comme remplaçant de la VT ne permet pas de réduire suffisamment ces émissions, au regard des objectifs fixés par le GIEC. La situation est bien sûr très dépendante de la façon dont l'électricité est générée mais au-delà de cette question, le coût de la mise en place d'un parc automobile utilisant la propulsion électrique est tellement supérieur à celui d'autres initiatives qu'il ne devrait pas constituer une priorité. En ce qui concerne les autres nuisances de la voiture, le bruit serait grandement diminué uniquement à des vitesses en dessous de 50 km par heure et il faudra alors ajouter un avertisseur sonore à la VE pour des questions de sécurité routière. L'utilisation de l'espace en ville serait sans doute peu affectée par le remplacement des VT par des VE, sauf si les limites de ces dernières ne poussent à l'augmentation de la pluri-motorisation des ménages, c'est-à-dire la part des ménages qui disposent de plusieurs véhicules.

La VE permet de faire appel à une plus grande diversité de sources d'énergie puisque l'électricité peut être générée de multiples façons. Par contre les batteries actuelles risquent, de par l'utilisation de matières premières rares, de conduire à une situation proche de ce qui existe aujourd'hui avec le pétrole. Notons aussi

98 Voir <http://www.europarl.europa.eu/sides/getDoc.do?pubRef=-//EP//TEXT+TA+P7-TA-2010-0150+0+DOC+XML+V0//FR>.

qu'au niveau financier, le VE à un coût d'achat nettement plus élevé (à cause de la batterie) que le VT alors que les coûts de fonctionnement sont nettement plus faibles (en raison de l'efficacité meilleure et de la différence de taxation entre les carburants automobiles et l'électricité). La VE oblige enfin l'automobiliste à modifier ses habitudes, puisque à moins de pouvoir bénéficier d'un système d'échange de batteries, celles-ci doivent être rechargées régulièrement et longtemps, ce qui implique de devoir disposer d'un lieu adéquat pour réaliser la recharge.

Si la VE dispose d'atouts certains, elle pose aussi des questions, en dehors de considérations techniques, sur son opportunité environnementale. Nous avons identifié un certain nombre de risques d'effets pervers à l'utilisation de la VE,⁹⁹ à savoir :

- effet rebond : les gains environnementaux que permettent de réaliser la VE seraient absorbés voire aggravés par l'augmentation de la mobilité ;
- effet d'aubaine : la VE ne serait qu'une mutation de la VT permettant aux constructeurs de sauver leur position dominante en maintenant le modèle de mobilité individuelle motorisée face à la triple crise (énergétique, pétrolière et écologique) que la société traverse ;
- effet d'addition : la VE étant limitée en autonomie, elle ne remplacerait pas la VT mais ne serait qu'un véhicule de plus ;
- effet de substitution : plutôt que de remplacer la VT, la VE qui est principalement destinée à des trajets relativement courts, ne ferait que remplacer des modes de déplacement ayant moins d'impacts pour l'environnement qu'elle-même comme les transports en commun ou la mobilité active (marche et vélo).

99 Rappelons que la classification en 4 types d'effets est empruntée à Inter-Environnement Wallonie [IEW, 2010].

II.4 Politiques publiques

Il existe à vrai dire un très grand nombre de politiques publiques qui influencent, de près ou de loin, différents aspects des VE. Pour essayer de s'y retrouver, nous commencerons par tenter d'en faire une catégorisation, ensuite nous donnerons deux exemples de politiques publiques (un en Europe et un autre aux États-Unis) en essayant de voir quels sont les buts poursuivis. Enfin, nous donnerons quelques exemples de politiques publiques européennes.

II.4.1. Catégorisation des types de politiques publiques

Il existe une large gamme de moyens d'action pour les politiques qui souhaitent intervenir sur le marché de la voiture électrique, pour autant qu'ils jugent pertinent de le faire. Afin de gagner en lisibilité, voici une tentative de catégorisation de ces différents outils.¹⁰⁰ Notons préalablement que comme toujours pour ce type d'exercice de généralisation, certaines initiatives peuvent être rangées dans plusieurs catégories ou se trouver à la frontière de quelques-unes.

II.4.1.1. Incitants financiers

Une première famille d'incitants financiers sont ceux qui sont directement destinés aux acheteurs. Afin de soutenir la vente de VE, leur prix d'achat peut être diminué, soit par une prime à l'achat, qui est directement remboursée à l'acheteur, soit par une mesure fiscale, à savoir une réduction d'impôt (l'automobiliste peut diminuer ses impôts d'un montant fixe). Les coûts liés au véhicule peuvent aussi être diminués. Soit fiscalement, par un allègement de la taxe unique ou de la taxe annuelle (appelées respectivement taxe de mise en circulation et taxe de roulage en Belgique) qui sont en Europe de plus en plus souvent liées aux émissions directes de CO₂ et dès lors nulles pour les VE. Soit sous forme de réductions diverses, comme l'exemption de paiement de certains droits de passage (par exemple la *congestion tax* dans le centre de Londres¹⁰¹). Notons également que les VE bénéficient *de facto* d'un incitant financier pour l'énergie utilisée, puisque les carburants à destination automobile sont très lourdement taxés (par le système des accises) alors que l'électricité ne connaît pas ce type de taxation spécifique. Certains pays ou régions fiscalement autonomes réfléchissent déjà à l'opportunité de corriger cette distorsion qui pourrait gravement affecter les finances publiques en cas d'adoption massive de VE. Trois états des États-Unis pensent par exemple à mettre en place une taxe spéciale pour les VE, basée sur la distance parcourue.¹⁰²

Une seconde famille d'incitants financiers sont ceux qui sont destinés à l'industrie automobile. Celle-ci peut soit recevoir directement de l'argent public sous forme de subsides ou de prêts pour soutenir financièrement notamment ses activités de recherche et développement. C'est le cas par exemple aux États-Unis où des prêts importants ont été accordés pour aider à la mise sur le marché de véhicules « plus propres ». Soit l'État peut décider de soutenir indirectement l'industrie en montrant l'exemple, c'est-à-dire en équipant ses services ou des sociétés qu'il détient (au moins en partie) de flottes plus ou moins grandes de VE. Le constructeur automobile bénéficie dès lors à la fois de tests grandeur nature, d'un client qui s'engage à lui acheter un certain volume de véhicules et de publicité pour ses produits. C'est le cas par exemple de la poste française qui a récemment déployé 250 camionnettes de livraison à propulsion électrique et compte à terme augmenter ce nombre à 10.000 unités.¹⁰³

100 Cette catégorisation se base sur le travail de [Zimmer, 2009].

101 Voir <http://www.tfl.gov.uk/roadusers/congestioncharging/17094.aspx>

102 Cette taxe est à l'étude dans les états de Washington, de l'Oregon et du Texas. Voir : <http://green.autoblog.com/2011/03/24/oregon-washington-texas-taxing-electric-cars-gas-tax/s>

103 Voir le dossier de presse :

http://www.laposte.fr/content/download/8720/63454/file/dossier_presse_voitures_electriques_octobre_2010.pdf?esp

II.4.1.2. Incitants non financiers

Cette catégorie regroupe l'incitation par des mesures non directement financières qui rendent l'usage de la VE plus agréable ou plus pratique en réservant des services ou des lieux pour les VE. C'est par exemple la possibilité de garer et de recharger son véhicule dans certaines zones spécialement prévues à cet effet et réservées à ce type de véhicule. Soit en permettant aux VE de faire usage, à titre d'exception, de lieux réservés normalement à d'autres véhicules, comme la possibilité de circuler sur les voies réservées aux bus dans les villes ou aux véhicules à taux d'occupation élevée¹⁰⁴ sur les autoroutes.

II.4.1.3. Législation

Le secteur automobile qui se caractérise par une certaine inertie de ses produits, notamment due à des temps de recherche et des investissements financiers importants, estime qu'il convient d'avoir une vue claire sur la réglementation qui va lui être appliquée pour pouvoir mettre sur le marché des VE. On a pu voir que certains efforts ont été faits visant à réduire les émissions de CO₂ des voitures et selon l'industrie, c'est le cadre réglementaire, en l'occurrence les normes européennes, qui a rendu ces efforts possibles en donnant aux constructeurs automobiles un signal fort sur la direction à prendre pour leurs investissements [Zimmer, 2009 : 76]. Dans les cas de la VE, la législation peut donc jouer un rôle si la volonté de la soutenir est jugée opportune, en incitant les constructeurs à poser des choix technologiques poursuivant un but défini par le législateur.

II.4.1.4. Financement et coordination de l'infrastructure

Comme expliqué précédemment, la mise en place d'un réseau de bornes de recharge qui vise d'abord à augmenter l'autonomie limitée par les batteries actuelles mais aussi certainement à rassurer l'utilisateur de VE, peut avoir un impact important sur la transition vers ce type de véhicule. Pourtant, ces bornes étant relativement onéreuses, le coût d'investissement est important et ne pourra sans doute pas être supporté uniquement par le secteur privé qui en appelle dès lors à l'aide des pouvoirs publics. Par ailleurs il convient de coordonner l'implantation de ces bornes, pour éviter qu'elles ne fleurissent uniquement où il est le plus rentable de les mettre, mais qu'au contraire elles soient réparties avec cohérence.

II.4.1.5. Standardisation

La réalité du monde automobile aujourd'hui est la domination quasi exclusive du moteur à combustion interne. Pour que des VE puissent trouver leur place, il faudra faire un effort de standardisation principalement en ce qui concerne le rechargement de celles-ci. En effet, à l'heure actuelle, les prises servant à les recharger peuvent être différentes d'un pays à l'autre.¹⁰⁵ Les États-Unis ont décidé d'adopter une prise (SAE J1772¹⁰⁶) différente mais compatible avec celle utilisée au Japon (IEC 62196-2¹⁰⁷) mais l'industrie automobile européenne est pour le moment en train de se choisir un autre standard. En Europe à l'heure actuelle, les constructeurs allemands se sont mis d'accord sur l'utilisation d'une prise développée en Allemagne mais se sont heurtés à l'hostilité des constructeurs français et italiens. Il semble dès lors qu'on se

ace=groupe

104 Traduction de HOV Lane (*High Occupancy Vehicle Lane*), concept né en Amérique du Nord et qui réserve sur les autoroutes une voie de circulation pour les véhicules qui transportent plusieurs passagers. Le but est de diminuer la congestion des routes en incitant les conducteurs solitaires à augmenter le taux de remplissage de leurs véhicules.

105 Les bornes de recharge existant en France sont par exemple d'un type qui sera incompatible avec les VE mises actuellement sur le marché.

106 L'acronyme SAE correspond à la Society of Automobile Engineers, un organisme de certification actif dans le domaine de la mobilité. Voir <http://www.sae.org/>

107 L'acronyme IEC correspond à l'International Electrotechnical Commission, un organisme de certification qui existe depuis plus d'un siècle et n'est lié à aucun gouvernement. Voir <http://www.iec.ch/>

dirige vers un désaccord qui devra être tranché par les instances européennes. Au-delà de l'Europe, il apparaît donc comme plus que probable qu'une prise unique n'existera pas, ce qui ne devrait néanmoins pas poser de problème pour l'automobiliste, une VE n'étant pas vraiment destinée à traverser des continents. Par contre les constructeurs auraient tout intérêt à se mettre d'accord entre eux et avec les autorités de certification des différents états pour pouvoir faire des économies d'échelle en proposant un véhicule compatible dans le maximum de régions.

Comme nous l'avons déjà évoqué, un autre domaine qui mériterait d'être standardisé est le système de test de consommation et d'émission des véhicules. Le but pourrait être double : permettre à ces tests de prendre en compte les spécificités des VE et en profiter pour les rendre plus proches de la réalité, quel que soit le type de véhicule concerné. S'il était possible aussi de dépasser les intérêts industriels continentaux et de se mettre d'accord sur un test valable au niveau mondial, plutôt que de se retrouver avec des tests japonais, américains et européens donnant des résultats assez différents comme c'est le cas aujourd'hui, ce serait bien sûr encore préférable.

II.4.1.6. Comportement du consommateur

Malgré une meilleure connaissance de la part d'une grande partie de la population des problématiques environnementales, force est de constater qu'on assiste peu à des changements d'attitudes, notamment dans le domaine des transports. La voiture individuelle à moteur à combustion interne reste pour toute une série de raisons le modèle dominant et il est donc utile de comprendre ce qui peut empêcher l'automobiliste de faire le pas vers une VE. Pour ce faire des études sont réalisées, notamment en mettant des VE à disposition de groupes d'automobilistes, afin de permettre d'avoir une meilleure idée de leur façon d'utiliser ce type de véhicule. Ces études sont soit le fait des constructeurs qui veulent tester sur le terrain leurs VE, soit le fait des pouvoirs publics qui voient dans la VE une piste intéressante à étudier pour sortir du paradigme dominant.

Le grand public attend bien souvent d'une VE la même chose que ce qu'il obtient d'une VT. Or ces attentes en raison de la batterie (rayon d'action limité et temps de « recharge en énergie » plus long) ne sont pas réalistes. Par ailleurs et même si cette situation commence à changer, la VE est encore souvent perçue comme une « sous-voiture », tout juste adéquate pour se déplacer sur un terrain de golf. Il convient donc d'informer les automobilistes sur les avantages de la VE et sans doute aussi sur l'usage véritable qu'ils font de leur propre véhicule, dont la capacité excède souvent largement leurs besoins réels.

II.4.2. Exemples de politiques publiques

II.4.2.1. Subsidés à l'achat

Des primes existent dans de nombreux pays, qui visent à encourager l'achat de véhicules particuliers, moins émetteurs de CO₂, dans le but de faire diminuer ces émissions. On a vu fleurir ce type de subsides dans un grand nombre de pays d'Europe de l'Ouest et il devient à vrai dire difficile d'en trouver aujourd'hui qui ne favorisent pas d'une façon ou d'une autre l'achat de véhicules émettant peu de CO₂. Nous nous pencherons sur le cas de la France, qui est à notre avis particulièrement représentatif de ce type de subside. En France, le système est censé être financièrement en équilibre. Un bonus diminue le prix des véhicules peu émetteurs, dont le montant total est compensé par un malus qui augmente le prix des véhicules les plus émetteurs.¹⁰⁸ Cependant plusieurs failles sont rapidement apparues dans ce système.

D'abord parce qu'il n'est pas demandé quel véhicule est remplacé par celui qui est acheté. Il est donc tout à

108 La VE bénéficie ainsi par exemple d'une prime à l'achat de 5000 € au titre de voiture émettant moins de 60 gCO₂/km Pour les montants exacts et les tranches des primes voir http://www.economie.gouv.fr/discours-presse/discours-communiques_finances.php?type=communiqu&id=4886

fait possible que le véhicule remplacé n'émettait pas tellement davantage que le nouveau. Rappelons que d'après les calculs de l'ADEME¹⁰⁹, comme il faut compter que chaque tonne de voiture construite émet environ 5,5 tonnes de CO_{2e}, il faut dans certains cas parcourir un grand nombre de kilomètres pour justifier l'achat d'un nouveau véhicule au regard des gains en émissions de CO₂. Prenons l'exemple d'une voiture de taille modeste, d'une masse de 1,2 tonne et qui consomme 55 gCO₂ par km de moins que la voiture qu'elle remplace. Il faudra à cette nouvelle voiture moins émettrice parcourir environ 120.000 km pour arriver à un statu quo en termes de rejets de CO₂. Dans le cas d'une VE, ce coût serait sans doute remboursé plus rapidement mais il reste que ce calcul ne semble pas pris en compte lors de l'octroi de ce subside.

Ensuite, et même si ce n'est pas le propos de ce travail, en ne se focalisant que sur le CO₂, il a été vendu principalement de petits véhicules diesel peu coûteux et donc sans filtre à particules (FAP) ce qui certes diminue le CO₂ mais est aussi extrêmement polluant en termes de PM. Cette situation s'est améliorée avec l'entrée en vigueur de la norme Euro5 qui rend les FAP obligatoires pour les véhicules particuliers utilisant le diesel, mais comme l'inertie du parc automobile est assez grande, on peut se demander si une quelconque vision à long terme avait été prise en compte lorsque ce type de mesure a été prise.

Par ailleurs, le système prévu pour être financièrement en équilibre, a rencontré un tel succès qu'il ne l'est en fait pas du tout et qu'il commence même à être sérieusement remis en question tant il est onéreux.¹¹⁰ La conséquence de ce déséquilibre est que le remplacement d'une partie du parc automobile ne profite qu'à certains mais coûte cher à l'ensemble des contribuables.¹¹¹

On peut donc sérieusement se demander si ce n'est pas un subside octroyé par le gouvernement français au secteur automobile en crise, déguisé sous forme de bonus visant à promouvoir un achat prétendument écologique. D'autant que pour le cas de la France, ce système de bonus-malus a permis de mettre sur le marché un grand nombre de véhicules relativement petits et roulant au diesel, segment sur lequel les marques nationales (Renault, Peugeot et Citroën) étaient justement très bien représentées.

Plus fondamentalement, le soutien public à un mode de transport montre, par opposition à d'autres modes qui ne sont pas soutenus, quels choix le législateur souhaite encourager. Et avec cet encouragement, c'est en fait un modèle de mobilité et par-delà de société qui est prôné et soutenu. L'Etat belge prévoit ainsi une réduction d'impôts dont bénéficient les acheteurs d'une VE, à hauteur de 30% du montant d'achat du véhicule, plafonné à 9.000 euros. Cette réduction est valable pour les achats de voitures, voitures mixtes et minibus en 2010. Pour l'année 2011 le plafond est porté à 9.190 euros. Par ailleurs les motocyclettes, les tricycles et les quadricycles électriques donnent également droit à une réduction d'impôt à hauteur de 15% elle aussi plafonnée, alors que l'achat de mobylettes et de vélos électriques n'est pas aidé par ce dispositif.¹¹² On peut dès lors résumer la situation en disant que la hauteur du subside est proportionnelle à la masse – et donc aussi à la consommation énergétique – du véhicule. La Wallonie est encore plus généreuse à l'égard des acheteurs de VE puisque cette région a décidé le 13 juillet 2011 de leur offrir, en plus du confortable avantage fiscal octroyé par l'Etat fédéral, un « éco-bonus » de 4.500 euros. C'est le montant prévu par le nouveau système wallon de subsides à l'achat de véhicules peu émetteurs de CO₂ pour l'acquisition de véhicules émettant directement 0 g de CO₂/km, c'est-à-dire en pratique, uniquement les VE. Il n'existe à notre connaissance pas une seule région au monde où l'acheteur de VE est plus aidé par les pouvoirs publics

109 Voir [ADEME, 2007 : 60-63].

110 Le coût était environ de 500 millions d'euros en 2010. Voir http://www.lepoint.fr/le-cout-du-bonus-malus-ecologique-dans-l-automobile-a-explose-21-09-2010-1238979_19.php

111 Le même constat a été fait en Belgique où le système de subsides aux voitures moins émettrices des CO₂ a coûté environ 40 millions d'euros en 2008, environ 60 millions d'euros en 2009 et en 2010 pas moins de 231 millions d'euros. Voir http://archives.lesoir.be/les-primas-aux-voitures-moins-polluantes-ont-augmente_t-20091223-00RHXC.html et <http://www.lalibre.be/actu/belgique/article/647752/231-millions-d-de-primas-federales-pour-des-voitures-propres.html>

112 Voir <http://www.minfin.fgov.be/portail2/fr/themes/transport/vehicules-electric.htm>

pour l'achat de son véhicule.¹¹³

En ce qui concerne plus spécifiquement les VE, il convient à notre avis d'ajouter un autre problème au système de subsides à l'achat : le risque majeur d'aggravation des inégalités sociales. Les voitures électriques, bien que moins coûteuses à l'usage, resteront plus onéreuses à l'achat (à court et moyen terme certainement) et ne pourront donc pas être achetées par les couches de population les moins fortunées. Or en les subsidiant lourdement, on finance avec l'argent de tous l'achat de véhicules par les plus fortunés qui permettront *in fine* seulement à ces derniers de réaliser des économies sur les coûts d'utilisation du véhicule. On utilise donc l'argent public pour permettre à quelques-uns, parmi les plus nantis, de bénéficier de cette nouvelle technologie. La pertinence de cette politique pose question puisqu'elle socialise les investissements tout en individualisant les bénéficiaires.

Par ailleurs, le système de subsides à l'achat est à notre avis intrinsèquement problématique. Il vise à orienter le comportement du consommateur en modifiant le prix d'un produit mais présuppose que les constructeurs jouent vraiment le jeu. Or le marché automobile n'est pas parfait et on peut donc se demander à qui ces primes profitent vraiment. Une fois celles-ci connues des constructeurs, comment être sûr qu'ils ne vont pas augmenter le prix de vente des VE du montant de cette prime, par rapport au prix auquel ils pensaient pouvoir vendre le véhicule ?¹¹⁴ Il arrive même de lire dans des interviews de responsables de l'industrie automobile que dès que les subsides diminueront, ils diminueront le prix de vente de leur VE d'un montant équivalent. On le voit également dans la publicité où les constructeurs affichent constamment des prix dont les primes sont déjà déduites. Les subsides qui sont connus des constructeurs seraient donc intégrés dans le prix de vente et donc davantage un cadeau indirect fait à l'industrie automobile plutôt qu'un incitant pour l'acheteur à se diriger vers un véhicule réputé « plus écologique ».

II.4.2.2. Soutien à l'industrie

Suite à la crise économique qui a frappé le monde en 2008, les Etats-Unis ont décidé de relancer l'économie par divers plans massifs d'investissement. Un de ces plans, publié le 5 novembre 2008 est l'*Advanced Technology Vehicles Manufacturing Loan Program* (ATVMLP).¹¹⁵ Ce programme a pour ambition de prêter 25 milliards de dollars aux constructeurs automobiles et aux fabricants d'équipements automobiles qui développent des projets industriels visant à réduire la consommation des véhicules. Il vise avant tout la transformation d'usines existantes mais aussi la recherche et le développement de nouvelles technologies, si leur finalité est la diminution de la consommation. Au début de cette année, environ un tiers de ce montant avait déjà été prêté à quatre constructeurs selon la répartition suivante :

Tableau 10 : Montant et destination des prêts alloués dans le cadre de l'ATVMLP

Constructeur automobile	Montant	Destination
Ford Motor Company	5,9 milliards de dollars	Transformer différentes usines afin de diminuer les consommations en carburant d'une douzaine de modèles. ¹¹⁶
Nissan	1,4 milliards de dollars	Transformer une usine destinée à produire une VE

113 Cette décision semble assez malheureuse d'autant que le même parlement avait refusé de subsidier quelques semaines auparavant les vélos électriques qui constituent à notre avis un choix environnemental et énergétique plus pertinent, comme nous le détaillerons au chapitre III.6. Voir <http://www.iew.be/spip.php?article4294>

114 A titre d'exemple nous avons personnellement assisté à une augmentation du prix d'un vélo électrique sur le site <http://www.evstart.be>, le jour même de l'entrée en vigueur de la prime fédérale pour ce type de produits, et d'un montant quasiment identique à celui de ladite prime.

115 Voir <http://www.energy.gov/news/archives/6709.htm>

116 Voir communiqué de presse : <http://www.energy.gov/news/8023.htm>

		existante (Nissan Leaf), construire une usine de production de batteries pour VE. ¹¹⁷
Tesla Motors	465 millions de dollars	Transformer une usine destinée à produire une VE en développement (Tesla Model S), construire une usine de production de batteries et de chaînes de traction électrique. ¹¹⁸
Fisker Automotive	528,7 millions de dollars	Développement de deux VEHR (Fisker Karma et Fisker Nina). ¹¹⁹

(source : US Department of Energy)

Il convient de rappeler que ce programme n'a rien à voir avec les prêts accordés en 2008 et 2009 pour sauver différentes entreprises, notamment General Motors qui s'était vue octroyer 50 milliards de dollars pour éviter la faillite qui devait finalement quand-même se produire.¹²⁰

A la lecture de ces montants, de leurs destinations et des constructeurs qui vont en bénéficier, on peut se poser la question de savoir à qui profite vraiment ces prêts. La situation semble en fait proche de celle mise en place par le système français de bonus-malus. La plus grosse part des prêts est destinée à Ford qui va améliorer ses VT ce qui n'est pas condamnable en soi, mais ne va pas résoudre les défis auxquels le secteur des transports fait face. En effet, le nombre de véhicules en circulation et les distances parcourues augmentent plus vite que les progrès réalisés en matière d'efficacité des moteurs. Les 2,5 milliards de dollars restants sont prêtés à Nissan, pour le soutien à la construction de la *Leaf*, une VE relativement grand public, et à deux constructeurs automobiles plus confidentiels. Le premier de ces constructeurs est Tesla, qui ne commercialise pour le moment qu'une VE de sport au coût exorbitant et qui a reçu le prêt pour accélérer la mise sur le marché d'une VE berline dont le prix tournerait autour de 60.000 dollars, prévue pour 2012. Le second est Fisker, qui est encore moins avancé dans ses projets automobiles, puisqu'il n'a encore mis aucun véhicule sur le marché à l'heure actuelle. Les deux modèles qu'il proposera seront des voitures de luxe, dont le prix devrait être de 85.000 dollars pour le premier qui sortira fin 2011 et de 50.000 dollars pour le second prévu pour 2012.¹²¹ Il semble donc que mise à part éventuellement le cas de la Nissan Leaf, les véhicules soutenus par ces prêts - en dehors de la question de savoir s'ils peuvent participer à résoudre les problèmes liés aux transports - sont en raison de leur prix, loin d'être susceptibles d'être achetés en masse.

Il s'agit à notre avis en fait plutôt de protectionnisme économique d'une part et de pressions pour la sauvegarde d'emploi d'autre part, dont ne semble même pas se cacher les instigateurs du programme. On peut en effet lire dans les communiqués de presse le nombre d'emplois créés ou sauvegardés grâce aux prêts accordés.¹²²

II.4.3. Politiques de l'Union Européenne

II.4.3.1. La réglementation sur les rejets de CO₂

Le règlement CE 443/2009 sur les rejets de CO₂ des voitures publié en 2009¹²³ prévoit une moyenne de rejets

117 Voir communiqué de presse : <http://www.energy.gov/news/8581.htm>

118 Voir communiqué de presse : <http://www.energy.gov/news/7544.htm>

119 Voir communiqué de presse : <http://www.energy.gov/news/8050.htm>

120 Voir <http://www.nytimes.com/2011/01/28/business/28auto.html>

121 Les prix et date de sortie de ces différents modèles sont issus de différentes sources (dont les constructeurs eux-mêmes) mais sujets à caution, étant donné que par le passé ils ont changé.

122 Pour la liste du nombre d'emplois créés ou sauvegardés voir : https://lpo.energy.gov/?page_id=45

123 Son nom complet est « Règlement (CE) n° 443/2009 du Parlement européen et du Conseil du 23 avril 2009 établissant des normes de performance en matière d'émissions pour les voitures particulières neuves dans le cadre de

par constructeur limitée à 130 g de CO₂ par km pour 2015 et à 95 g de CO₂ par km pour 2020. Afin d'accompagner les constructeurs dans ces efforts de réductions, la mesure est d'application de façon progressive : à partir de 2012 ce sont 65% des véhicules qui doivent respecter cette limite, et chaque année cette proportion augmente pour atteindre 100% en 2015. Cette moyenne est calculée sur l'ensemble des véhicules vendus par un constructeur.¹²⁴ En cas de non-respect de cette limite, les constructeurs devront s'acquitter d'une amende assez dissuasive de 95 € par voiture vendue et par g de CO₂ excédant la limite tolérée.¹²⁵ Cette décision constitue certainement un pas en avant, créant un cadre clair pour les constructeurs et les incitant à faire des efforts pour réduire les émissions des voitures vendues. Pourtant ces mesures décidées portent aussi en elles des risques importants d'effets pervers et de contournement de la règle par les constructeurs automobiles.

Les rejets de CO₂ sont calculés au niveau du pot d'échappement et donc sans aucune considération pour le reste du cycle de vie du véhicule. Les VE qui n'émettent pas directement de CO₂ sont donc considérées par ce règlement comme émettant 0 g de CO₂ par km. Dès lors, puisque le calcul se fait sur la moyenne des ventes, pour chaque VE vendue, le constructeur automobile peut se permettre de vendre une VT émettant le double de la limite autorisée. Le gain en termes d'émissions est donc nul. Pire encore, puisqu'on ne considère que la vente du véhicule et non pas son utilisation, et considérant que la VE actuelle, de par son autonomie limitée, est appelée à parcourir moins de km qu'une VT, le résultat de ce mode de calcul pourrait conduire à une augmentation des émissions de CO₂. Par ailleurs, comme la VE est bien entendu responsable d'émissions, même si celles-ci sont indirectes, le potentiel d'augmentation d'émission est encore aggravé.

En plus de ne prendre en compte que les rejets directs, le règlement prévoit des « bonifications » pour les véhicules émettant moins de 50 g de CO₂ par km, c'est-à-dire dans la pratique, uniquement les VE et les rares voitures à pile à combustible. Selon ce système de bonifications, ces voitures peu émettrices reçoivent une pondération plus lourde, dégressive dans le temps, dans le calcul des émissions moyennes des voitures vendues par un constructeur. En 2012 et 2013 chaque voiture vendue émettant moins de 50 g de CO₂ par km « compte » pour 3,5 voitures, en 2014 pour 2,5 voitures, en 2015 pour 1,5 voiture et à partir de 2016 le système de bonifications disparaît. Dès lors, si un constructeur vend 1% de VE en 2012, le reste de ses ventes (les 99% restants) ne devront émettre en moyenne que 134,72 g de CO₂ par km au lieu des 130 g prévus par le règlement. Autrement dit, pendant les premières années d'application de ce règlement, la vente de VE pourrait substantiellement réduire les efforts à faire par les constructeurs automobiles en termes de réduction d'émission de CO₂. Avec comme conséquence contreproductive de voir en fait les émissions totales augmenter. On comprend que par ce mode de calcul le règlement du Parlement européen et du Conseil entend inciter les constructeurs automobiles à s'engager sur la voie de l'électrification des véhicules. Mais les conséquences prévisibles devraient pousser à trouver d'autres moyens pour y parvenir.

Quand on sait que les constructeurs se sont battus depuis des années contre les réglementations limitant leur liberté de mettre sur le marché des voitures toujours plus puissantes et lourdes, on peut se demander ce qui les a poussés à accepter ce règlement qui a d'ailleurs fait l'objet d'âpres discussions. En première hypothèse on peut se dire que pour nombre d'entre eux, l'objectif semblait atteignable, et même pour certains sans gros

l'approche intégrée de la Communauté visant à réduire les émissions de CO₂ des véhicules légers Texte présentant de l'intérêt pour l'EEE ». Voir <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2009:140:0001:01:FR:HTML>

124 Certains analystes voient dans cette règle la raison de l'arrivée de petites voitures, parfois sous une marque propre, vendues par des constructeurs plus habitués aux grosses cylindrées. A titre d'exemple de ce phénomène, on peut citer les marques BMW et Mercedes-Benz qui outre de grosses berlines traditionnelles, vendent aussi respectivement des MINI et des Smart, voitures aux dimensions et à la consommation (nettement) plus raisonnables.

125 Afin de ne pas trop pénaliser les dépassements légers du seuil fixé, le premier gramme d'émission de CO₂ de dépassement donnera lieu à une amende de 5 €, le deuxième de 15 €, le troisième de 25 € et les suivants de 95 €, et ce jusqu'en 2018. A partir de 2019, chaque gramme de dépassement coûtera 95 € par voiture vendue.

efforts. Une étude de *Transport & Environnement*¹²⁶ révèle qu'en 2009, une diminution de 5,2% de la moyenne d'émission théorique de CO₂ des voitures vendues dans l'ensemble des pays de l'Union européenne (EU27) a été observée. Cette moyenne s'est établie à 145,7 g de CO₂ par km alors qu'elle était encore de 153,5 g en 2008. On peut globalement attribuer cette diminution à la fois pour certains constructeurs à la vente de véhicules plus petits et plus légers et donc moins énergivores (Fiat, Suzuki, Hyundai) et à des réels progrès technologiques effectués par d'autres (Toyota, Mazda, Ford) [T&E, 2010a]. Dès lors quelques constructeurs (Fiat, Toyota, PSA avec respectivement 131, 132 et 136 g de CO₂ par km) étaient déjà proches dès 2009 de la limite prévue pour 2015, alors qu'il leur restait 5 ans avant qu'elle ne soit pleinement effective.¹²⁷

Le risque existe donc que les constructeurs automobiles ne fassent plus d'effort ou en tous cas pas autant qu'ils auraient pu en faire, d'autant plus si on considère la façon de calculer les émissions des VE prévue par le règlement CE 443/2009. Notons à ce propos qu'*a contrario*, le constructeur Nissan qui met sur le marché la « Leaf », première VE produite en grande quantité, occupe l'avant dernière place avec 154 g de CO₂ par km. Voilà en tout cas un constructeur qui doit voir d'un bon œil la bonification prévue par le règlement européen.

Face à ce constat de dépassement des objectifs émis par l'UE, certaines voix se sont fait entendre pour réclamer des objectifs de réduction plus ambitieux, notamment à long terme. Une étude en particulier a tenté de montrer par quels moyens on pourrait atteindre une moyenne de 80 g de CO₂ par km pour les voitures neuves vendues en Europe et ce dès 2020 [Wells, 2010].

II.4.3.2. EU-ETS

Une autre politique européenne qui a une influence sur la VE est le *European Union Emissions Trading Scheme* (EU-ETS). Il s'agit d'un instrument d'incitation à la limitation des émissions de GES provenant des organisations (industrie, producteurs d'électricité, etc.) les plus émettrices et couvrant environ la moitié des émissions de CO₂ de l'UE. Afin d'atteindre ses objectifs de réduction d'émissions de GES, l'Union européenne octroie une quantité définie (et réduite chaque année) de permis d'émettre des GES. Ces permis sont échangeables (sur une bourse d'échanges) afin d'inciter les mesures les plus rentables à être réalisées directement. Ils visent aussi à récompenser les organisations qui font des efforts de réduction en leur permettant de vendre leurs permis d'émission non utilisés. Les producteurs d'électricité étant inclus dans le système, on pourrait à priori croire qu'une augmentation de la consommation d'électricité due à la VE est effectivement non émettrice de GES dans l'UE, puisque les quotas ont déjà été définis. Dès lors, toute augmentation des émissions des producteurs d'électricité devrait être compensée par une diminution dans un autre secteur. Nous allons voir que la réalité n'est pas aussi simple.

Il faut bien souligner que le EU-ETS est un instrument assez novateur et non exempt de critiques. Si en théorie l'idée peut sembler bonne, dans la pratique elle a connu et continue de connaître de nombreux problèmes. D'abord en ce qui concerne la quantité de quotas attribués qui s'est avérée trop importante. Cette situation n'incite donc pas à faire de gros efforts de réduction et par ailleurs le prix du permis s'est révélé très volatil et a même été nul pendant de longs mois de 2007, au début de l'application de l'EU-ETS.¹²⁸

Ensuite, ce système européen de limitation des émissions permet aux organisations qui en font partie, pour atteindre les objectifs qui leur sont fixés, de recourir au *Clean Development Mechanism* (CDM) mis en place

126 Voir <http://www.transportenvironment.org/pages/introduction/>

127 Un graphique animé permet de voir les efforts faits par la plupart des constructeurs présents sur le marché européen pour la période 2004-2009 :
<http://spreadsheets.google.com/pub?key=0AkVhWMoZNE83dHZrTjRSWEtodkZoU2tsZ2NWdWZZWnc&hl=en&single=true&gid=5&output=html>

128 Voir <http://www.pewclimate.org/docUploads/EU-ETS-In-Perspective-Report.pdf>, p13.

par le protocole de Kyoto, à hauteur de 50% maximum.¹²⁹ Le CDM permet aux émetteurs de GES de compenser leurs émissions, en finançant des projets qui contribuent à réduire les émissions de GES dans un pays en développement. Le système de compensation est un sujet délicat, d'abord parce qu'on peut n'y voir qu'une façon de se donner bonne conscience. En effet, les GES sont malgré tout émis dans l'atmosphère et ce n'est que leur comptabilisation qui est évitée. De plus, le CDM fait également l'objet de nombreuses critiques en tant que tel, notamment parce qu'il est difficile de définir si les projets en question ont vraiment été permis grâce au financement dans le cadre du CDM. Certains auteurs estiment que les projets qui auraient de toute façon été menés à bien représentent entre un et deux tiers du total des projets comptabilisés.¹³⁰

Enfin, les quotas sont définis jusqu'en 2020 et seront renégociés pour les années suivantes. Or nous avons vu que même les scénarios les plus optimistes ne tablent pas sur une demande fortement accrue d'électricité due à l'arrivée des VE. On peut donc considérer que les producteurs d'électricité auront à cette date une meilleure vue sur cette possible augmentation de la demande et l'intégreront le cas échéant dans la négociation qui définira l'établissement futur des quotas qui leur seront attribués.

La même réserve peut être formulée en ce qui concerne la directive « Énergie renouvelable » (Directive 2009/28/CE)¹³¹ qui fixe comme objectif en 2020 une part de 20% de sources d'énergie renouvelables dans la consommation énergétique européenne. Prenons le cas d'un automobiliste qui choisit de recharger sa VE via de l'électricité générée à base de source renouvelable et posons-nous la question de savoir si ce choix contribue à diminuer les émissions de GES. La réponse est en réalité négative. Comme l'objectif est fixé en moyenne, si une VE est rechargée via de l'électricité produite à base de source renouvelable, cela permettra de faire moins d'efforts pour une autre utilisation. Autrement dit, cette électricité ne pourra pas être utilisée pour un autre usage. Le bilan net ne sera donc pas une augmentation de la production d'électricité à base de source renouvelable, mais plutôt un transfert d'une utilisation vers une autre. Et les émissions de GES liés à la recharge de la VE devront être considérées comme étant celles de la moyenne de la région concernée [Zimmer, 2009].

II.4.3.3. Livre blanc des transports

Un plan décennal¹³² a été proposé en Mars 2011 par la Commission européenne (CE), visant à exposer sa vision de l'avenir du secteur des transports en Europe, sous le titre de *Livre blanc : Feuille de route pour un espace européen unique des transports – Vers un système de transport compétitif et économe en ressources*. L'objectif phare de cette feuille de route est la diminution de 60% du niveau des émissions de GES dus au secteur des transports par rapport au niveau de 1990, diminution qui doit avoir lieu pour 2050. Comme le rappelle le Livre blanc, cette diminution est moindre que celle préconisée par le GIEC¹³³ pour l'ensemble des émissions de GES, mais la CE estime que l'on peut obtenir des réductions plus fortes dans d'autres secteurs de l'économie. L'effort imposé au secteur des transports est donc plus modeste que celui qui devra être entrepris ailleurs. Un objectif intermédiaire pour 2030 est également prescrit : réduire de 20% les émissions de GES mais par rapport au niveau de 2008, ce qui revient en fait à ne limiter l'augmentation que de 8% par rapport à 1990, compte tenu de la forte augmentation qui s'est produite entre 1990 et 2008.

Pour parvenir à réaliser cette diminution, le Livre blanc exhorte notamment toutes les parties prenantes à

129 Voir Article 11a, point 8 § 5 de la Directive 2009/29/EC <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2009:140:0063:0087:en:PDF>

130 Voir notamment la critique qui émane de Michael Wara et David Victor, deux professeurs de l'Université de Stanford, qui se sont intéressés à la question : http://iis-db.stanford.edu/pubs/22157/WP74_final_final.pdf

131 Voir <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2009:140:0016:0062:fr:PDF>

132 La précédente version date de 2001 et il semble donc que l'on se dirige vers un exercice qui sera réalisé tous les 10 ans.

133 Pour rappel, afin de limiter l'augmentation de la température à 2° par rapport à 1990 et selon les calculs du GIEC, l'UE devra réduire de 80 à 95% ses émissions de GES.

faire en sorte que les transports utilisent « *l'énergie de manière plus limitée et plus propre* » [CE, 2011 : 6]. Plus largement, c'est dans une perspective de développement économique du secteur des transports et donc aussi d'augmentation des flux de transports que le plan de la CE s'inscrit. Il spécifie même explicitement dès le début du texte que « *Freiner la mobilité n'est pas une option* » [CE, 2011 : 6]. On remarque donc que les solutions souvent évoquées ailleurs permettant une diminution des impacts environnementaux par une diminution des besoins en mobilité ne sont pas proposés comme solution. Les solutions préconisant l'usage de transports en commun et la question de l'urbanisation ne sont quant à elles qu'à peine évoquées.¹³⁴ Par ailleurs la prise en compte de la raréfaction du pétrole et l'augmentation de son prix sont clairement identifiées comme des facteurs pouvant diminuer les flux de transports au sein de l'UE.

Le rôle de la VE dans les objectifs identifiés par le Livre blanc n'est pas défini et est à comprendre « en creux », puisqu'il n'est en fait jamais fait mention explicitement de ce type de technologie.¹³⁵ Le terme utilisé est celui de « véhicule propre », et, fidèle à la tradition libérale qui guide ce document, la CE se limite à fixer des objectifs et non pas à choisir des technologies, ce choix devant être fait par le marché. Ce « véhicule propre » est défini comme étant celui qui n'utilise pas les carburants traditionnels, c'est-à-dire équipé d'un moteur non hybride et à combustion interne, et sera donc à court terme *de facto* une VE ou une VEH (rechargeable ou non). Ce « véhicule propre » permettra de réduire la dépendance au pétrole, les émissions de GES et la pollution atmosphérique et sonore locale. Ici aussi un objectif est fixé pour 2050 : éliminer des villes toutes les voitures utilisant du carburant traditionnel.¹³⁶ Un objectif intermédiaire est également proposé pour 2030 : diviser par deux les voitures utilisant du carburant traditionnel et mettre en place une logistique urbaine (transport de marchandises) dépourvue de CO₂ dans les grands centres urbains [CE, 2011 : 10].

Le Livre blanc reprend aussi quelques éléments au niveau du cadre réglementaire, en ne faisant qu'annoncer le travail qui sera fait plus tard. On peut y lire que les normes d'émissions de CO₂ et la façon de mesurer ces émissions devront être revues, notamment pour prendre mieux en compte les émissions en condition d'utilisation réelle. Par ailleurs, la fixation de règles sur l'interopérabilité des infrastructures de chargement, qu'on peut traduire par bornes de recharge pour les VE, est rappelée [CE, 2011 : 28]. On peut aussi lire que le coût total de la modernisation des infrastructures, rien que pour les 20 prochaines années, a été estimé à 1500 milliards d'euros, dont 1000 milliards rien que pour les véhicules, l'équipement et les infrastructures de recharge.

On voit donc que la CE, même sans vraiment la nommer, fait de la VE en tant que « voiture propre » une partie intégrante de sa politique de transports à l'horizon 2050. Pour autant, il apparaît que le Livre blanc fait l'économie d'un certain nombre de considérations qui nous paraissent essentielles même si elles dépassent le cadre de ce travail. Comment en effet concilier diminution des impacts environnementaux et des besoins en énergie et augmentation des flux de transport ? N'est-il pas dangereux de ne parler que des émissions directes ? Ne faudrait-il pas aussi (et surtout) agir au niveau du comportement des utilisateurs de moyens de transport, de la planification urbaine, de la relocalisation des activités économiques de production ? Voilà quelques questions qui mériteraient de recevoir une réponse, pour résoudre les problèmes environnementaux

134 Plus précisément le texte rappelle dans un style assez vague et sans fixer d'objectifs « (...) *l'aménagement du territoire peuvent faire baisser les volumes de trafic. Les installations facilitant les déplacements à pied et à vélo devraient devenir une partie intégrante de la mobilité urbaine et de la conception des infrastructures.* » [CE, 2011 : 9].

135 Une exception : la motorisation électrique est proposée pour l'équipement d'une flotte de camions urbains censés faire les livraisons la nuit dans les villes pour réduire la congestion, les émissions atmosphériques et les nuisances sonores.

136 Notons que pour ambitieux qu'il soit, cet objectif a déjà été antérieurement fixé par une ville, Amsterdam, qui a lancé un programme en 2009 de construction de bornes de recharges disséminées partout dans la ville dans le but de bannir les VT d'ici à 2040. Voir <http://green.autoblog.com/2009/03/27/amsterdam-wants-to-be-all-electric-by-2040/> et <http://green.autoblog.com/2011/04/22/amsterdam-750-charging-stations/>

et de diminution des ressources énergétiques bon marché disponibles. Au lieu de prendre en compte ces considérations, la CE donne l'impression de se lancer dans une politique basée quasiment exclusivement sur des améliorations technologiques et sur une approche non systémique de la question des transports, ce qui nous semble totalement inadéquat.

II.4.4. Conclusion

Les politiques publiques qui ont trait à la VE sont de forme et de portée diverses. Elles peuvent être des incitants financiers ou non financiers, des lois, des initiatives de coordination et de standardisation, d'étude et de communication. Les VE étant un moyen de transport relativement peu connu et développé, il est clair que ces initiatives ont un rôle important à jouer. Pourtant la visée de ces politiques, présentées comme une aide à la transition vers un secteur automobile plus « vert », semble poursuivre un but tout autre. Au regard des exemples en France et aux États-Unis que nous avons étudiés plus particulièrement, elles apparaissent davantage comme un soutien à l'économie que comme une véritable volonté de réformer le système de transport en le dirigeant vers davantage de prise en compte des contraintes environnementales.

En ce qui concerne les politiques européennes, on a l'impression d'assister à la mise en place de solutions parfois originales et qui vont dans le bon sens mais encore un peu boiteuses, malgré l'identification de réels problèmes. Un bon exemple en est la réglementation sur les rejets de CO₂ des voitures particulières, qui constitue une avancée certaine, mais dont le contenu est peu ambitieux et dangereux. Peu ambitieux parce qu'au regard des progrès déjà réalisés par la plupart des constructeurs automobiles, il serait possible d'avoir un objectif bien plus significatif de réduction des émissions. Et dangereux, parce que le système de bonifications réservé aux véhicules particulièrement peu émetteurs porte en lui le risque d'augmenter les émissions totales. Plus largement, la lecture du *Livre blanc des transports* montre bien toute la limite d'une organisation qui serait guidée à la fois par l'idéologie ultra-libérale pour qui réduire la mobilité est une hérésie et par la prise en compte des limites environnementales et énergétiques du monde dans lequel nous vivons.

Partie III. Vers un changement de paradigme ?

III.1. Théorie de la transition : une grille de lecture du système actuel de mobilité individuelle motorisée

Afin de prendre la mesure du changement que peut représenter l'avènement des VE dans le système de transport, une lecture qui nous semble pertinente est celle de la théorie de la transition.¹³⁷ Celle-ci postule que les sphères d'activité (ou systèmes) ont 3 niveaux en interaction les uns avec les autres :

- **le paysage** : niveau global des mouvements de fond, caractérisé par les grandes tendances socio-culturelles, démographiques, économiques, etc. Il englobe les différents régimes sociotechniques. Les acteurs du régime sociotechnique n'ont pas vraiment de pouvoir d'influence sur le paysage ;
- **le régime sociotechnique** : l'ensemble des objets, infrastructure, règles et normes, représentations, comportements et pratiques qui constituent le mode dominant de réalisation d'une fonction sociale à un moment donné ;
- **les niches** : lieux d'expérimentation qui repensent fondamentalement le régime sociotechnique en place.

Dans ce cadre, des crises ou des modifications profondes du paysage (dans les domaines technologique, culturel, législatif, comportemental, énergétique, écologique, etc.) dans un temps rapproché, déstabilisent le régime sociotechnique qui est remis en question, notamment en lui opposant des solutions différentes proposées par les niches. La transition est alors un processus qui voit l'équilibre du régime sociotechnique en place être rompu. Il s'en suivra soit l'apparition d'un autre régime qui le remplace, soit une mutation plus ou moins profonde du régime existant, qui tentera de s'adapter au nouveau paysage [Boulangier, 2008].

Si nous utilisons le prisme de la théorie de la transition pour analyser le système actuel de mobilité individuelle motorisée, nous pouvons observer que :

- le régime sociotechnique est composé principalement de voitures à moteur à combustion interne, d'un secteur industriel (constructeurs automobiles et sous-traitants), d'un secteur pétrolier (exploration, extraction, raffinage, transport et distribution d'hydrocarbures), de normes et de règles (code de la route, législation sur les émissions de véhicules, etc.), d'activités économiques (vente de voitures par concessionnaires, administration, entretien et réparation par des garagistes, assureurs, publications et émissions télévisuelles spécialisés, etc.), d'infrastructures (routes, parkings, signalisation, centre d'inspection automobile, etc.), de représentations dans l'imaginaire collectif (la voiture comme signe de liberté et d'indépendance), de relations de dépendance par rapport à sa voiture, etc. ;
- le paysage connaît une modification profonde avec principalement la concomitance de deux crises majeures annoncées : le changement climatique dû aux émissions de GES anthropiques et la fin du pétrole abondant et bon marché. A ces deux crises s'ajoute une prise de conscience environnementale qui questionne le régime sociotechnique dont les incidences négatives ne sont plus ignorées (voir chapitre I.2). En cela le paysage fait de plus en plus pression sur le régime sociotechnique pour qu'il diminue ses impacts négatifs ;
- les niches sont de deux sortes. Une première qu'on voit déjà en partie phagocytée par le régime sociotechnique et qui ne remet que peu en cause les fondements du régime : carburants alternatifs (agrocaburants, huiles usagées¹³⁸), propulsions alternatives (moteurs électriques puisant leur énergie dans

137 Pour une description plus complète de la théorie de la transition voir : Grin (John), Rotmans (Jan) & Schot (Johan), *Transitions to sustainable development, New directions in the study of long term transformative change*, Routledge, 2010, 418 p.

138 Voir <http://veggievan.org/veggievan/>

des batteries ou des piles à combustible, moteur à air comprimé¹³⁹, etc.). Une seconde qui reste davantage au niveau de niche mais qui est plus fondamentalement en opposition avec le régime en ce qu'elle nécessite de repenser la mobilité. Nous verrons plus loin en quoi elle pourrait consister ou si elle ne nécessite pas la transformation de différents régimes sociotechniques en même temps.

Voyons à présent quelques-uns de ces acteurs qui sont présents dans le monde de la VE et essayons de voir en quoi ils pourraient contribuer à un changement de paradigme. Pour reprendre le vocabulaire de la théorie de la transition, voyons en quoi des acteurs pourraient modifier le régime sociotechnique, soit parce qu'ils en font partie et qu'ils ont compris avant les autres que la pression du paysage les oblige à changer, soit qu'ils font partie de niches appelées à faire changer le régime.

III.2. Constructeurs Traditionnels : Renault et Nissan

Parmi les constructeurs traditionnels il est un groupe (l'alliance Renault Nissan) qui entend se positionner très clairement comme le leader de la propulsion électrique. Avec un investissement de 4 milliards d'euros prévus pour le développement de la motorisation électrique¹⁴⁰, on peut dire qu'il s'agit véritablement d'un pari industriel que le groupe a pris. Concrètement Nissan a été le premier constructeur majeur à mettre sur le marché un modèle de VE produit en masse, en l'occurrence la Nissan Leaf dont nous avons déjà abondamment parlé. Il s'agit d'un véhicule dont le prix est relativement raisonnable¹⁴¹ (étant donné le coût de la batterie) et qui est vendu avec ladite batterie. L'autre marque de l'alliance, Renault, va quant à elle proposer dans le courant de 2011 et début 2012 pas moins de 4 modèles différents : une berline familiale, une voiture moyenne, un véhicule utilitaire léger et un véhicule urbain pouvant recevoir deux occupants en tandem.¹⁴² La stratégie est par contre différente puisque les batteries ne seront pas vendues avec le véhicule mais louées. Pour un prix forfaitaire¹⁴³, l'acheteur pourra parcourir un nombre limité de km par an après quoi il devra payer un supplément.

On peut se demander pourquoi un même groupe, certes décliné en deux marques mais n'ayant qu'une seule direction, choisit deux structures de ventes assez différentes. Celle de Renault pose par ailleurs des problèmes juridiques et de respect de la vie privée. Juridique parce que la marque vend un produit (une voiture) qui contient un autre produit (la batterie) qu'elle loue. Or certains spécialistes que nous avons interrogés à ce sujet nous ont affirmé que le constructeur serait bien en peine de se faire restituer un objet contenu dans un autre dont il n'est pas propriétaire et dont le propriétaire serait en droit de lui refuser l'accès. Par ailleurs Renault prévoit de pourvoir les VE d'un système de positionnement par satellite lui permettant de connaître en permanence la position de chaque véhicule. Ce système lui permettra aussi de désactiver à distance une VE dont le propriétaire n'aurait pas payé l'abonnement mensuel pour la location des batteries. Ceci pose bien évidemment question en termes de protection de la vie privée.

Le choix de louer les batteries trouve à notre avis son intérêt dans la préservation de la rentabilité financière de l'activité de constructeur automobile et répond à un double intérêt. D'abord il permet de proposer le VE à

139 Voir <http://www.mdi.lu/>

140 Voir l'interview de Carlos Ghosn, PDG de Renault et de Nissan, accordée au Wall Street Journal et publiée le 10 février 2011 : <http://online.wsj.com/article/SB10001424052748704132204576136274212277668.html>

141 Il est difficile de donner ce prix étant donné qu'il diffère d'un pays à l'autre et plus encore d'un continent à l'autre et que certains pays ou régions offrent des réductions à l'achat. A titre d'exemple la Nissan Leaf sera vendue aux États-Unis au prix de 25.280 \$ (déduction faite du subside national de 7500 \$), soit environ 17.600 €, au Portugal et en Irlande le prix sera de 29.955 € (déduction faite des subsides à l'achat) et au Pays-Bas de 32.839 €. Au moment d'écrire ces lignes le prix pour certains pays n'était pas encore fixé. Voir <http://green.autoblog.com/2010/05/17/nissan-announces-european-prices-for-leaf-under-30-000-after-i/>

142 Pour une brève description de ces véhicules sur le site du constructeur, voir <http://www.renault.com/fr/capeco2/vehicule-electrique/pages/vehicule-electrique.aspx>

143 Ce prix oscillerait entre 50 € pour le plus petit modèle et environ 100 € pour le plus grand mais dépendrait aussi du nombre de km que l'acheteur prévoit de parcourir.

un prix comparable à celui d'une VT, puisque l'entièreté du surcoût de production se situe au niveau de la batterie, ce qui permet de ne pas effrayer les clients potentiels. Cela est d'autant plus vrai que l'acheteur de voiture ne prend que rarement en compte les coûts d'utilisation de son véhicule lors de son achat [Kendall, 2008 : 102]. Ensuite il permet d'envisager de nouvelles sources de revenus : la concurrence féroce entre constructeurs, surtout sur les modèles les moins coûteux, a contribué à diminuer le prix des voitures, obligeant les constructeurs à réaliser leurs bénéfices sur les pièces et l'entretien dans les garages officiels. Or les VE ont la réputation de ne nécessiter que peu d'entretien (moteur comportant moins de parties mobiles, freins moins utilisés de par le freinage moteur avec récupération d'énergie, etc). Dès lors la location de batteries peut être vue comme une source de revenus de remplacement pour les constructeurs.

Il y a dans le discours même du PDG de Renault-Nissan la volonté de repositionner l'automobile comme un produit de son temps.¹⁴⁴ Ce groupe a pleinement conscience que si la voiture a représenté par le passé un objet culturel fortement chargé positivement, la situation aujourd'hui a changé et la voiture n'est plus considérée comme un symbole de modernité. De plus en plus de voix se font entendre, principalement dans les pays de l'OCDE¹⁴⁵ et particulièrement parmi la jeune génération,¹⁴⁶ pour décrier le modèle de transport individuel prôné par les constructeurs automobiles. Il est dès lors impératif, selon Carlos Ghosn, de refaire de l'automobile un objet de rêve, désiré ardemment par ceux qui n'en ont pas et procurant du plaisir à ceux qui en ont une. Et dans cette optique la VE est considérée comme l'arme idéale pour mener cette reconquête des esprits.

Le problème des constructeurs traditionnels est qu'à notre avis ils n'ont pas encore compris, ou qu'ils ne veulent pas tenir compte, de l'importance des transformations qui nous attendent. Les voitures électriques qu'ils proposent aujourd'hui ne sont rien d'autre que des voitures traditionnelles dont le moteur à combustion interne est remplacé par un moteur électrique et de lourdes batteries qui en augmentent encore le poids déjà conséquent. Or quel est l'intérêt de construire des voitures électriques de plus d'une tonne dans la perspective d'une société radicalement transformée par la fin de l'ère de l'énergie abondante et bon marché ?

En conclusion on peut dire que l'engagement de l'alliance Renault-Nissan est certes un geste fort et favorable de la VE mais qu'il ne saurait être véritablement considéré comme un changement de paradigme. Ce n'est pas vraiment du « greenwashing », cela le groupe le fait déjà en se délivrant lui-même de prétendus labels écologiques, qu'il appelle eco2 sur certains de ses modèles.¹⁴⁷ La VE sur laquelle le groupe mise beaucoup est sans conteste un changement de cap vers la mise sur le marché de véhicules moins émetteurs de GES et offrant des avantages environnementaux. Par ailleurs le véhicule abandonne l'utilisation d'un carburant fossile au profit d'un vecteur énergétique (l'électricité) dont la source peut être multiple, ce qui le rend plus résilient. Mais ce n'est pourtant pas une révolution profonde puisque finalement, mis à part la motorisation qui change, l'automobiliste se retrouve toujours avec un véhicule qui lui coûte un pourcentage conséquent de son budget, pèse plus d'une tonne pour ne transporter souvent qu'un seul passager et n'est utilisé que quelques heures par jour. En somme seule une fraction des incidences négatives du système de transport actuel reçoivent un début de solution. Le régime sociotechnique ne s'en trouve donc pas profondément modifié : il ne fait que s'adapter en adoptant une motorisation minoritaire qui n'était expérimentée ces dernières années qu'au niveau de niches.

144 Voir la conférence de Carlos Ghosn à la conférence "Le Web" à Paris le 8 décembre 2010 : <http://www.ustream.tv/recorded/11317592>

145 Il convient de rappeler que les populations des pays émergents continuent à voir dans la possession d'une automobile un but à atteindre pour affirmer son statut social [Sperling, 2009].

146 Carlos Ghosn cite par exemple le fait que les jeunes adultes japonais classent la voiture en 17e position de leurs centres d'intérêt. De même, 43% des jeunes français entre 25 et 34 ans estiment que la voiture a plus de désavantages que d'avantages. Voir <http://www.ustream.tv/recorded/11317592> (environ 3:07)

147 Pour la liste des critères pris en compte pour l'obtention de ce "label" voir <http://www.renault.com/fr/capeco2/les-criteres-renault-eco2/pages/les-criteres-renault-eco2.aspx>

III.3. Constructeur émergent : Tesla

Tesla Motors est une entreprise américaine fondée en 2003 qui se consacre à la vente de VE. Quelques années après sa création et avant d'avoir vendu la première voiture, Elon Musk, un ingénieur et entrepreneur touche à tout, en est devenu le dirigeant. Tesla Motors vend pour le moment un seul modèle de VE : un *roadster*, c'est-à-dire une voiture de sport de deux places dont le toit est escamotable. Celle-ci affiche des performances qui la classent parmi les voitures les plus performantes en termes d'accélération disponibles sur le marché¹⁴⁸, mais son prix est en conséquence puisqu'il faut déboursier 84.000 € pour l'acquérir.¹⁴⁹ Elon Musk est un entrepreneur qui a d'abord fondé la société PayPal¹⁵⁰ qui a été revendue au site d'enchères sur internet eBay, il a ensuite fondé SpaceX¹⁵¹ et il a pris en 2005 les commandes de Tesla Motors. Ce faisant il n'est manifestement pas un acteur du régime sociotechnique, mais plutôt quelqu'un qui appartient à une niche, celle des constructeurs de VE.

Le but d'Elon Musk et de sa société en construisant d'abord une voiture de sport, réservée de par son prix à une population ayant d'importants moyens financiers, est de donner de la visibilité à la VE.¹⁵² Étant donné que les automobiles à propulsion électrique ont quasiment disparu des routes, le développement de la technologie nécessaire demandait des coûts importants qu'il était plus facile de faire supporter par des produits onéreux comme une voiture de sport. Pourtant la visée d'Elon Musk se veut aussi environnementale, en changeant l'image de la VE qu'il considère comme étant une réponse aux crises énergétique et écologique que la société traverse. L'idée n'est bien sûr pas de prétendre que les problèmes du système automobile seront résolus par une voiture de sport hors de prix, qui n'a d'ailleurs été vendue à ce jour qu'à environ 1500 exemplaires.¹⁵³ Mais bien d'être un acteur de niche qui entend bouleverser l'équilibre du régime sociotechnique.

Pour ce faire, on peut dire que Tesla poursuit trois stratégies. D'abord en produisant des voitures sous son nom propre. La première étape consiste à construire une voiture qui fasse rêver les amateurs de voitures, pour ensuite se lancer dans la production de VE plus accessibles. Il reste à voir à quel point ces produits seront « grand public » et pourront donc avoir un véritable impact à grande échelle,¹⁵⁴ mais leur but est en tout cas de transposer l'avancée technologique acquise avec le *roadster* sur d'autres modèles moins onéreux.

Ensuite parce que Tesla a reçu une couverture médiatique très importante et que son pouvoir d'influence dans le monde automobile est grand, comparé au nombre limité de voitures vendues. Bob Lutz, le vice-président de General Motors, a avoué dans une interview¹⁵⁵ publiée dans *Newsweek*, que la nouvelle que Tesla allait mettre sur le marché une VE de sport l'avait grandement impressionné. C'est en fait l'élément déclencheur qui l'a convaincu de relancer le développement d'une VEHR qui est aujourd'hui la Chevrolet Volt et sur laquelle General Motors mise énormément pour redevenir économiquement viable.

Enfin parce que le succès de Tesla Motors dépasse en fait sa propre production de VE en ce qu'il propose aussi sa technologie à d'autres constructeurs automobiles. Les Smart électriques produites par Daimler

148 Voir <http://www.teslamotors.com/roadster/specs>

149 Voir <https://www.teslamotors.com/own>

150 PayPal est une société qui a développé un système de paiements sur internet qui est devenu tellement indispensable et indissociable du succès du site d'enchères eBay, que ce dernier a été obligé de le racheter. Voir <http://www.paypal.com>

151 SpaceX est une société de transport spatial qui développe des fusées permettant de mettre en orbite des satellites et des engins spatiaux. Voir <http://www.spacex.com/>

152 Voir l'interview donné par Elon Musk au magazine Wired (www.wired.com) : <http://www.youtube.com/watch?v=Onajosm9PW0> ou celle accordée au Churchill Club (www.churchillclub.org/) : <http://www.youtube.com/watch?v=n1j0yHOxcL0>

153 Chiffre fourni par le constructeur lui-même sur son site : <http://www.teslamotors.com/enthusiasts/millions-of-miles>

154 Pour une estimation des prix de ces futurs modèles, voir Chapitre II.4.

155 Voir <http://www.newsweek.com/2007/12/22/bob-lutz-the-man-who-revived-the-electric-car.html>

reposent sur la chaîne de traction développée par Tesla, de même que la Mercedes Class A E-Cell, deux VE construits en petite série à des fins de tests grandeur nature. La société Daimler a d'ailleurs investi dans le constructeur Tesla en achetant 10% de son capital en 2009.¹⁵⁶ Toyota a fait de même en annonçant un partenariat qui le voit également investir de l'argent et lancer l'électrification d'un de ses modèles qui sera réalisée en partenariat avec Tesla.¹⁵⁷

On voit donc que Tesla, en tant que niche, se positionne de trois façons par rapport au régime sociotechnique. D'abord en expérimentant des solutions différentes en son nom propre et en dehors du régime. Ensuite, en montrant aux constructeurs traditionnels que l'alternative existe et que si une réponse à un besoin de mobilité est majoritaire, elle n'en est pas pour autant unique, ce qui leur met la pression et les obligent à changer de direction technologique. Enfin, en pénétrant lui-même dans le régime sociotechnique par le biais de collaborations avec des constructeurs traditionnels sur des modèles spécifiques.

Malgré les améliorations qu'on peut attendre de la motorisation électrique par rapport au VT en termes d'efficacité énergétique et d'impacts environnementaux, on ne peut toujours pas dire qu'un changement profond est en cours. Comme dans le cas de l'alliance Renault-Nissan, la perspective reste la même, si ce n'est l'adoption du groupe propulseur électrique qui ne réduit que de façon limitée les impacts du modèle dominant de transport individuel. Le fait que le jeune constructeur soit parvenu à nouer des alliances avec des constructeurs traditionnels est d'ailleurs à notre avis un signe qu'il ne bouleverse pas tellement le régime sociotechnique existant, et qu'il risque plus de se faire englober par celui-ci que d'en faire apparaître un nouveau.

III.4. La voiture devient un téléphone portable : le projet Better Place

Du point de vue de l'utilisation, tous les désavantages de la VE par rapport à la VT sont dus à la batterie. Temps de recharge beaucoup plus long, autonomie réduite, incertitudes sur la durée de vie des batteries et prix plus élevé à cause de celles-ci, voilà les freins principaux à l'adoption de la motorisation électrique. Pour pallier tous ces problèmes en même temps, la société Better Place¹⁵⁸ a mis au point un système d'échange de batteries automatisé qui se déroule en quelques minutes dans des stations d'échange, principalement construites en dehors des agglomérations. Il est aussi prévu de déployer en même temps un réseau de chargeurs rapides dans les zones plus densément peuplées. L'objectif de Better Place est de déployer un réseau de stations suffisamment dense que pour permettre à ses clients d'utiliser leur VE comme s'il s'agissait d'une VT. Elle espère aussi faire baisser le coût de revient pour l'utilisateur en achetant les batteries en grand nombre. Des accords ont déjà été passés avec l'alliance Renault-Nissan pour la fourniture de véhicules compatibles avec le système de batteries échangeables et avec les États danois et israéliens pour le déploiement des stations. Par ailleurs quelques Toyota RAV4 utilisées comme taxis à Tokyo réalisent un essai grandeur nature du système, qui sera aussi réalisé en Californie.¹⁵⁹ Le modèle économique repose sur la vente de VE non équipées de leurs batteries, ces dernières étant louées pour un prix variable en fonction de la distance parcourue par l'automobiliste. Celui-ci ne payera par ailleurs pas l'électricité qui rechargera les batteries, que ce soit chez lui à l'aide d'un chargeur spécialement installé à cet effet ou aux bornes de recharges.

Pour séduisante qu'elle puisse paraître à certains, la solution proposée par Better Place n'est pas sans poser des problèmes techniques quant à sa réalisation et soulever des interrogations sur son opportunité

156 Voir <http://techcrunch.com/2009/05/19/daimler-takes-a-10-percent-stake-in-tesla-motors-wheres-my-electric-benz/>

157 Voir <http://www.teslamotors.com/about/press/releases/tesla-motors-and-toyota-motor-corporation-intend-work-jointly-ev-development-tm>

158 Voir <http://www.betterplace.com>

159 Voir <http://www.greencarcongress.com/2010/10/bp-20101028.html#more>

environnementale. D'abord, il faut bien se rendre compte que pour que le système soit rentable, il faudra parvenir à convaincre tous les constructeurs (ou au moins une quantité suffisamment grande pour qu'elle soit significative) d'adopter des batteries compatibles avec les stations d'échange. Or pour ce faire, il faut que les constructeurs soient convaincus que c'est de leur intérêt d'adopter ce standard, ce qui ne sera pas une mince affaire. Toujours en ce qui concerne sa rentabilité, le système repose sur un grand besoin de recharges hors domicile ou lieu de travail. Les premières études tendent cependant à montrer que les utilisateurs de VE préfèrent recharger chez eux ou sur leur lieu de travail,¹⁶⁰ même s'il est difficile d'anticiper la conséquence que pourrait avoir le déploiement d'un réseau de stations d'échange. Il sera aussi crucial de choisir en quels lieux les installer : en ville elles risquent d'entrer en concurrence avec le rechargement à domicile et dans des zones moins densément peuplées, il sera nécessaire de les déployer en grand nombre pour couvrir des territoires plus importants, ce qui peut affecter leur rentabilité. Il est d'ailleurs prévu que chaque station couvre un rayon de 70 km.¹⁶¹

Le fondateur israélien de Better Place, Shai Agassi, se montre quant à lui plus optimiste et estime qu'en investissant ce qu'un pays dépense en une semaine pour ses importations de pétrole, il est possible de couvrir la plupart des pays d'un nombre suffisant de stations d'échange.¹⁶² Il ne précise cependant pas pour combien de VE et donne comme exemple Israël, le premier pays dans lequel il va déployer des stations pour un montant de 150 millions de dollars, soit l'équivalent de 6 jours d'importations de pétrole.

Ensuite il n'aura échappé à personne que le système repose sur une quantité surnuméraire de batteries. Pour qu'un automobiliste puisse trouver une batterie rechargée à échanger contre sa batterie déchargée, il faut produire plus de batteries que de véhicules. Or celles-ci représentent quand même un certain pourcentage de l'impact environnemental d'une VE et nécessitent de plus des matières premières rares.

Enfin, étant donné la capacité actuelle du réseau électrique, le rechargement de la batterie en journée fait perdre beaucoup à l'intérêt environnemental de la VE. Les recharges rapides en journée risquent de faire augmenter la production d'électricité aux heures de pointe (qui est souvent la plus émettrice de CO₂) et les batteries servant aux échanges seront sans doute aussi, au moins ponctuellement, rechargées en dehors des heures creuses de demande en électricité. Le seul avantage environnemental que pourrait représenter la station d'échange est de répartir sur un territoire des lieux offrant une importante capacité de stockage d'électricité. Ceux-ci pourraient alors diminuer l'écart entre l'offre et la demande : absorber de l'électricité lors de pics de production et injecter sur le réseau de l'électricité lors de creux de production, des situations caractéristiques de la génération à partir de sources d'énergie renouvelables. Il est donc difficile d'évaluer l'intérêt pour l'environnement et pour le réseau de ces stations puisqu'elles pourraient être à certains moments consommatrices d'électricité fortement émettrice de carbone et à d'autres un adjuvant de l'électricité produite à partir de sources d'énergie renouvelables.

Plus préoccupant encore, la société Better Place entend appliquer le modèle économique mis en œuvre par la téléphonie mobile. A l'instar des opérateurs qui proposent des téléphones à prix réduits voire gratuits à leurs clients qui s'engagent à long terme, il est prévu de proposer aux automobilistes de s'abonner contre des réductions à l'achat de leur VE. Le but étant d'offrir à terme des VE gratuites.¹⁶³ Evidemment, le coût de fabrication d'un téléphone et d'une voiture n'étant pas comparables, le temps d'amortissement sera sans doute plus long pour cette dernière. Mais quand on voit les conséquences environnementales que ce modèle

160 Présentation faite par David Wright du programme *CABLED*, un test grandeur nature de VE réalisé dans les Midlands (Royaume Uni) lors du *European Union Sustainable Energy Week* du 22 au 26 mars 2010 (<http://www.eusew.eu/>). Les conclusions préliminaires du programme *CABLED* sont disponibles ici : <http://cabled.org.uk>

161 Voir <http://www.lalibre.be/societe/planete/article/646657/premiers-pas-vers-a-better-car.html>

162 Voir <http://www.euractiv.com/en/innovation/better-place-ceo-biggest-obstacle-electric-cars-auto-industry-interview-500451>

163 Voir <http://www.wired.com/epicenter/2008/11/shai-agassi-pus/>

économique engendre (les taux de remplacement d'un téléphone mobile étant de 18 mois en moyenne¹⁶⁴), on ne peut que craindre que le monde automobile veuille suivre un chemin similaire. De plus, il semble que les préoccupations de Better Place soient davantage liées à la diminution de la dépendance au pétrole qu'à des questions environnementales.

On peut aussi voir que la solution proposée par Better Place est typiquement une solution de niche qui entre en conflit avec le régime existant. Dans une interview accordée récemment à Euractiv,¹⁶⁵ Shai Agassi a identifié le scepticisme des constructeurs traditionnels comme le principal obstacle à la réalisation de son projet. Il souhaite modifier la façon dont on conçoit la vente et l'entretien des voitures, la façon dont on les « recharge » en énergie et dont on paye cette énergie. Son modèle est en opposition à la fois avec les intérêts et la façon de concevoir leur activité commerciale des constructeurs et des compagnies pétrolières, deux secteurs d'activité parmi les plus riches et les plus puissants. Pourtant, s'il parvient à s'imposer et à transformer le régime sociotechnique, il ne changera pas de régime sociotechnique puisque comme pour les exemples déjà vus, le modèle économique est différent mais le modèle de mobilité individuelle reste semblable.

III.5. Économie de fonctionnalité : *Car Sharing Clubs*

Pour parvenir véritablement à diminuer les incidences du système actuel de transport individuel, il convient à notre avis de le modifier plus profondément que par le simple changement du mode de propulsion et du modèle commercial. Un certain nombre d'initiatives issues d'abord d'autres domaines d'activité que celui des transports et que les économistes appellent « économie de fonctionnalité » sont apparues ces dernières années [Buclet, 2005]. Selon les partisans de cette solution, les entreprises, plutôt que de vendre des objets, devraient vendre des services tout en restant propriétaires des objets qu'elles mettent à disposition. Car ce qui devrait intéresser le consommateur en premier lieu, ce n'est pas la possession d'un objet mais bien le service que celui-ci peut lui rendre.¹⁶⁶ L'utilité première d'un objet est indépendant de sa possession et réside dans le service qu'il rend à celui qui l'utilise. Acheter une voiture n'est pas intéressant en soi, ce qui est intéressant c'est ce qu'on peut en faire, c'est-à-dire pouvoir se déplacer. Dès lors on pourrait en théorie satisfaire les besoins avec moins d'objets (puisque'un même objet pourrait être utilisé alternativement par différents utilisateurs), ce qui diminuerait les impacts liés à la production. Par ailleurs, cela pousserait aussi les producteurs à mettre sur le marché des objets plus durables et rendrait caduque la tentation de l'obsolescence programmée¹⁶⁷ : il serait dans l'intérêt des producteurs de fabriquer des objets qui ont une longue durée de vie puisque leurs revenus seraient liés à l'usage plutôt qu'à la vente d'objets. Enfin, il leur sera aussi indispensable de prévoir l'ensemble des coûts du cycle de vie des objets, et donc aussi la fin de vie qui est souvent négligée par les producteurs. De plus, en faisant payer l'usage plutôt que la propriété, on fait réfléchir l'utilisateur à l'opportunité de chacune de ses utilisations d'un objet et la rationalisation de son comportement est récompensée.

Il existe déjà des exemples qui se rapprochent du modèle d'économie de fonctionnalité dans le domaine du

164 Voir http://www.thegreenswitch.org/wp-content/uploads/2009/12/TheGreenSwitch_publication_Jan2010.pdf

165 Voir <http://www.euractiv.com/en/innovation/better-place-ceo-biggest-obstacle-electric-cars-auto-industry-interview-500451>

166 Pour autant les consommateurs ne sont pas rationnels et la possession d'objets peut en fait, d'après certains auteurs, servir différents objectifs. Le positionnement social par la consommation a par exemple été étudié dès la fin du XIXe siècle par Thorstein Veblen, qui parle de "consommation ostentatoire".

167 Pratique de certains producteurs de biens qui construisent des objets à durée de vie délibérément courte afin de pouvoir les vendre plus souvent. Le cas d'école (et le premier cas avéré de cartel) de cette pratique est l'accord passé entre fabricants d'ampoules électriques de ne pas mettre sur le marché des ampoules pouvant fonctionner plus de 1000 heures avant de tomber en panne, alors qu'il était technologiquement et économiquement possible de proposer des lampes à la durée de vie bien plus longue. Voir le documentaire de Cosima Dannoritzer, *The light bulb conspiracy*, 2010.

transport individuel motorisé et qu'on peut regrouper sous le nom de « voitures partagées » ou *Car Sharing Clubs*. Le système est assez simple : les membres peuvent louer pour un temps défini à l'avance une voiture et l'utiliser comme bon leur semble avant de la restituer en général au lieu où elle a été empruntée, ce qui la rend disponible pour un nouvel emprunteur. Les véhicules sont disponibles en quelques exemplaires à des « stations » localisées à des endroits stratégiques, principalement en ville, où la densité de la population donne tout son sens au système.

En Belgique le système Cambio de voitures partagées existe depuis 2002 et compte environ 10.000 clients.¹⁶⁸ Il couvre à l'heure actuelle une vingtaine de villes¹⁶⁹ dans lesquelles sont réparties 369 voitures. D'autres pays disposent de système similaires, notamment la Suisse,¹⁷⁰ l'Allemagne et les Etats-Unis, principalement avec la société Zipcar.¹⁷¹ Un autre *Car Sharing Club* du nom de Car2Go, présent aux Etats-Unis (à Austin au Texas) et dans deux villes allemandes (Ulm et Hambourg), propose un système plus souple de partage. Dans ce système développé par le constructeur automobile Daimler, il n'est pas obligatoire de ramener la voiture au lieu où celle-ci a été empruntée, ni de spécifier pour combien de temps on souhaite la réserver. Chaque voiture est équipée d'un système de localisation par satellite et lorsqu'un abonné de Car2Go a besoin d'une voiture, il repère à l'aide de son téléphone portable ou sur un site internet où se trouvent les voitures disponibles.¹⁷² Le concept de voitures partagées a tellement attiré l'attention que d'autres constructeurs se sont lancés dans l'aventure ou pensent le faire : BMW a récemment lancé un système permettant aux habitants de Munich et de Berlin de louer des voitures à la minute.¹⁷³

L'avantage pour l'utilisateur est principalement économique : posséder une voiture pour ne l'utiliser que quelques heures par jour ou par semaine est extrêmement onéreux et à vrai dire injustifié. En ne payant que pour les trajets qu'il réalise, l'utilisateur peut faire de substantielles économies. D'abord parce que les frais fixes (achat, assurance, taxes, entretien) sont répartis entre les usagers du système. Ensuite parce que comme chaque trajet lui est facturé (au lieu d'acheter une voiture, d'en oublier le prix et de n'être confronté aux aspects économiques que lorsqu'on passe à la pompe ou qu'on paye les coûts annuels) l'utilisateur réfléchit à deux fois avant de réserver une voiture et les utilisateurs de ce service ont dès lors tendance à rationaliser leurs déplacements.

Mais les avantages du système de voitures partagées ne s'arrêtent pas aux aspects financiers. D'abord, comme nous l'avons vu, les utilisateurs de ce système roulent moins que les automobilistes qui possèdent une voiture particulière. Cette diminution des kilomètres parcourus permet de réduire les nuisances liées à l'utilisation du véhicule. Robin Chase, la fondatrice de Zipcar, révèle que les membres du système qu'elle a créé roulent en moyenne 800 km par an au lieu des 20.000 km de la moyenne américaine.¹⁷⁴ Ensuite, parce que le système de voitures partagées permet de choisir un petit véhicule économe pour un simple déplacement et un véhicule plus spacieux lorsque c'est vraiment nécessaire. Alors que l'achat d'un véhicule se fait généralement en fonction de tous les besoins en mobilité de son possesseur, même si certains de ces besoins sont très peu fréquents. Le système de partage de véhicules permet d'augmenter l'efficacité énergétique de la mobilité. Enfin, on peut estimer qu'un grand nombre d'automobilistes a pu se passer de l'achat d'un véhicule grâce au

168 Chiffres publiées par Cambio fin 2010. Voir : http://www.cambio.be/cms/2/downloads/6e2e04cc-cce0-4493-8368-fb9a568dd628/BXL_newsletter_2010-12_Fr.pdf

169 Pour la liste des villes disposant de voitures partagées Cambio voir : http://www.cambio.be/cms/carsharing/fr/2/cms/stdws_info/stationen.html

170 Le système "Mobility Carsharing" dispose de 2500 véhicules répartis dans 1250 stations couvrant plus de 400 localités et comptant près de 100.000 utilisateurs. Voir <http://www.mobility.ch/fr/pub/index.cfm>

171 Voir <http://www.zipcar.com/>

172 Pour une évaluation complète du système Car2Go voir : <http://green.autoblog.com/2011/03/24/daimler-car2go-program-carsharing-smart-fortwo/>

173 Voir <http://green.autoblog.com/2011/03/24/bmw-sixt-launch-drivenow-car-sharing-program-w-video/>

174 Il faut à notre avis relativiser cette différence en partant du principe que les utilisateurs de Zipcar faisaient sans doute déjà partie de la population parcourant le moins de km en voiture avant de devenir membres. Voir : http://www.ted.com/talks/lang/eng/robin_chase_on_zipcar_and_her_next_big_idea.html

système de voitures partagées, ce qui réduit la pollution liée à la construction et à la fin de vie d'un nombre important de véhicules ainsi que les incidences en termes d'occupation de l'espace par les véhicules en stationnement. Une enquête faite auprès des utilisateurs de Cambio a estimé qu'une voiture partagée permet d'éviter la construction d'environ 10 véhicules.¹⁷⁵

A l'heure actuelle la plupart de ces systèmes n'offrent que des VT mais leur modèle de fonctionnement (qui impose généralement que la voiture soit stationnée à un endroit précis) s'accommoderait très bien de l'usage de VE en installant une borne de recharge sur le lieu de stationnement. De plus, ces sociétés font leur profit en vendant des km parcourus, or les VE ont un coût de fonctionnement beaucoup plus bas que les VT. Réparti sur l'ensemble des utilisateurs, le surcoût nécessaire à l'acquisition d'une VE par rapport à une VT pourrait être rapidement rentabilisé par l'utilisation plus soutenue qui en serait faite. La société suisse Mobility Carsharing s'est d'ailleurs lancée dans un projet d'installation de VE partagées, disponibles principalement aux abords des gares.¹⁷⁶ D'autres suivent le même raisonnement puisque Car2Go va proposer fin 2011 des VE en libre-service à Amsterdam.¹⁷⁷ La ville de Paris n'est pas en reste et prévoit le déploiement d'un vaste système de VE partagées appelé Autolib. Le projet est de mettre en place un peu plus de 1000 stations qui accueilleront 3000 VE. Le système, sur le modèle des Vélib, les vélos en libre-service, permet à l'utilisateur de ne pas rapporter le véhicule à l'endroit où il l'a emprunté mais bien dans n'importe laquelle des stations de la ville, où il sera possible de recharger la batterie.¹⁷⁸

Bruxelles, qui ne veut sans doute pas passer pour la moins « branchée » des capitales européennes, a aussi lancé un système similaire. Un système de voitures partagées propose depuis peu de petites VE qui permettent à un conducteur et un passager d'y prendre place. Le système privé est développé avec l'aide des pouvoirs publics (la Société Régionale d'Investissement de Bruxelles) qui l'a inauguré en grande pompe.¹⁷⁹ L'offre est malheureusement indépendante de tout autre moyen de transport et même non liée au système Cambio de voitures partagées pourtant bien présent sur le territoire bruxellois, ce qui est très regrettable. On comprend mal l'intérêt de multiplier les acteurs dans un domaine qui pour l'heure reste relativement peu développé. De plus, les premières stations disponibles se situent dans des parkings de la ville, par ailleurs partenaires du projet.¹⁸⁰ Cette localisation laisse perplexe sur les possibilités d'intermodalité avec des transports en commun, puisque généralement les parkings sont accessibles le plus commodément en voiture.

Ce système semble particulièrement efficace en zone urbaine. La population qui y réside dispose d'une offre importante de transport lui permettant d'être moins dépendante de la voiture. Par ailleurs, la densité est suffisante en ville pour justifier l'installation de stations abritant des voitures partagées et rappelons que celles-ci permettent de diminuer la consommation d'espace en remplaçant chacune environ dix voitures individuelles. Enfin les distances parcourues sont généralement moins grandes, ce qui favorise aussi les solutions de type mobilité active ou transports en commun. On peut par contre se poser la question de savoir si en zone rurale, ce système pourrait efficacement remplir les besoins de mobilité généralement remplis par l'automobile et nettement moins facilement remplaçables.

Avec le système de partage de voitures, il est par ailleurs possible de vaincre certaines résistances parmi les automobilistes en raison du fait que ce système n'est pas une négation de ce que représente l'automobile. Il est toujours possible de l'utiliser pour se déplacer, pour déplacer des objets et même pour le plaisir. Car comme le rappelle Robin Chase, les utilisateurs de voitures partagées se rendent compte qu'on peut continuer

175 Voir http://www.cambio.be/cms/2/downloads/6e2e04cc-cce0-4493-8368-fb9a568dd628/BXL_newsletter_2010-12_Fr.pdf

176 Voir http://www.mobility.ch/fr/pub/footer/presse/communiquede_presse/electromobilite.htm

177 Voir <http://green.autoblog.com/2011/04/11/daimler-electric-car2go-carsharing-service-amsterdam/>

178 Voir <http://www.moteurnature.com/actu/2010/autolib-paris-bollere-bluecar.php>

179 Voir http://www.rtb.be/info/belgique/detail_zen-car-bruxelles-se-lance-dans-la-voiture-electrique-partagee?id=5590553

180 Voir <http://www.zencar.eu/fr/index.cfm>

d'assouvir son plaisir de conduire et même d'afficher son statut social avec des voitures partagées.¹⁸¹ Il s'agit plutôt d'une rationalisation de l'utilisation de l'automobile que d'obliger les gens à y renoncer et en cela l'expérience est très intéressante.

Le système de voitures partagées disposant de moteurs électriques représente à notre avis un début de changement de paradigme ayant le potentiel de modifier le régime sociotechnique en place. En conjuguant voitures partagées et motorisation électrique, il est possible d'avoir un début de véritable transformation vers un système de mobilité individuelle énergétiquement et environnementalement soutenable, c'est-à-dire en accord avec la réalité. Pour autant, pour que le potentiel de cette combinaison soit réalisé, il faut à notre avis qu'il ne soit qu'une pièce du puzzle de la mobilité et nécessite donc d'aller plus loin dans la remise en question de la mobilité actuelle elle-même, comme nous le verrons ci-après.

III.6. Conclusion : comment repenser la mobilité ?

Afin de voir se réaliser un changement profond du système actuel de mobilité individuelle, le simple remplacement du moteur à combustion interne par un moteur électrique ne suffira pas. Même si ce remplacement constitue un changement important pour les constructeurs automobiles, il ne permettra à notre avis pas à lui seul de résoudre les nuisances multiples qui ont pour cause un système de transport de personnes fondé sur la voiture particulière. Il n'est donc pas un changement de paradigme, ou pour utiliser le vocabulaire de la théorie de la transition, il n'est pas un changement du régime sociotechnique. Pour reprendre une formule attribuée à Albert Einstein, on ne résout pas un problème en utilisant les modes de pensée qui l'ont généré.

Pour parvenir à instaurer une transition vers une mobilité qui tienne compte des limites environnementales et énergétiques et réduise ses nuisances, il convient d'après nous d'envisager une approche systémique parce que la mobilité individuelle motorisée s'inscrit et réside au cœur même d'un mode de vie particulier. Elle peut donc être appréhendée en tant que telle, mais il ne sera pas possible de faire l'économie d'une approche plus large de la société pour en comprendre les ramifications et en atténuer les incidences négatives. Voyons quelles pistes pourraient selon nous être suivies pour arriver à une refondation de la mobilité individuelle et si des exemples sont déjà en œuvre ou s'il est possible de dégager des recommandations pour en concevoir.

Une première piste pour refonder la mobilité individuelle est de procéder à une diminution de celle-ci. Remettre en cause la mobilité n'est bien sûr pas synonyme de poser des restrictions aveugles au libre déplacement des personnes. Il n'est pas question de remettre en cause le droit à la mobilité. Ce dont il s'agit ici, c'est de créer les conditions permettant d'une part de changer les routines de mobilité et d'autre part de réduire les mobilités compulsives, excessives et évitables. Le tourisme de courte durée et de longue distance nous semble à cet égard l'exemple même de la voie qu'il convient au plus vite d'abandonner. Mais la mobilité personnelle est source de richesse pour le développement humain et l'entraver arbitrairement ne semble pas une bonne voie à suivre. Comment dès lors permettre une diminution de la mobilité qui ne soit pas vécue comme une aliénation de ce droit ?

Différentes pistes existent et même si ce n'est pas le sujet de ce travail, il convient d'en citer quelques-unes brièvement. L'aménagement du territoire, au sens large, est de l'avis de beaucoup la voie royale pour la réduction des besoins de mobilité. Il s'agit d'abord de rendre la ville plus compacte, c'est à dire de densifier l'habitat autour des zones d'activité, pour diminuer les distances entre les personnes et leurs destinations et permettre à la mobilité active et aux transports en commun de donner toute la mesure de leur potentiel. Il faut également développer les activités proches des lieux desservis par les transports en commun pour les rendre accessibles par ce moyen, rompre la mono-destination des espaces (quartiers entièrement à vocation de bureaux, de logements ou de services) pour au contraire augmenter la mixité territoriale, mêlant dans un

181 Voir http://www.youtube.com/watch?v=oBtcdvPf_ZU&feature=player_embedded

espace proche logements, bureaux et services. Il n'est bien sûr pas possible, notamment en raison de la « liquidité » du marché du travail (les travailleurs changeant d'emploi régulièrement) et de la présence dans un ménage de travailleurs se rendant dans des lieux différents, de faire habiter chaque travailleur à côté de son lieu de travail. Néanmoins le fait qu'il puisse trouver autour de son habitation des lieux offrant un large choix de services - à proximité ou au moins facilement accessible par des moyens efficaces en énergie - est essentiel. Penser aussi à la coexistence de différents moyens de transports : aménager les voiries pour qu'elles laissent la place aux modes actifs de mobilité pour éviter que seul l'usage de la voiture ne s'avère efficace et sûr.

La technologie peut aussi jouer un rôle important dans cette perspective. Télétravail, lieux d'usage polyvalent ou communication via internet par des systèmes de plus en plus proches de la rencontre physique, sont quelques exemples de pistes déjà explorées mais qui gardent un potentiel important de réduction des besoins en mobilité [Kaplan, 2008 : 34]. D'autre part l'arme fiscale est à notre avis un puissant outil de redirection des choix des consommateurs. Taxer plus les carburants, en veillant à mettre un système en place qui protège les plus bas revenus, permettrait certainement de diminuer l'usage des moyens de transport qui ont le plus d'incidence sur l'environnement.¹⁸²

Si les principes sont simples, c'est leur mise en œuvre qui est souvent problématique. D'abord parce que comme nous l'avons vu, une période d'énergie abondante à bon marché a fait prendre à nos sociétés de mauvaises habitudes qui ont conduit à un gaspillage énergétique à grande échelle. Ensuite parce que les politiques à mettre en place, dans le domaine de l'aménagement du territoire en particulier, ne donnent la pleine mesure de leurs effets que quelques décennies plus tard, ce qui les rend difficiles à exécuter de par le système politique actuel et ses échéances électorales rapprochées. Ne parlons même pas de l'idée de l'utilisation de la fiscalité pour alourdir le prix des carburants : bien que cet outil nous semble très efficace et est mis en œuvre dans quelques pays nordiques notamment, le courage politique nécessaire à la prise d'une telle décision est sans doute bien au-delà de ce qu'on peut espérer des dirigeants de la plupart des pays.¹⁸³ Par ailleurs le marché du logement et de l'emploi ajoutent à la complexité de faire se rapprocher lieux d'habitation et de travail.

Une deuxième piste pour repenser la mobilité individuelle est l'augmentation de l'efficacité énergétique des moyens utilisés. Dans les zones urbaines, cela passe nécessairement en privilégiant les mobilités actives (marche et vélo), c'est-à-dire celles qui utilisent uniquement la force musculaire. Lorsque les distances ou les circonstances ne le permettent pas, il faudra alors se rabattre prioritairement sur les transports en commun électriques sans énergie embarquée (métro, tram et train) et dans une moindre mesure sur le bus. Si toutes ces solutions se sont avérées non pertinentes, on pourra alors faire usage de la mobilité individuelle motorisée, c'est-à-dire principalement la voiture.¹⁸⁴ Il convient de noter que dans les zones urbaines, l'efficacité énergétique va généralement de pair avec l'efficacité spatiale¹⁸⁵ : la mobilité active et les transports en commun sont beaucoup plus économes en espace que la voiture.¹⁸⁶ Rappelons aussi qu'un déplacement ne se fait que très rarement par un mode unique et que l'intermodalité (l'utilisation successive de différents modes de transport) doit être rendue plus pratique, toujours dans le but d'augmenter l'efficacité énergétique des

182 Pour se convaincre du bien fondé de cette démarche il suffit de comparer la situation aux États-Unis et en Europe. En moyenne aux États-Unis, les carburants sont moins taxés, les distances parcourues sont plus grandes et la consommation des VT est plus importante qu'en Europe.

183 A défaut, certains groupuscules ont pris leur destin en main et décidé de s'appliquer à eux-mêmes une taxe (plus symbolique qu'efficace) sur le carburant automobile. Voir : <http://www.voluntarygastax.org/>

184 Nous laissons ici de côté volontairement l'avion qui n'entre en concurrence avec la voiture que pour les longues distances et est, rappelons le, un moyen de transport très peu efficace d'un point de vue énergétique.

185 Voir [Dobruszkes, 2009 : 40-43].

186 Yves Engler a ainsi estimé qu'une voiture nécessitait environ la réservation de 400 m² (90 m² pour le stationnement au lieu d'origine et au lieu de destination, 180 m² pour les trajets sur routes et 60 m² pour les réparations et la vente) Voir : <http://www.themarknews.com/articles/2035-there-s-no-such-thing-as-a-green-car>

déplacements.¹⁸⁷

La ville de La Rochelle représente depuis de nombreuses années un exemple de ce que pourrait être la transition vers une mobilité plus durable, c'est à dire en accord avec les contraintes environnementales et énergétiques auquel le monde doit faire face. Après avoir expérimenté une flotte de VE utilisée par l'administration dès 1993 et proposé un service de bateaux électriques pour le transport public de passagers, un système de VE en libre-service y fut mis en place en 1999.¹⁸⁸ Deux ans plus tard, la ville adopta une plateforme permettant d'assurer les livraisons vers le centre-ville à l'aide d'utilitaires électriques et en 2002 une navette électrique fut inaugurée qui relie les parkings situés en périphérie au centre de la ville.¹⁸⁹ Tous ces services font partie d'un système intégré au réseau de transport en commun et un abonnement unique permet de bénéficier de chacun d'eux.

L'efficacité énergétique peut, comme la réduction de la mobilité, également être aidée par la technologie, non pas au niveau des moyens de transports mais des trajets réalisés. Ces dernières années ont vu apparaître les services de localisation en temps réel des transports en commun¹⁹⁰ ou des vélos en libre-service.¹⁹¹ Les systèmes de guidage routier par satellite intègrent aussi les informations de trafic et permettent, en dérivant les automobilistes, de leur éviter certains embouteillages.

En gardant à l'esprit cette nécessité d'augmentation de l'efficacité, il est possible de voir l'une des principales limites des VE, à savoir leur autonomie limitée, comme un avantage. Cette limite est l'occasion idéale de pousser les constructeurs à mettre en œuvre un allègement radical des véhicules, ce qui permettrait à la fois de les rendre plus efficaces et d'augmenter leur autonomie. Rappelons que comme nous l'avons vu au chapitre II.2, la masse des voitures¹⁹² et leur puissance sont en augmentation depuis de nombreuses années, alors que ces deux caractéristiques ne se justifient pas vu l'usage qui en est fait et que ces augmentations diminuent substantiellement l'efficacité. Attendre que la densité énergétique des batteries fasse des progrès pour rendre possible de faire rouler des véhicules au poids totalement injustifié est à notre avis gâcher une opportunité intéressante dont les constructeurs devraient se saisir. Ajoutons que cette limite d'autonomie comporte une seconde occasion de se réjouir si elle permet aussi de diminuer la mobilité individuelle à longue distance ou de la remplacer par des déplacements en transports en commun plus efficaces.

Outre les VE, attirons l'attention sur la possibilité d'électrification offerte par d'autres moyens de transports. Les transports en commun font déjà largement usage de l'électricité et il serait tout à fait envisageable d'adopter cette motorisation aussi pour les services de bus. En circulation urbaine en particulier, un ensemble de conditions qui avantagent la motorisation électrique sont réunies : trajets relativement courts, vitesse réduite et arrêts fréquents. Par ailleurs, un type de véhicule électrique connaît depuis quelques années un essor tout à fait spectaculaire : le vélo électrique. En Chine, il s'en est vendu pas moins de 21 millions en 2009, soit environ deux fois plus que de voitures.¹⁹³ Le vélo est considéré comme le moyen de transport le plus efficace par Jean-Marc Jancovici.¹⁹⁴ Si on le compare à la voiture, en prenant comme critère le rapport

187 On pense ici par exemple, pour un déplacement domicile-travail, à la possibilité de combiner un déplacement à vélo depuis son domicile jusqu'à une gare avec un déplacement en train entre deux gares et un déplacement à pied jusqu'au lieu de travail.

188 Voir <http://www.yelomobile.fr/>

189 Voir <http://www.ecollectivites.net/article/actualite/la-rochelle-et-la-mobilite-la-solution-electrique/index.html>

190 Voir pour Bruxelles la STIB : <http://www.stib.be/horaires-dienstregeling.html?l=fr> ou pour la SNCB : http://www.railtime.be/website/default.aspx?l=FR&smc=1&gclid=CJyihdqL_6gCFQhO3god-S5Uyg

191 Voir <http://www.villo.be/Retrouvez-toutes-les-stations-Villo!-sur-votre-mobile>

192 Outre le fait de trouver sa cause dans les politiques des constructeurs qui font de la puissance un argument de vente, ce problème vient aussi du comportement des acheteurs de voiture. La plupart des automobilistes achètent un véhicule en fonction de l'utilisation maximale qu'ils en font même si elle n'est que peu fréquente. C'est comme si chaque famille décidait de vivre dans un château toute l'année, sans se poser la question de leurs besoins quotidiens de logement, pour pouvoir asseoir 200 invités uniquement le jour du mariage d'un de leurs enfants.

193 Voir <http://www.time.com/time/world/article/0,8599,1904334,00.html#ixzz0x17GoFHN>

194 Voir Jean-Marc Jancovici, Présentation faite dans le cadre du séminaire du cours "Changements Climatiques :

moyen entre la masse d'une personne et la masse du moyen de transport, le vélo est 5 fois plus léger et la voiture 18 fois plus lourde que la personne transportée [IEW, 2011 : 71]. Pourtant malgré un grand nombre d'avantages, notamment en milieu urbain où les distances sont souvent plus courtes, le vélo ne rencontre pas un grand succès dans beaucoup de villes de par le monde. Une des raisons de ce manque de succès est l'effort physique que nécessite la pratique du vélo, surtout lorsque le relief demande d'accomplir un travail plus important au cycliste. Or l'assistance électrique permet de réduire substantiellement cette pénibilité engendrée par la déclivité du relief et pourrait remettre en selle certains récalcitrants.

La troisième piste consiste, pour les transports, à avoir recours le plus possible à des sources d'énergie renouvelables, en étant prudents avec les sources qui entrent en conflit avec d'autres utilisations comme les agrocarburants. La mobilité individuelle résiduelle doit donc, en plus d'être la plus efficiente possible, utiliser des sources d'énergie renouvelables, ce qui donne tout son intérêt aux VE. En effet nous avons vu qu'en plus d'offrir une bien meilleure efficacité énergétique que les VT, ils pouvaient être utilisés avec de l'électricité à base de sources d'énergie renouvelables et offrent sous certaines conditions le potentiel d'en faciliter ou d'en augmenter la production.

Pour en revenir à l'énergie utilisée dans les transports et en dehors de considérations environnementales ou énergétiques, on peut se demander s'il existe de bonnes raisons de vouloir se débarrasser de l'hégémonie du pétrole sur le système de transport individuel. A notre avis la réponse est positive, en raison des aspects sociaux de cette question. Il est important de se rendre compte qu'en achetant des produits pétroliers on enrichit a priori à la fois les compagnies pétrolières (privées ou étatiques) qui exploitent les gisements et les pays dans lesquels ces gisements se trouvent. Or les multinationales pétrolières sont devenues tellement puissantes qu'elles peuvent souvent échapper au contrôle des états, notamment en ce qui concerne leur contributions financières à la société. Elles ne payent bien souvent que peu ou pas d'impôt dans leur pays d'origine en profitant de niches fiscales et de paradis fiscaux. Le cas de Total est à cet égard édifiant : malgré des bénéfices en 2010 d'environ 10 milliards d'euros,¹⁹⁵ la multinationale d'origine française ne paye aucun impôt sur ses bénéfices dans ce pays en profitant en toute légalité du principe de la non double imposition.¹⁹⁶ Ce faisant, la multinationale ne participe pas assez à la solidarité et au financement des services publics, et donc au développement de la société. On pourrait même ajouter que paradoxalement, elle ne finance pas davantage certaines infrastructures qui sont pourtant indispensables à son activité commerciale.

Un autre exemple de cette puissance est le fait que malgré des bénéfices souvent indécents et les incidences environnementales négatives de l'ensemble de leurs activités (depuis l'extraction jusqu'à l'utilisation), les compagnies pétrolières de certains pays continuent à bénéficier de subsides étatiques. Aux États-Unis par exemple, une loi visant à réduire les subsides accordés aux compagnies pétrolières a finalement été rejetée par le Sénat. Cette loi prévoyait de diminuer les subsides des 5 grandes compagnies pétrolières de "seulement" 2 milliards de dollars par an.¹⁹⁷ Or si l'on se penche sur les soutiens financiers des sénateurs, on remarque clairement, en dehors d'un certain clivage républicain-démocrate, que ce sont ceux qui ont été financièrement soutenus par les compagnies pétrolières pour leurs campagnes électorales qui ont voté contre, et ceux qui ne l'ont pas été ou nettement moins, qui ont voté pour. Au total, les compagnies pétrolières avaient offert lors des dernières élections 21 millions de dollars aux sénateurs qui ont voté contre la loi et seulement 5,4 millions de dollars à ceux qui ont voté pour la loi.¹⁹⁸

impacts et solutions" de Jean-Pascal van Ypersele, UCL, 2 mai 2011, p. 13.

195 Voir http://www.lemonde.fr/economie/article/2011/02/11/total-realise-un-benefice-de-10-milliards-d-euros_1478861_3234.html

196 Le système consiste à déclarer ses bénéfices dans des pays (éventuellement des paradis fiscaux) où la taxe sur les bénéfices est minimale voire nulle et de rapatrier ensuite ces bénéfices qui ne peuvent pas être taxés une seconde fois dans le pays d'origine de la multinationale.

197 Voir http://www.huffingtonpost.com/2011/05/18/oil-subsidies-vote-fails_n_863734.html

198 Voir http://www.huffingtonpost.com/2011/05/18/oil-subsidies-vote-fails_n_863734.html

On pourrait cependant se dire que les pays d'où provient le pétrole sont souvent des pays relativement pauvres, dont l'économie repose pour beaucoup sur le précieux hydrocarbure. Mais la question reste ouverte de savoir si c'est vraiment la population tout entière qui profite de la richesse des sous-sols d'un pays, ou si cette richesse se retrouve souvent dans les mains d'une petite oligarchie ou pire, peut mener à des conflits armés attisés par les perspectives de profit.¹⁹⁹

Pour autant il convient de rappeler que le même risque existe avec la production d'électricité. L'exemple des mines d'uranium au Niger est à cet égard parlant et constitue une bonne piqure de rappel à tous ceux qui pensent qu'il suffirait de se débarrasser du pétrole pour se défaire de l'exploitation par les pays du Nord des ressources énergétiques des pays du Sud.

Dès lors la transition vers un système de mobilité faisant usage prioritairement de la mobilité active et pour les besoins résiduels des modes de déplacement électriques, et utilisant de l'électricité majoritairement produite à partir de sources d'énergie renouvelables et locales, pourrait réduire en partie ces problèmes. Si en plus la production locale prend la forme de coopératives de production - comme les projets regroupés en Belgique au sein de la fédération rescoop²⁰⁰ - elle s'inscrirait dans une perspective de développement social et local.

En résumé, trois voies complémentaires devront à notre avis être empruntées²⁰¹ de concert pour réaliser la nécessaire transformation de la mobilité des individus. D'abord, diminuer la mobilité, ce qui ne pourra se faire que par une refondation profonde à la fois de la conception de la mobilité et d'autres modes d'organisation de nos sociétés, au premier rang duquel l'aménagement du territoire. Ensuite, rendre la mobilité plus efficiente et dans ce cadre, la motorisation électrique, plus efficiente que sa consœur thermique, a un rôle central à jouer et les besoins résiduels en mobilité à assurer par des véhicules particuliers devraient l'être par des VE. Enfin, utiliser des sources renouvelables d'énergie, et là aussi la motorisation électrique est un choix pertinent en ce qu'elle se marie très bien avec la production d'électricité à partir de ce type de sources.

199 Le cas du Nigéria montre que les ressources du sous-sol peuvent être une malédiction si elles se trouvent dans un pays "pauvre" et politiquement instable [Sperling, 2009 : 122].

200 Voir <http://www.rescoop.be/>

201 Notre conclusion est proche de la philosophie de la démarche négaWatt. Voir <http://www.negawatt.org/>

Conclusion

Arrivé au terme de ce travail il est temps de se reposer la question qui nous a guidés tout au long de celui-ci. La VE est-elle une révolution ou une fausse bonne idée ? Notre réponse tient en une phrase : la voiture électrique est une bonne idée mais une mauvaise solution.

Une bonne idée parce que la voiture électrique est intrinsèquement plus efficace que celle à moteur thermique. Elle peut également s'accommoder fort bien d'électricité générée à partir de sources d'énergie renouvelables et ces deux caractéristiques lui donnent la capacité de représenter une très forte réduction des émissions de GES par rapport à une voiture à moteur thermique. Par ailleurs elle permet de réduire le bruit, en dessous de 50 km par heure, ainsi que les effets des pollutions atmosphériques, même si c'est en les déplaçant à défaut de les réduire. La voiture électrique offre des perspectives d'amélioration importantes, d'une part parce qu'il s'agit d'une technologie encore relativement nouvelle et d'autre part parce qu'elle peut bénéficier d'une diminution des émissions de la génération d'électricité si celle-ci se réalise, conformément aux objectifs que se sont fixés de nombreux pays industrialisés.

Mais une mauvaise solution, d'abord parce qu'elle donne l'illusion que le modèle actuel de mobilité individuelle peut être poursuivi. Les constructeurs automobiles ne la conçoivent que comme un simple changement de motorisation. Ensuite parce qu'un grand nombre d'incertitudes planent encore sur la voiture électrique : la fiabilité, la disponibilité des ressources pour les fabriquer et les impacts sur les écosystèmes des batteries, l'augmentation de la pollution atmosphérique et le possible recours à des systèmes de génération d'électricité très émetteurs de GES (centrale à charbon) ou très polluants (centrale nucléaire). Les limites dues aux batteries en termes de d'autonomie et de temps de rechargement risquent en plus d'occasionner des effets pervers.

Elle ne résout pas plus le problème de congestion urbaine et risque fort d'augmenter encore les inégalités sociales entre les populations à haut et à bas revenus, excluant encore un peu plus ces derniers des activités nécessitant d'être motorisés. Par ailleurs, en ce qui concerne les émissions de GES, il apparaît que l'électrification de la motorisation de la voiture ne soit pas suffisante, en considérant le mix énergétique électrique actuel, pour atteindre une réduction en ligne avec les recommandations du GIEC. L'électrification de l'automobile est en outre bien plus onéreuse que d'autres mesures qui pourraient être prises pour diminuer ces émissions.

Pour rendre la mobilité plus durable, au sens de compatible avec les limites environnementales et énergétiques, et moins porteuse de nuisances, il convient à notre avis plutôt d'œuvrer d'abord à diminuer la mobilité, ensuite à la rendre plus efficace et enfin à avoir recours le plus possible aux sources d'énergie renouvelables pour la réaliser. A ce titre la voiture électrique a un rôle à jouer, mais en dehors du modèle dominant actuel qui prône la possession par chaque individu de véhicules surdimensionnés.

Pour terminer, identifions trois sujets de recherches qui mériteraient à notre avis qu'on s'y attarde et que nous avons volontairement écartés, bien que nous pensions qu'ils mériteraient une analyse en profondeur. L'intérêt environnemental et la faisabilité de l'utilisation de moyens électriques pour le transport de marchandises : remplacer les camions thermiques par des camions électriques pour les livraisons de courte distance. Le vélo électrique : analyser son essor dans certaines régions du monde et les freins à son utilisation dans d'autres où il reste utilisé plus confidentiellement, et l'impact qu'il peut avoir en termes de réduction des nuisances occasionnées par le transport automobile. La communication environnementale autour des voitures (électriques et thermiques) : s'intéresser aux annonces publicitaires et aux communiqués de presse des constructeurs. Par ailleurs, ce travail se voulant volontairement un panorama qui reste forcément superficiel, le sujet de chacun de ses chapitres mériterait presque qu'on lui dédie un mémoire entier.

Bibliographie

Note préliminaire : toutes les disponibilités en ligne ont été vérifiées les 2 et 3 juillet 2011. Le lecteur qui ne parvient pas à se procurer un document disponible en ligne peut en demander une copie à l'auteur de ce mémoire à l'adresse : damiensury@gmail.com.

- ACEEE, 2006 Amercian Council for Energy-Efficient Economy, Plug-in hybrids : an Environmental and Economic performance outlook, 22 p. [disponible en ligne : <http://www.aceee.org/sites/default/files/publications/researchreports/t061.pdf>]
- ADEME, 2005 Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie, Le stockage électrochimique, 7 p.
- ADEME, 2007 Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie, Guide des facteurs d'émission (version 5), 240 p.
- ADEME, 2008 Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie, Efficacité énergétique et environnementale des modes de transport – Synthèse publique, 29 p. , (réalisé par Deloitte) [disponible en ligne : <http://www2.ademe.fr/servlet/getDoc?cid=96&m=3&id=51911&p1=00&p2=00&ref=17597>]
- Alvord, 2000 Alvord (Katie), Divorce your car !, New Society Publishers, 2000, 305 p.
- BERR, 2008 Department for Business Enterprise and Regulatory Reform & Department for Transport, Investigation into the Scope for the Transport Sector to Switch to Electric Vehicles and Plugin Hybrid Vehicles, 117 p. [Disponible en ligne : <http://www.berr.gov.uk/files/file48653.pdf>]
- Bonnaure, 2009 Bonnaure (Pierre), Quel avenir pour la voiture électrique ?, in *Futuribles* n° 351, Paris, p. 29-40.
- Boulanger, 2008 Boulanger (Paul-Marie), Une gouvernance du changement sociétal : le *transition management*, in *La Revue Nouvelle*, n°11, novembre 2008, Bruxelles, p. 61-73. [disponible en ligne : http://www.revuenouvelle.be/IMG/pdf/061-073_dossierBoulanger-13p.indd.pdf]
- Boureima, 2009 Boureima (Fayçal-Siddikou) & al., Comparative LCA of electric, hybrid, LPG and gasoline cars in Belgian context, 8 p. (publications du *EVS24 International Battery, Hybrid and Fuel Cell Electric Vehicle Symposium*, Stavanger, Norway, 13-16 mai 2009) [disponible en ligne : <http://www.cars21.com/files/papers/Boureima-paper.pdf>]
- Boxwell, 2010 Boxwell (Michael), Owning an electric car, Greenstream Publishing, 190 p.
- Buclet, 2005 Buclet (Nicolas), Concevoir une nouvelle relation à la consommation : l'économie de fonctionnalité, dans *Annales des Mines - Responsabilité & environnement*, vol 39, 2005, p. 57-67 [disponible en ligne : <http://www.anales.org/re/2005/re39/buclet.pdf>]
- CE, 2011 Commission européenne, Livre Blanc : Feuille de route pour un espace européen

unique des transports – Vers un système de transport compétitif et économe en ressources, 35 p. [disponible en ligne :

http://ec.europa.eu/transport/strategies/doc/2011_white_paper/white_paper_com%282011%29_144_fr.pdf]

CREG, 2010 Commission de régulation de l'électricité et du gaz, Etude relative à l'impact possible de la voiture électrique sur le système électrique belge, 47 p. [disponible en ligne :

<http://www.creg.info/pdf/Etudes/F929FR.pdf>]

CREG, 2010a Commission de régulation de l'électricité et du gaz, Avis relatif à l'étude relative à l'impact possible de la voiture électrique sur le système électrique belge, 8 p. [disponible en ligne :

<http://www.creg.info/pdf/Avis/ARCG100714-046FR.pdf>]

Dobruszkes, 2009 Dobruszkes (Frédéric), Transports, voyages et environnement (syllabus de cours), Université libre de Bruxelles (IGEAT), 202 p.

EABEV, 2009 European Association for Battery Electric Vehicules, Energy consumption, CO2 emissions and other considerations related to Battery Electric Vehicles, 21 p. [disponible en ligne :

http://ec.europa.eu/transport/strategies/consultations/doc/2009_03_27_future_of_transport/20090408_eabev_%28scientific_study%29.pdf]

Ecolane, 2006 Ecolane Transport Consultancy, Life Cycle Assessment of vehicle fuels and technologies, 69 p.

Eurelectric, 2009 Electric vehicles ... the future of transport in Europe. Electricity drives cleaner [disponible en ligne :

http://ec.europa.eu/transport/strategies/consultations/doc/2009_03_27_future_of_transport/20090306_eurelectric_2.pdf]

Eurostat, 2009 Eurostat, Panorama of transports, 194 p.

Evans, 2008 Evans (Keith), An abundance of lithium, 17 p. [disponible en ligne :

http://www.che.ncsu.edu/ILEET/phevs/lithium-availability/An_Abundance_of_Lithium.pdf]

Evans, 2008a Evans (Keith), An abundance of lithium part two, 10 p. [disponible en ligne :

http://www.evworld.com/library/KEvans_LithiumAbundance_pt2.pdf]

GIEC, 2007 Bilan 2007 des changements climatiques. Contribution des Groupes de travail I, II et III au quatrième Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat [Équipe de rédaction principale, Pachauri, R.K. et Reisinger, A. (publié sous la direction de~)], GIEC, 103 pages. [disponible en ligne : http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/syr/ar4_syr_fr.pdf]

GIEC, 2007b Kahn Ribeiro, S., S. Kobayashi, M. Beuthe, J. Gasca, D. Greene, D. S. Lee, Y. Muromachi, P. J. Newton, S. Plotkin, D. Sperling, R. Wit, P. J. Zhou, Transport and its infrastructure. In Climate Change 2007: Mitigation. Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [B. Metz, O.R. Davidson, P.R. Bosch, R. Dave, L.A. Meyer (eds)], Cambridge University Press, p. 323 – 385. [disponible en ligne : <http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/wg3/ar4-wg3-chapter5.pdf>]

- GIEC, 2007c Rogner, H.-H., D. Zhou, R. Bradley. P. Crabbé, O. Edenhofer, B.Hare (Australia), L. Kuijpers, M. Yamaguchi, 2007: Introduction. In Climate Change 2007: Mitigation. Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [B. Metz, O.R. Davidson, P.R. Bosch, R. Dave, L.A. Meyer (eds)], Cambridge University Press, p. 95 - 116 [disponible en ligne : <http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/wg3/ar4-wg3-chapter1.pdf>]
- Grin, 2010 Grin (John), Rotmans (Jan) & Schot (Johan), Transitions to sustainable development, New directions in the study of long term transformative change, Routledge, 2010, 418 p.
- Hall, 2008 Hall (Charles) & al., Provisionnal results from EROI assessments, New-York, State university of New-York [disponible en ligne : <http://www.theoil drum.com/node/3810>]
- Heinberg, 2005 Heinberg (Richard), The Party's Over : Oil, War and the Fate of Industrial Societies, New Society Publishers, 2005, 288 p.
- IBGE, 2006 Institut Bruxellois de la Gestion de l'Environnement, Air bruxellois et transports, 282 p. [disponible en ligne : http://documentation.bruxellesenvironnement.be/documents/PackInfo_AirTransport.PDF?langtype=2060]
- IEA, 2005 International Energy Agency, Prospects for Hydrogen and fuel cells, 256 p. [disponible en ligne : <http://www.iea.org/textbase/nppdf/free/2005/hydrogen2005.pdf>]
- IEA, 2007 International Energy Agency, Status Overview of Hybrid and Electric vehicle technology, 277 p. [disponible en ligne : http://www.ieahev.org/pdfs/annex_7/annex7_hev_final_rpt_110108.pdf]
- IEA, 2010 International Energy Agency, World Energy Outlook, 738 p.
- IEA, 2010a International Energy Agency, CO2 emissions from fuel combustion (highlights), 130 p.
- IEA, 2010b International Energy Agency, Outlook for hybrid and electric vehicles - 2010, 3 p.
- IEW, 2010 Inter Environnement Wallonie, Position de la Fédération Inter Environnement Wallonie sur les véhicules électriques, rapport préliminaire du 10 mai 2010, 32 p.
- IEW, 2011 Inter Environnement Wallonie (Pierre Courbe), Véhicules électriques ? Changer de mobilité, pas de voiture !, 2011, 97 p. [disponible en ligne : http://www.iewonline.be/IMG/pdf/voiture_electrique_BR.pdf]
- Ineris, 2011 Institut national de l'environnement industriel et des risques, Approche de la maîtrise des risques spécifiques de la filière véhicules électriques, 2011, 92 p. [disponible en ligne : <http://www.ineris.fr/centredoc/ve-analyse-apr-couv-ineris.pdf>]

- J.D. Power, 2010 J.D. Power & Associates, Drive Green 2020 : more hope than reality ?, 2010, 80 p.
- Kalhammer, 2007 Kalhammer (Fritz) & al., Status and prospects for zero emissions vehicle technology, CARB (State of California Air Resource Board), Sacramento, 207 p.
- Kamal, 2009 Kamal (M.A.S.) & al., Driving Assist System for Ecological Driving Using Model Predictive Control, Fukuoka Industry, Science and Technology Foundation et Université de Kyushu, 5 p.
- Kaplan, 2008 Kaplan (Daniel) et Marzloff (Bruno), Pour une mobilité plus libre et plus durable, FYP, 86 p.
- Kendall, 2008 Kendall (Gary), Plugged in, the end of the oil age, WWF, 202 p. [disponible en ligne : <http://www.wwf.dk/dk/Service/Bibliotek/Klima/Rapporter+mv./Plugged+in>]
- Kintner-Meyer, 2007 Kintner-Meyer (Michael) & al., Impact assessment of plug-in hybrid vehicles on electric utilities and regional U.S. Power grids – Part 1 : Technical analysis, Pacific Northwest National Laboratories, 39 p. [Disponible en ligne : <http://www.ferc.gov/about/com-mem/wellinghoff/5-24-07-technical-analy-wellinghoff.pdf>]
- Kromer, 2007 Kromer (Matthew) & al., Electric powertrains : Opportunities and challenges in the US light-duty vehicle fleet, MIT, 153 p. [disponible en ligne : <http://dspace.mit.edu/bitstream/handle/1721.1/40372/190864371.pdf?sequence=1>]
- Lache, 2008 Lache (Rod) & al., Electric cars plugged in : batteries must be included, Deutsche Bank, 55 p. [disponible en ligne : <http://cn.gasgoo.com/Upload/Define/2009113115215Upfile.pdf>]
- McKinsey, 2009 McKinsey & Company, Roads towards a low-carbon future : Reducing CO2 emissions from passenger vehicles in the global road transportation system, 38p. [disponible en ligne : http://www.mckinsey.com/client-service/ccsi/pdf/roads_toward_low_carbon_future.pdf]
- McKinsey, 2009a McKinsey & Company, Pathways to a low carbon economy, version 2 of the global greenhouse gas abatement cost curve, 192 p. [disponible en ligne avec enregistrement : <https://solutions.mckinsey.com/climatedesk/>]
- Matheys, 2008 Matheys (Julien) & al., Life-cycle assessment of batteries in the context of the EU Directive on end-of-life vehicles, *International Journal of Vehicle Design*, p. 189-203. [disponible en ligne : <http://www.springerlink.com/content/t254153m760137w2/>]
- NHTSA, 2009 National Highway Traffic Safety Administration, Incidence of pedestrian and bicyclist crashes by hybrid electric passenger vehicles, 22 p. [disponible en ligne : <http://www-nrd.nhtsa.dot.gov/Pubs/811204.PDF>]
- Notter, 2010 Notter (Dominic) & al., Contribution of Li-Ion batteries to the environmental impact of electric vehicles, in *Environnemental Science & Technology*, vol 44, N°17, p. 6550-6556 [disponible en ligne : <http://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/es903729a>]

- Orfeuil, 2008 Orfeuil (Jean-Pierre), Une approche laïque de la mobilité, Paris, Editions Descartes et Cie, 173 p.
- Pluchet, 2010 Pluchet (Julien) & Destruel (Pierre), Etat de la R&D dans le domaine des batteries pour véhicules électriques au Japon, Ambassade de France au Japon, 90 p. [disponible en ligne : http://www.bulletins-electroniques.com/rapports/smm10_041.htm]
- Prakash 2009 Prakash (Shruti) & al., Performance of Li-ion secondary batteries in low power, hybrid power supplies, in *Journal of Power Sources*, Volume 189, Issue 2, 15 April 2009, p. 1184-1189.
- Ricardo, 2009 Ricardo Media Office, UK grid capacity sufficient for EV's [document payant dont le résumé exécutif est disponible en ligne : <http://www.ricardo.com/News--Media/Press-releases/News-releases1/2009/UK-power-infrastructure-has-capacity-for-significant-rise-in-use-of-electric-and-plug-in-hybrid-vehicles/>]
- Statbel, 2010 Statbel, Les belges et leurs voitures, 4 p. [disponible en ligne : http://statbel.fgov.be/fr/binaries/2010_Brochure_tcm326-84910.pdf]
- Syrota, 2008 Syrota (Jean), Perspectives concernant le véhicule grand public d'ici 2030, Centre d'analyse stratégique, 129 p. [disponible en ligne : <http://www.lepoint2.com/sons/pdf/rapport-syrota-voiture-electrique.pdf>]
- Sperling, 2009 Sperling (Daniel) & Gordon (Deborah), Two billion cars, Driving towards sustainability, Oxford University Press, New-York, 322 p.
- Tahil, 2006 Tahil (William), The trouble with lithium, Meridional International Research, 14 p. [disponible en ligne : http://tyler.blogware.com/lithium_shortage.pdf]
- Tahil, 2008 Tahil (William), The trouble with lithium 2, Meridional International Research, 58 p. [disponible en ligne : http://www.meridian-int-res.com/Projects/Lithium_Microscope.pdf]
- T&E, 2009 Transport & Environment, How to avoid an electric shock, 52 p. [disponible en ligne : http://www.transportenvironment.org/Publications/prep_hand_out/lid/560]
- T&E, 2010 Transport & Environment, Green power for electric cars, 85 p. [disponible en ligne : http://www.transportenvironment.org/Publications/prep_hand_out/lid/568]
- T&E, 2010a Transport & Environment, How clean are Europe's cars ?, 31 p. [disponible en ligne, après enregistrement : http://www.transportenvironment.org/how_clean_are_europe-s_cars/]
- Youngquist, 1997 Youngquist (Walter), GeoDestinies : The inevitable control of earth resources over nations and individuals, National, 1997, 500 p.

Van Damme, 2009 Van Damme (Ghislain), Directeur commercial "solutions de recyclage" chez Umicore, Interview réalisée dans le cadre de l'émission "Question à la une : les voitures électriques", RTBF, 14 octobre 2009 [disponible en ligne : http://www.rtf.be/tv/revoir/detail_questions-a-la-une?uid=36377564668&idshedule=52bcd1c4a6e07ce33507bdd6545dc36e]

Van Mierlo, 2003 Van Mierlo (Joeri) & al., Comparison of the environmental damage caused by vehicles with different alternative fuels and drivetrains in a Brussels context, VUB, 11 p. [disponible en ligne : http://etecmc10.vub.ac.be/etecphp/publications/Van_Mierlo_2003_SAE_D017002_Ecoscore%28E%29.pdf]

Van Mierlo, 2004 Van Mierlo (Joeri) & al., Driving style and traffic measures—influence on vehicle emissions and fuel consumption, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers -- Part D -- Journal of Automobile Engineering , Volume 218, No. 1, (2004), p. 43-50.

Van Mierlo, 2010 Van Mierlo (Joeri), How clean is the electricity of EVs ? An LCA and W-t-W approach, Présentation à la conférence Eurelectric : *Electric vehicles : implementation challenges move into top gear*, 28-29 septembre 2010 [disponible en ligne avec mot de passe : <http://www.eurelectric.org>]

Vreeswijk, 2010 Vreeswijk (J.D.) & al., Energy Efficient Traffic Management and Control - the eCoMove Approach and Expected Benefits, ecomove, 7 p. [disponible en ligne : <http://www.ecomove-project.eu/assets/Documents/Presentations/100416-JDVMMBVA-IEEE-ITSC2010sub.pdf>]

Weiss, 2000 Weiss (Malcolm) & al., On the road in 2020 A life-cycle analysis of new automobile technologies, MIT, 2000, 160p. [disponible en ligne : http://web.mit.edu/sloan-auto-lab/research/beforeh2/files/weiss_otr2020.pdf]

Wells, 2010 Wells (Peter) & al., Lowering the bar : options for the automotive industry to achieve 80g/km CO₂ by 2020 in Europe, Center for Automotive Industry Research (CAIR) & Centre for Business Relationships Accountability, Sustainability & Society of the University of Cardiff (BRASS), Cardiff University, 113 p. [Disponible en ligne : <http://www.greenpeace.org/raw/content/eu-unit/press-centre/reports/lowering-the-bar-for-cars-20-05-10.pdf>]

WWF, 2011 World Wide Fund for Nature, The energy report – 100% renewable energy by 2050, 256 p. [disponible en ligne : http://www.wwf.be/_media/WWF_energy_report_239324.pdf]

Zimmer, 2009 Zimmer (Wiebke) & al., Environmental impacts and impact on the electricity market of a large scale introduction of electric cars in Europe, European Topic Center on Air and Climate Change (Réalisé par l'Öko-Institut, Berlin), 169 p. [disponible en ligne : http://air-climate.eionet.europa.eu/docs/ETCACC_TP_2009_4_electromobility.pdf]