

# Impacts de la voiture électrique sur les émissions de CO<sub>2</sub> liées à la mobilité individuelle

Le cas de l'agglomération franco-valdo-genevoise

**Yves Steiner**

Sous la direction du Prof. Giuseppe Pini



<b>PREMIERE PARTIE : INTRODUCTION ET PROBLEMATIQUE .....</b>	<b>4</b>
INTRODUCTION .....	5
CONTEXTE GENERAL DU QUESTIONNEMENT .....	8
<b>1. Développement urbain durable .....</b>	<b>8</b>
1.1. Premières mesures sur les émissions polluantes .....	8
1.1.1. Normes Euro .....	9
1.2. Mesures sur les polluants globaux.....	11
1.2.1. Le protocole de Kyoto.....	12
1.2.2. La loi sur le CO <sub>2</sub> .....	14
1.3. Normes de consommation.....	15
1.3.1. Normes américaines.....	15
1.3.2. Normes japonaises .....	15
1.3.3. Union Européenne.....	15
MOBILITE URBAINE .....	16
<b>2. Notion de choix modal et politiques publiques .....</b>	<b>16</b>
2.1. Financement des infrastructures.....	17
2.1.1. Péage urbain .....	19
2.2. Promotion de la densité urbaine .....	20
2.3. Promotion de la mixité fonctionnelle .....	22
2.3.1. Choix résidentiel .....	24
2.3.2. L'utilité des déplacements .....	25
2.4. L'importance du stationnement.....	25
2.5. Ordonnance sur la protection contre le bruit (OPB) .....	26
ENERGIE ET ELECTRICITE .....	28
<b>3. Les énergies fossiles.....</b>	<b>28</b>
3.1. L'énergie en Suisse.....	29
3.1.1. Impact des voitures électriques sur la consommation d'électricité.....	30
3.2. Consommation des véhicules .....	31
3.2.1. Rendement énergétique des voitures .....	31
3.2.2. Poids, dimension et puissance des voitures .....	33
3.2.3. Style de conduite et conditions de circulation .....	34
3.2.4. Consommation, émissions : valeurs officielles et réelles .....	36
3.2.5. Véhicules classiques .....	36
3.2.6. Véhicules à carburants alternatifs.....	37
3.2.7. Nouvelles technologies.....	37
LA VOITURE ELECTRIQUE.....	38
<b>4. Brève histoire de la voiture électrique .....</b>	<b>38</b>
4.1. La voiture électrique aujourd'hui et demain.....	39
4.1.1. Techniques utilisées et caractéristiques des voitures électriques.....	42
4.1.2. Batteries .....	43
4.2. Marché des véhicules électriques .....	44
4.2.1. Projets pilotes .....	45
4.2.2. Progetto veicoli elettrici leggeri .....	45
4.2.3. Project better place.....	47
4.2.4. Incitations à l'achat de véhicules électriques .....	48
<b>DEUXIÈME PARTIE : MÉTHODOLOGIE .....</b>	<b>50</b>
METHODOLOGIE .....	51
<b>1. Postulats de départ .....</b>	<b>51</b>
<b>2. Hypothèses.....</b>	<b>53</b>
2.1. Identification des ménages .....	53

2.2. Modélisation du parc automobile .....	53
2.3. Coefficients de consommation .....	53
2.3.1. Type de routes.....	54
2.3.2. Démarrages à froid .....	54
2.4. Test des hypothèses.....	54
3. <i>Schéma de la méthode</i> .....	55
<b>TROISIÈME PARTIE : RÉSULTATS .....</b>	<b>56</b>
IDENTIFICATION DE LA POPULATION CIBLE.....	57
1. <i>Population cible</i> .....	57
1.1. Déplacements.....	57
1.2. Caractéristique du domicile.....	57
1.3. Caractéristiques des ménages et des voitures .....	59
2. <i>Parc automobile</i> .....	59
2.1. Evolution du parc automobile.....	60
2.1.1. Mises hors circulation .....	60
2.1.2. Nouvelles mises en circulation .....	61
3. <i>Coefficient de consommation</i> .....	65
3.1. Structure du parc automobile .....	65
3.2. Répartition des prestations kilométriques par catégories.....	66
3.3. Consommation de carburant.....	67
3.3.1. Consommation des voitures .....	68
3.3.2. Consommation des voitures électriques .....	69
3.3.3. Trafic urbain et extra urbain.....	70
3.3.4. Consommation officielle et consommation réelle.....	70
4. <i>Evolution des prestations kilométriques</i> .....	71
4.1. Répartition sur le réseau routier.....	73
5. <i>Emissions de CO<sub>2</sub></i> .....	74
5.1. Coefficients d'émissions.....	74
5.1.1. Cycles de démarrages à froid et arrêts .....	75
5.1.2. Emissions de CO <sub>2</sub> par kWh consommé en Suisse .....	75
IMPACT DES VOITURES ELECTRIQUES.....	78
6. <i>Modèle Renault</i> .....	79
7. <i>Modèle encouragement politique marqué</i> .....	80
8. <i>Modèle intermédiaire</i> .....	81
9. <i>Modèle alternatif</i> .....	83
10. <i>Récapitulation des résultats</i> .....	84
<b>QUATRIÈME PARTIE : CONCLUSION .....</b>	<b>86</b>
CONCLUSION.....	87
<b>CINQUIÈME PARTIE : BIBLIOGRAPHIE ET ANNEXES .....</b>	<b>90</b>
BIBLIOGRAPHIE.....	91
ANNEXES .....	98

# **PREMIERE PARTIE : INTRODUCTION ET PROBLEMATIQUE**

## INTRODUCTION

Au cours des deux dernières décennies, la question de la préservation de l'environnement a échappé à ses traditionnels tenants pour venir irriguer l'ensemble de la société. De chasse gardée d'une minorité, la plupart du temps ignorée, voire raillée, elle est devenue un pilier de toute politique publique, au même titre que l'économie ou le social. Au cœur de cette évolution, le changement climatique dû aux émissions anthropiques de gaz à effet de serre est devenu un sujet sociétal majeur. Des conférences internationales, regroupant tous les principaux dirigeants de la planète, lui sont régulièrement consacrées.

La combustion de produits issus du pétrole compte pour une part importante parmi les émissions de gaz à effet de serre. Notre actuelle façon de vivre est, en effet, indissociablement liée à la consommation de ressources naturelles non renouvelables, au premier rang desquelles, le pétrole. Or, dans un avenir plus ou moins proche, ces ressources sont, inéluctablement, appelées à se tarir. Dès lors, l'alternative est la suivante : renoncer au confort apporté par les énergies fossiles depuis la révolution industrielle ou s'adapter afin de pérenniser nos modes de vie.

Partout dans le monde, les transports de personnes et de marchandises consomment une quantité considérable de carburants issus du pétrole. La mobilité compte parmi les grandes libertés conquises depuis deux siècles. Néanmoins, de plus en plus de voix s'élèvent pour réclamer un changement de nos habitudes en la matière. D'aucun estiment que le modèle de la voiture individuelle est à bout de souffle. L'émergence de nouvelles puissances économiques permet la sortie de la pauvreté de millions de personnes, se montrant tout autant avides de consommation. Malheureusement, nous savons que les ressources naturelles présentes sur Terre sont insuffisantes pour permettre la généralisation du mode de vie occidental à l'échelle de la planète. La mobilité individuelle ne pourra, dès lors, à long terme, perdurer dans la forme que nous lui connaissons. Une révolution dans ce domaine devra se produire pour que la fin programmée du pétrole ne se traduise pas par une perte brutale d'un des principaux acquis de la révolution industrielle.

La voiture électrique peut-elle participer à révolutionner notre manière de nous déplacer ? Une révolution dans les transports peut se définir comme "un changement substantiel dans les activités de transport d'une société [...] se passant en moins de 25 ans. C'est-à-dire, un changement (augmentation ou diminution) de 50 % des pratiques d'avant la révolution ou touchant au moins 10 % de la population" (Gilbert & Perl, 2008, p. 13). Analyser les révolutions passées dans les transports (vapeur, moteur à combustion interne, etc.) permet de constater que ces dernières produisent souvent des effets différents de ceux initialement attendus (Gilbert & Perl, 2008, p. 21). Les progrès à venir dans le stockage de l'électricité, couplés à la nécessité d'une sortie progressive des combustibles fossiles, seront-ils à l'origine d'une révolution des transports et quels en

seront les effets ?

Au-delà de la globalité de ces considérations, ce mémoire s'intéresse, plus modestement, aux effets à attendre d'une électrification croissante du parc automobile helvétique. Dans le contexte d'une recherche d'un mode de développement plus durable, la Suisse s'est liée, par des engagements internationaux, à réduire ses émissions de gaz à effet de serre. Or, le transport, essentiellement routier, constitue probablement le domaine dans lequel les progrès en la matière sont les moins significatifs à l'heure actuelle.

Afin de se libérer de la dépendance au pétrole et pour l'atteinte des objectifs environnementaux fixés, les constructeurs automobiles sont enjoins à produire des véhicules toujours plus performants sur le plan énergétique. Dans ce contexte, la voiture électrique, objet folklorique il y a peu encore, se retrouve, de plus en plus fréquemment, présentée comme une composante essentielle d'un système de transport durable. De cette situation découle la question générale orientant la présente recherche :

**Quel serait l'impact d'un remplacement d'une part significative du parc automobile existant par des voitures électriques à batteries sur les émissions de CO<sub>2</sub> du transport individuel de personnes dans l'agglomération franco-valdo-genevoise<sup>1</sup> ?**

De la réponse à un tel questionnement peut découler une appréhension différente des perspectives de développement urbain. Les politiques publiques cherchant à répartir différemment la demande de mobilité entre les différents modes de transport pourraient entraver l'électrification du parc automobile, tout comme les choix effectués au niveau des investissements dans les infrastructures de transport. Avec pour effet de favoriser des choix collectivement plus coûteux et de moindre efficacité.

La structure de ce travail s'articule de la manière suivante. Dans sa première partie, nous nous intéressons, tout d'abord, au contexte général dans lequel s'insère notre question de départ; l'importance croissante des préoccupations environnementales. Ensuite, nous nous employons à définir quelques concepts généraux de la géographie des transports nous permettant d'appréhender les causes et conséquences de la mobilité observable dans l'agglomération franco-valdo-genevoise. Nous nous penchons, également, sur les besoins énergétiques de la Suisse et sur les moyens mis en œuvre pour y répondre. Une présentation des caractéristiques des voitures électriques clôturera cette première partie. Leur connaissance nous permettra de fonder les postulats sur lesquels reposent nos hypothèses, présentées en deuxième partie de ce travail. Nous y trouverons, également, une description de la méthodologie construite pour répondre à notre questionnement, ainsi que des données utilisées à cette fin. La troisième partie de cette étude présentera, en premier lieu, le potentiel identifié de pénétration du marché par les voitures électriques, fondé sur les caractéristiques de mobilité individuelle identifiées précédemment. Dans un second temps, une modélisation du parc automobile suisse et

---

<sup>1</sup> Le microrecensement transport 2005 (MRT 2005) ne concerne, de fait, que les ménages de la partie suisse de l'agglomération (Genève et district de Nyon). Il serait, ainsi, plus correct de parler d'agglomération "valdo-genevoise". Néanmoins, nous nous tenons à l'appellation officielle de l'agglomération, soit "agglomération franco-valdo-genevoise", même si les véhicules français sont exclus de notre analyse. Nous utilisons également, plus simplement, le terme "agglomération".

de son évolution attendue, nous permettra d'établir des coefficients d'émissions de CO<sub>2</sub> pour les prestations kilométriques effectuées par les voitures en Suisse. De ces coefficients, nous obtiendrons les résultats en matière d'émissions du parc automobile, selon nos scénarii de pénétration du marché par les voitures électriques. Nous conclurons cette étude par une récapitulation des enseignements tirés de notre méthode ainsi que par une critique des résultats obtenus. Nous proposerons également un élargissement de notre angle d'approche.

# CONTEXTE GÉNÉRAL DU QUESTIONNEMENT

## 1. Développement urbain durable

Le concept de développement durable a pris une importance considérable au cours de la décennie écoulée et est devenu, dès lors, indissociable de toute politique publique. Les politiques d'aménagement urbain ne font pas exception à la règle. Un des principaux problèmes auxquels toute ville se trouve confrontée est la non durabilité de son système de transport, caractérisé par sa double dépendance au pétrole (ressource non renouvelable) et aux moyens de transport individuels motorisés, gros consommateurs de ressources. "La mobilité peut être qualifiée de durable lorsque sa réalisation respecte l'intégrité de l'environnement, permet d'assurer les besoins matériels de la vie et garantit l'équité entre les individus. Cette mobilité n'est réalisable que si le système de transport est lui-même durable. [...] Aujourd'hui, aucun système de transport dont les prestations sont effectuées par des véhicules à moteur ne permet la réalisation d'une mobilité durable" (Boillat & Pini, 2005).

La durabilité de la mobilité urbaine passe ainsi, par l'affranchissement progressif de la dépendance aux carburants fossiles et à l'automobile. "La maîtrise des déplacements automobile est un défi majeur pour le développement durable des villes. [...] Une ville durable est une ville plus dense, plus compacte, moins dépendante de la voiture, plus économe en énergie, et surtout en énergie pétrolière." (Da Cunha, 2005, p. 10). Néanmoins, tout point du territoire n'étant pas doté des mêmes possibilités, la suppression ou la taxation dissuasive de l'usage des moyens de transports motorisés individuels empêcherait bon nombre d'individus de subvenir à leurs besoins à un coût supportable. Cette situation serait socialement inéquitable et ne répondrait, dès lors, pas non plus aux critères de durabilité. La morphologie de nos territoires, héritée des aménagements passés, fait que l'automobile demeurera indispensable avant longtemps. La durabilité du système de transport passera donc, avant tout, par une meilleure maîtrise des externalités négatives générées par son usage.

### 1.1. Premières mesures sur les émissions polluantes

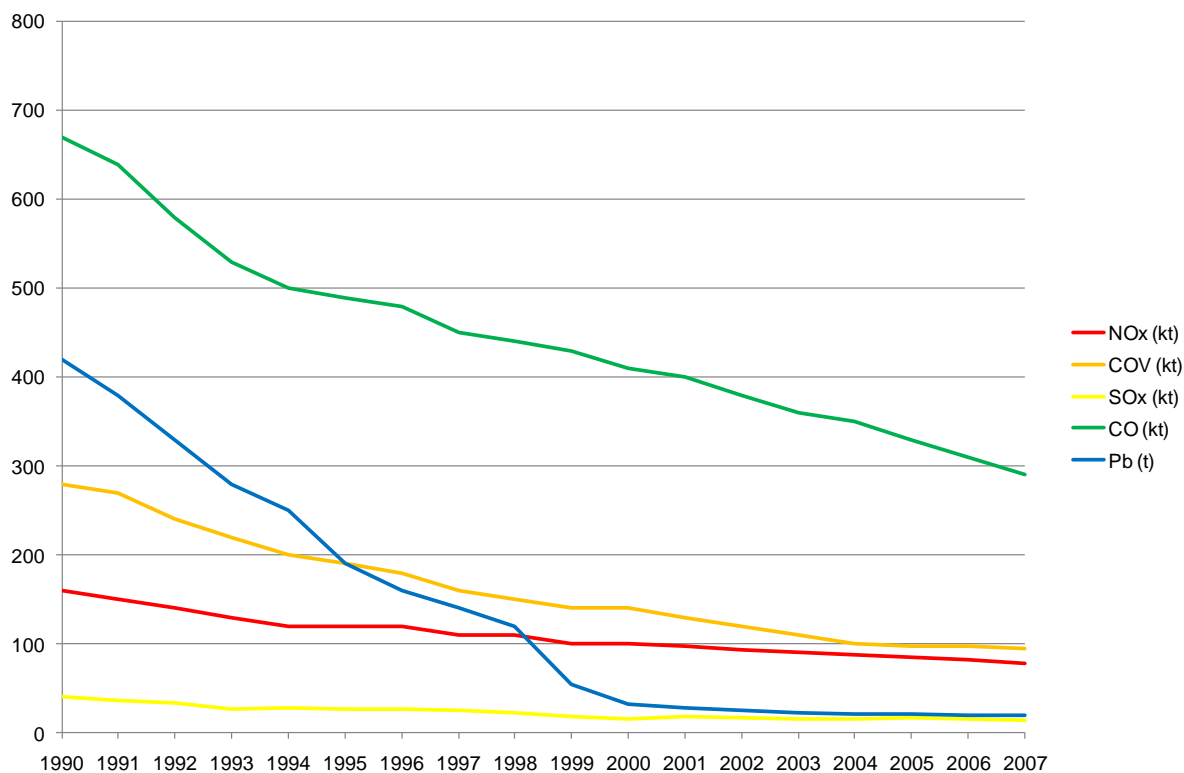
Jusque récemment, les politiques environnementales se sont focalisées sur les problèmes liés aux polluants locaux, apparaissant comme les plus prégnants. Initiées dans les années quatre-vingts, elles visaient à diminuer les émissions polluantes dans le secteur des transports et se sont donc, naturellement, attaquées en priorité à ce type de rejets. Le premier rapport de l'Office fédéral de l'environnement, des forêts et du paysage (OFEFP) consacré au calcul des émissions polluantes date de 1986. Il fut suivi, fin 1995, par le rapport de l'OFEFP n° 255 "Emissions polluantes du trafic routier de 1950 à 2010" (OFEFP, 2004, p. 11).

Suite aux craintes engendrées par la mort des forêts, le catalyseur a été rendu



obligatoire sur les nouveaux véhicules à essence, puis diesel. Cette introduction à permis de diminuer les émissions d'oxyde d'azote (NO<sub>x</sub>) et d'hydrocarbures (HC) et, indirectement, de plomb, cet aditif ayant dû être supprimé de l'essence, les pots catalytiques ne le supportant pas. Ces bons résultats ont été obtenus malgré la forte augmentation des kilomètres parcourus durant la même période.

Figure 1 : diminution des émissions des principaux polluants locaux depuis 1990 (OFEV, 2009a)



Par la suite, les valeurs limites d'émissions des véhicules ont été régulièrement durcies, à mesure que les moteurs devenaient plus performants. Notamment avec l'introduction de la norme Euro, en 1993.

### 1.1.1. Normes Euro

Depuis l'entrée en vigueur de la norme Euro 1 rendant, par exemple, le catalyseur obligatoire sur toutes les voitures neuves, les valeurs limites fixées pour les émissions polluantes des voitures n'ont cessé d'être revues à la baisse. Chaque nouvelle norme est appliquée en deux temps. Tout d'abord, les nouveaux véhicules ne peuvent être homologués que s'ils remplissent les conditions imposées. Ensuite, dans un délai d'une année à une année et demie, les véhicules neufs déjà existants ne peuvent plus être vendus.

Depuis le 1<sup>er</sup> septembre 2009, nous vivons ainsi sous le régime de la norme Euro 5. Les véhicules neufs ne respectant pas cette nouvelle norme peuvent être importés jusqu'au 31 décembre 2010 (OFEV, 2009b). La norme Euro 6, quant à elle, est d'ors et déjà prévue pour l'horizon 2014-2015. Ces normes fixent les valeurs limites d'émissions pour les polluants suivants :

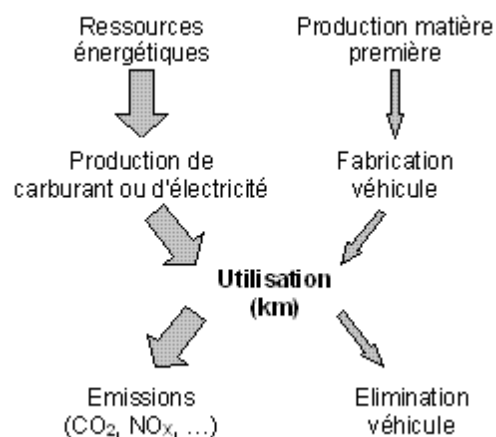
Tableau 1 : évolution des valeurs limite d'émissions pour les voitures de tourisme essence et diesel (OFEV, 2009c)

		Etape	Entrée en vigueur	Cycle de mesures	Valeurs limites						
					CO [g/km]	NMHC [g/km]	THC [g/km]	NOx [g/km]	THC+NO <sub>x</sub> [g/km]	PM [mg/km]	PN [# /km]
<b>ECE 15</b>	Essence	ECE 15.00	01.1974	ECE 15	30-65	-	5.1-8.2	-	-	-	-
	Essence	ECE 15.01	09.1975	ECE 15	24-52	-	4.3-7.0	-	-	-	-
	Essence	ECE 15.02	10.1977	ECE 15	24-52	-	4.3-7.0	3.0-4.7	-	-	-
	Essence	ECE 15.03	10.1980	ECE 15	19-42	-	3.8-6.2	2.5-4.0	-	-	-
<b>OGE</b>	Essence	OGE 83	10.1982	FTP 72	24.20	-	2.10	1.90	-	-	-
	Essence	OGE 86	10.1986	FTP 72	9.30	-	0.90	1.20	-	-	-
<b>OEV 1</b>	Essence	OEV 1-1	10.1987	FTP 75	2.10	-	0.25	0.62	-	-	-
	Diesel				2.10	-	0.25	0.62	-	370	-
<b>OETV 1</b>	Diesel	OEV 1-2	10.1988	NEFZ	2.10	-	0.25	0.62	-	124	-
	Essence	EURO 2	10.1995/96	NEFZm	2.30	-	-	-	0.50	-	-
	Diesel				1.00	-	-	-	0.70	80	-
	Essence	EURO 3	01.2000/01	NEFZm	2.30	-	0.20	0.15	-	-	-
	Diesel				0.64	-	-	0.50	0.56	50	-
	Essence	EURO 4	01.2005/06	NEFZm	1.00	-	0.10	0.08	-	-	-
	Diesel				0.50	-	-	0.25	0.30	25	-
	Essence	EURO 5	09.2009/10	NEFZm	1.00	0.068	0.10	0.06	-	5.0/4.5	-
	Diesel				0.50	-	-	0.18	0.23	5.0/4.5	6.0 x10 <sup>11</sup>
	Essence	EURO 6	09.2014/15	NEFZm	1.00	0.068	0.10	0.06	-	5.0/4.5	4.5
Diesel				0.50	-	-	0.08	0.17	5.0/4.5	6.0 x10 <sup>11</sup>	

On le constate, l'application des normes Euro a permis de réduire de manière drastique les émissions de polluants locaux. Elles ne concernent, en revanche, absolument pas les émissions de gaz à effet de serre (GES), à commencer par le CO<sub>2</sub>.

Dans le cycle de vie d'un véhicule, comme l'illustre la figure 2, "la phase d'utilisation [...] est celle qui est la plus gourmande en matière et en énergie [...]" (Canton de Vaud). Dans le cas d'une voiture électrique, cette situation est quelque peu différente, ce type de véhicule étant, justement, sensé être beaucoup moins polluant lors de sa phase d'utilisation. En revanche, les batteries impliquent un recyclage supplémentaire. Cette particularité introduit donc, en n'appliquant pas la vérité des coûts environnementaux, une distorsion de concurrence entre véhicules

Figure 2 : cycle de vie des moyens de transport (Canton de Vaud)



électriques et traditionnels à hautes performances environnementales, puisque les émissions des premiers ne sont pas prises en compte par la norme. Cette concurrence déloyale pourrait encore s'accroître si d'aventure, une future norme Euro 7 venait à comptabiliser les émissions de CO<sub>2</sub>.

Cette situation de marché imparfait pourrait permettre de favoriser la conquête du parc automobile par les voitures électriques, ce qui peut être perçu, a priori, comme quelque chose de souhaitable. Néanmoins, cette conquête n'a de sens que si elle s'accompagne d'une réelle amélioration environnementale et non si l'on ne fait que reporter le problème à un autre niveau du cycle de vie des véhicules.

## 1.2. Mesures sur les polluants globaux

Force est de constater que, à l'exception des émissions d'ozone (O<sub>3</sub>) et des particules fines (PM<sub>10</sub>), les politiques visant à réduire les émissions de polluants locaux ont porté leurs fruits, ces dernières ayant considérablement décliné. Cependant, les politiques visant à lutter contre les polluants locaux sont sans effet sur les émissions de GES au niveau global. Ainsi, au niveau mondial, le secteur des transports était, en 2000, à l'origine de 23 % des rejets de CO<sub>2</sub> (18 % provenant uniquement du secteur routier). Dans les pays de l'OCDE, ce taux montait même à 27 %, dont 86 % issus du transport routier (OCDE, 2004, p. 9).

Les mesures visant à réduire les émissions du secteur des transports peuvent être de deux types. La première famille regroupe les mesures prises au niveau des véhicules et des carburants. Ce sont ces normes qui ont démontré leur efficacité pour lutter contre les émissions de polluants à l'échelle locale. Leur avantage principal tient dans la simplicité de leur mise en place. Il est, en effet, relativement facile et efficace d'édicter des normes d'émissions pour les véhicules ou de teneur en soufre des carburants (OCDE, 2004, p. 10).

La seconde famille regroupe les mesures cherchant à agir sur la demande de transport. Ces dernières sont beaucoup plus compliquées à mettre en place, bien que leur potentiel d'efficacité soit bien plus important. En effet, les limites fixées en matière d'émissions des véhicules sont relativement indolores pour les individus, étant donné que ceux-ci n'ont pas à arbitrer entre le prix d'un véhicule et ses performances énergétiques, puisque tous sont soumis aux mêmes normes. En revanche, l'introduction d'une tarification de l'usage des moyens de transport individuels motorisés est beaucoup plus sensible politiquement (OCDE, 2004, p. 10), puisque l'on s'attaque à la demande de transport et, par là, aux habitudes modales des individus, très difficiles à faire évoluer.

Cette seconde famille de mesures regroupe, également, celles prises en matière d'aménagement du territoire. On peut, en effet, aussi influencer sur la demande de transport (ou plutôt, tenter de l'orienter vers des modes de transports plus durables) en organisant l'espace de manière à favoriser les modes en question. Ces mesures de second type sont analysées en détail plus avant dans cette étude.

### 1.2.1. Le protocole de Kyoto

Les pays membres et associés de la Conférence Européenne des Ministres des Transports (CEMT) partagent tous les objectifs de la Convention-Cadre sur les Changements Climatiques (CCCC). Adoptée par les Nations Unies en 1992, cette convention vise à "stabiliser les concentrations de gaz à effet de serre [...] dans l'atmosphère à un niveau qui empêche toute perturbation anthropique dangereuse du système climatique [...] dans un délai suffisant pour que les écosystèmes puissent s'adapter naturellement aux changements climatiques, que la production alimentaire ne soit pas menacée et que le développement économique puisse se poursuivre d'une manière durable." (ONU, 1992, p. 5).

La Suisse figure aux annexes I et II de la convention, ce qui signifie qu'elle s'est engagée, entre autres, à prendre des mesures visant à limiter ses émissions anthropiques de GES non réglementés par le protocole de Montréal (CFC responsables de la destruction de la couche d'ozone) (ONU, 1992, p. 8).

La troisième réunion des pays participants à cette convention s'est tenue en 1998. Elle a débouché sur un accord, connu sous le nom de protocole de Kyoto, qui a pour but de réaliser l'objectif précité de la convention-cadre (ONU, 1998, p. 1). Le protocole de Kyoto fixe ainsi les niveaux (réduction de 5 % au minimum) auxquels doivent avoir été ramenées les émissions de gaz à effet de serre, par rapport aux niveaux de 1990, durant la période 2008-2012. La Suisse, qui a ratifié le protocole le 9 juillet 2003, s'est engagée, comme les pays de l'Union Européenne, à les réduire de 8 % (les émissions de la Suisse ne devaient pas, par conséquent, dépasser 92 % des émissions de 1990).

Les alinéas v "Réduction progressive ou suppression graduelle des imperfections du marché, des incitations fiscales, des exonérations d'impôt et de droits des subventions qui vont à l'encontre de l'objectif de la convention, dans tous les secteurs émettant des gaz à effet de serre et application d'instruments du marché" et vii "Adoption de mesures visant à limiter ou à réduire les émissions de gaz à effet de serre [...] dans le secteur des transports" du protocole concernent tout particulièrement les politiques des transports menées en Suisse au niveau fédéral et cantonal. Selon la loi suisse sur le CO<sub>2</sub>, les objectifs fixés doivent être en grande partie atteints par des "mesures librement consenties par les milieux économiques et les transports" (OFEV, 2003).

Entré en vigueur en 2005, le protocole de Kyoto contraint ainsi les pays l'ayant ratifié à de sévères réduction de leurs émissions (CEMT, 2007, p. 20). Cependant, malgré les efforts entrepris pour réduire les rejets de CO<sub>2</sub> du secteur des transports, celles-ci n'ont pas cessée de croître lors des dix dernières années. L'OCDE estime cette augmentation, de 1990 à 2003, à 1'412 millions de tonnes (31 %) dans le monde et 820 millions de tonnes (26 %) dans les pays de l'OCDE. De plus, les émissions du secteur des transports croissent plus vite que les émissions globales (CEMT, 2007, p. 23), ce qui en fait un domaine d'action toujours plus prioritaire. Peu de pays sont, jusqu'ici, parvenu à tenir leurs engagements. D'après Gilbert et Perl, "Le relatif échec du protocole de Kyoto, en regard du succès de celui de Montréal, tient au manque d'alternatives crédibles aux combustibles fossiles, contrairement à la situation qui prévalait au moment du

remplacement des CFC<sup>\*2</sup> (Gilbert & Perl, 2008, p. 196).

Selon la CEMT, cette croissance des émissions de CO<sub>2</sub> des transports devrait se poursuivre "tant que le revenu disponible des ménages continuera à croître plus rapidement que le coût réel du transport" (CEMT, 2007, p. 8). Toujours selon cet organisme, les réductions des émissions de CO<sub>2</sub> dans les domaines de la production d'électricité et de chaleur semblent celles présentant le meilleur rapport coût-efficacité (coût par tonne de CO<sub>2</sub> produite en moins) (CEMT, 2007, p. 9).

Tous ces facteurs semblent parler en faveur de la promotion des voitures électriques sur le marché suisse, afin de profiter du meilleur rendement des moteurs électriques par rapport aux moteurs traditionnels. Un taux de pénétration du marché suffisant par ce type de véhicule, s'il ne permettra pas d'atteindre, à lui seul, les objectifs fixés de réduction des émissions dans le secteur des transports, pourrait permettre à la Suisse de tenir, au moins partiellement, ses engagements internationaux.

Encore faudrait-il pour cela, bien sûr, que l'énergie nécessaire à leur propulsion ne soit pas issue de combustibles fossiles. En effet, la production d'électricité et de chaleur demeurent les deux sources principales d'émissions de GES dans le monde. A ce sujet, la Suisse se distingue par le fait que ce secteur ne représentait, en 2003, que 4 % des émissions totales du pays, contre 45 % à l'échelle mondiale (CEMT, 2007, pp. 23, 242). Ce "bon" résultat de la production indigène provient de la prédominance de l'hydro-électrique (56 %) et du nucléaire (39 %) en Suisse (OFEN, 2009, p. 3). Cependant, cette statistique ne tient pas compte du fait que la Suisse importe une part importante de son électricité, notamment en hiver. Or, en cette saison, la mobilité douce devient moins concurrentielle par rapport aux moyens de transport fermés et chauffés.

---

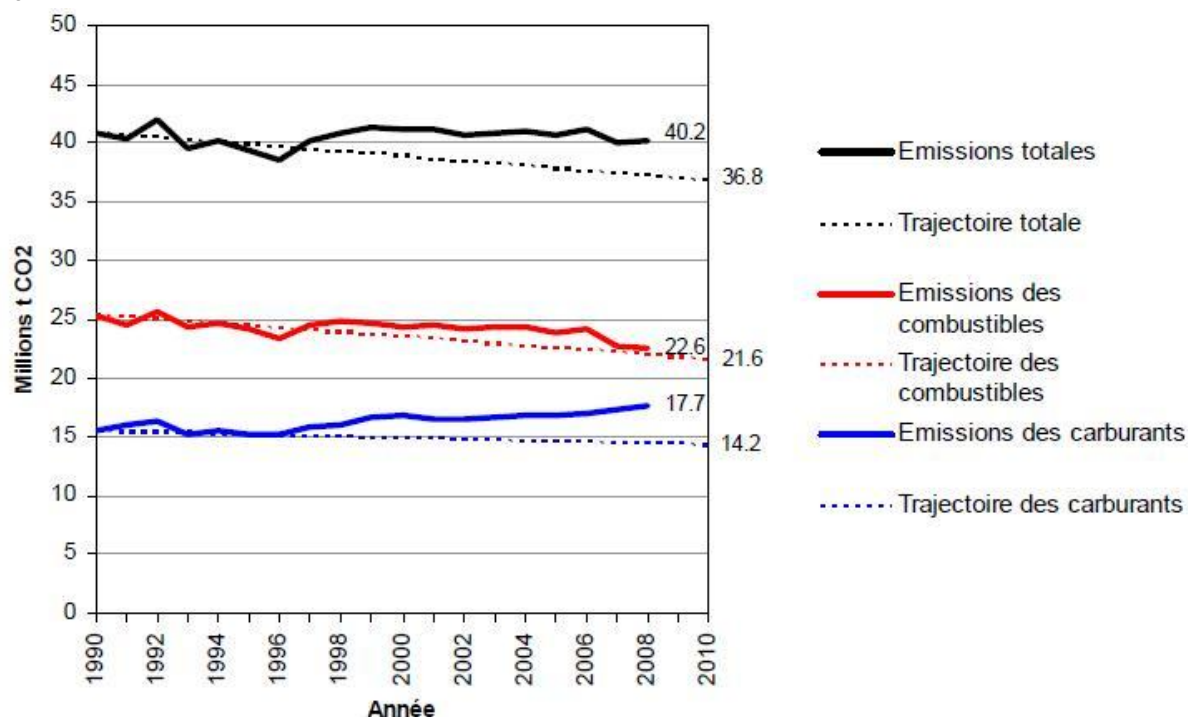
<sup>2</sup> Les citations suivies d'un astérisque sont tirées de textes en langue étrangère et traduites par nos soins.

---

### 1.2.2. La loi sur le CO<sub>2</sub>

De son côté, la loi fédérale sur la réduction des émissions de CO<sub>2</sub> (loi sur le CO<sub>2</sub>), entrée en vigueur le 1<sup>er</sup> mai 2000, prévoit, en 2010, une réduction des émissions de CO<sub>2</sub> uniquement (contrairement au protocole de Kyoto) de 10 % par rapport à 1990. Elle ne tient compte que des émissions dues à une utilisation énergétique des agents fossiles. Les carburants devraient, quant à eux, être réduits de 8 % (Assemblée fédérale, 1999). Ces derniers sont comptabilisés en termes de ventes. Ainsi, le carburant acheté en Suisse et consommé à l'étranger (tourisme du plein) compte dans les émissions suisses.

Figure 3 : évolution des émissions de CO<sub>2</sub> selon la loi sur le CO<sub>2</sub> (1990-2010) (DETEC, OFEV, 2009a)



Une révision de la loi sur le CO<sub>2</sub> est en débat actuellement. Celle-ci vise à introduire "des prescriptions en matière d'émissions de CO<sub>2</sub> des nouvelles voitures immatriculées à partir du 1<sup>er</sup> janvier 2012. Ces prescriptions contraignantes remplaceront la convention volontaire signée avec auto-suisse" (DETEC, OFEV, 2009b, p. 1). Dans ce projet de loi, les émissions de CO<sub>2</sub> devraient être réduites, selon les variantes à l'étude, de 20 % en 2020, respectivement de 30 % par rapport à 1990 (Assemblée fédérale). Cette révision devrait faire office de contre-projet indirect à l'initiative populaire fédérale des jeunes verts "pour des véhicules plus respectueux des personnes" (Chancellerie fédérale) (DETEC, OFEV, 2009b, p. 1).

## 1.3. Normes de consommation

Actuellement, seuls les Etats-Unis et le Japon disposent de législations fixant les normes de consommation de carburant. Outre Atlantique, l'indice de consommation moyenne des modèles produits par un constructeur (Corporate Average Fuel Economy - CAFE) et les normes californiennes sur les GES. Au Japon, le programme Top Runner (OCDE, 2004, p. 59).

### 1.3.1. Normes américaines

Les normes CAFE remontent au premier choc pétrolier. Elles réglementent la consommation moyenne des flottes des constructeurs sur une utilisation combinée ville / autoroute. Leur objectif initial consistait à doubler l'efficacité énergétique des véhicules entre 1975 et 1985. Le premier objectif, fixé pour 1978, était de parvenir à une consommation de 18 miles par gallon (mpg) pour les voitures de tourisme, soit 13.1 litres aux 100 km. En 1985, ces dernières devaient atteindre un niveau de consommation de 27.5 mpg en 1985 (8.6 l/100 km) (NHTSA). Par la suite, ces normes ont été assouplies puis le standard de 27.5 mpg a retrouvé force obligatoire à partir de 1990 et est encore en vigueur à l'heure actuelle.

En 2007, le congrès américain a décidé d'un nouvel objectif en la matière : 35 mpg (6.7 l/100 km) en 2020. De plus, le département des transports (DOT) et l'agence de protection de l'environnement (EPA) ont proposés conjointement d'appliquer cette nouvelle norme sur la période 2012 - 2016, ce qui permettrait, au niveau national, de respecter les standards de tous les états. Ce programme permettrait d'économiser 5 % de carburant par année, 1.8 millions de barils de pétrole et de réduire les émissions de CO<sub>2</sub> à 950 millions de m<sup>3</sup> (soit 1.8 millions de tonnes sur les près de 6'000 produites) ou de 21 % en 2030 par rapport à la situation qui prévaudrait sans nouvelles normes (NHTSA, 2009).

### 1.3.2. Normes japonaises

Le Japon est le pays où les normes d'émission de GES sont les plus strictes. Selon le programme Top Runner, introduit en 1999, les émissions des véhicules légers à essence devraient être inférieures de 22.8 % à leur niveau de 1995. Pour les véhicules diesel, l'objectif était fixé à 2005 et la réduction atteinte était de 8.8 % (l'amélioration requise était, à l'origine, de 14.9 %) (METI, ECCJ, 2008, p. 31).

### 1.3.3. Union Européenne

En Europe, l'association des constructeurs européens d'automobiles (ACEA) s'était engagée, en 1998, à réduire les émissions de CO<sub>2</sub> des voitures neuves à 140 g/km en 2008. Depuis 1998, la réduction moyenne a été de 2.5 % par année (OCDE, 2004, p. 61). Par la suite, en 2007, la commission européenne a proposé une limite à 130 g/km d'ici 2012, dont le non respect serait sanctionné financièrement. Le but étant, à terme, d'atteindre 120 g/km à travers des mesures complémentaires (Union Européenne, 2007). Cependant, l'atteinte du seuil de 130 g/km vient d'être repoussé de trois ans, soit en 2014.

## MOBILITÉ URBAINE

On peut chercher à influencer sur la demande de transport par des mesures en matière d'aménagement du territoire. On peut, également, avoir recours à la tarification de l'usage des véhicules. Pour être réellement efficaces, ces mesures devraient, du reste, être prises de concert.

En effet, taxer l'utilisation des transports individuels motorisés sans offrir d'alternative à leur usage revient à introduire un impôt indirect sans effet sur la répartition modale et ne peut, dès lors, que cristalliser les mécontentements. A l'inverse, aménager le territoire de manière à rendre les autres modes de transport plus efficaces (localisation des emplois proche des arrêts, densification de l'habitat, amélioration de l'offre en transports collectifs, sécurisation des itinéraires de mobilité douce, etc.) sans, dans le même temps, contraindre les TIM par la diminution de l'offre de stationnement, la taxation de leur usage ou la réduction de leur vitesse, par exemple, n'a que peu de chance d'inciter les automobilistes à changer leurs habitudes modales.

L'introduction de véhicules à propulsion électrique sur le marché pourrait constituer une forme d'aboutissement du durcissement des normes d'émission des véhicules, tout en s'attaquant cette fois, également, aux émissions de GES. En revanche, la pénétration massive de ce type de voitures sur le marché pourrait venir contrecarrer les politiques visant à générer un report modal des TIM vers les transports collectifs ou la mobilité douce en incitant à l'usage des premiers (une voiture électrique étant effectivement à classer parmi les TIM). En retour, l'application aux voitures électriques des mêmes formes de restriction d'usage que celles appliquées aux voitures conventionnelles pourrait en amoindrir l'attrait et, dès lors, en réduire les parts de marché. Avec comme conséquence, une efficacité moindre des mesures visant à réduire les émissions des véhicules à moteur.

## 2. Notion de choix modal et politiques publiques

De nombreux facteurs sont susceptibles d'influer sur la pénétration du marché suisse par les voitures électriques, dans un sens comme dans l'autre. Cependant, l'utilisation de voitures électriques dans la mobilité quotidienne implique que le choix modal des individus se porte sur ce type de moyen de transport qui subit, comme tous les autres, diverses contraintes. En premier lieu, la congestion des infrastructures routières et le manque de places de stationnement. Or, les politiques publiques actuelles en matière de mobilité ne vont pas dans le sens d'une adaptation de ces infrastructures à la demande. Au contraire, elles tendent plutôt à se servir des faiblesses en question pour promouvoir d'autres modes de transport, ce qui ne parle pas en faveur des véhicules électriques. Ce n'est, par ailleurs, pas le seul domaine où la promotion des voitures électriques se trouverait en contradiction avec une politique publique.



## 2.1. Financement des infrastructures

Une forte pénétration de la motorisation électrique dans le parc automobile suisse aurait des répercussions directes sur le financement des infrastructures de transport routières. En effet, ces dernières sont financées exclusivement par les usagers, contrairement aux infrastructures et services ferroviaires, financés partiellement par le budget de l'Etat et par le transfert d'une partie des revenus générés par le secteur routier (DETEC, 2009, p. 9).

Les recettes à l'origine du financement de la construction et de l'entretien du réseau routier proviennent de l'impôt sur les véhicules, de la redevance poids-lourds liée aux prestations (RPLP), de la vignette autoroutière et, surtout, de l'impôt et de la surtaxe sur les huiles minérales, qui représentent un revenu de 5.2 milliards, dont 3.7 sont obligatoirement affectés à des tâches en relation avec le trafic routier (AFD, 2006). Actuellement, les taxes sur les carburants représentent 74.47 centimes par litre d'essence et 75.87 cts par litre de diesel, soit 42 % du prix d'un litre d'essence, respectivement 37 % d'un litre de diesel (prix moyens 2008) (OFS, 2009a). Or, l'utilisation de véhicules électriques réduit la consommation de combustibles fossiles comme carburant et, par la même occasion, les recettes fiscales liées. De même, ces recettes sont appelées à se réduire proportionnellement à la baisse attendue de la consommation moyenne des véhicules classiques bien que le nombre de kilomètres parcourus soit appelé, en revanche, à croître fortement.

L'augmentation attendue de la mobilité sera avant tout à mettre sur le compte de la croissance de la population, de la croissance économique et de la poursuite de la dispersion de l'habitat. Cela ne signifie pas que les distances parcourues individuellement vont augmenter de manière suffisamment significative pour que le prix du carburant devienne une incitation forte à revoir ses pratiques de déplacement. En revanche, l'arrivée des véhicules électriques pourrait hâter le passage d'une taxation sur les véhicules à une taxation liée aux prestations, c'est-à-dire, sur l'usage des véhicules. Cette nouvelle forme de tarification, plus juste car basée sur le principe de l'utilisateur-payeur, pourrait, en revanche, entraver l'avènement des voitures électriques. En effet, parmi les constructeurs travaillant sur un concept de voiture électrique, aucun n'en a, jusqu'à présent, communiqué le prix de vente prévu. Avec le surcoût dû aux batteries, on peut soupçonner que ce prix sera plus élevé que celui d'une voiture traditionnelle de gamme comparable. Ainsi, dans l'hypothèse où des taxes sur les prestations se substitueraient à celles existant actuellement, le surcoût d'achat du véhicule ne pourrait plus être compensé par des coûts d'exploitation plus faibles. Les taxes représentant, à l'heure actuelle, plus du tiers, jusqu'à près de la moitié du prix d'achat d'un litre de carburant, leur suppression se traduirait par une baisse de ce prix et, dès lors, par une attractivité plus grande pour les véhicules à moteur à combustion interne. Sans compter que ces derniers sont appelés à connaître des progrès majeurs en termes de consommation.

Un grand avantage de la taxation liée aux prestations réside dans le fait qu'elle permet de facturer les coûts externes des transports directement au générateur de ces coûts (principe du pollueur-payeur), et non aux possesseurs de véhicules qui en font un usage

modéré, voire à la collectivité toute entière. Néanmoins, l'application de la vérité des coûts dans le secteur des transports ne serait pas nécessairement de nature à favoriser les véhicules électriques. Les coûts des accidents, la consommation de sol et les atteintes à la nature et aux paysages représentent, à eux seuls, plus du tiers des 8 milliards de francs des coûts externes du trafic routier en Suisse (estimation de 2005) (tableau n° 7). Auxquels il faut encore ajouter 1.2 milliards de coûts de congestion. Or, ces coûts ne diminueront pas avec l'augmentation de l'utilisation de véhicules électriques. Ils ne pourront donc pas, pour une question d'équité, être facturés uniquement aux conducteurs de véhicules traditionnels.

Tableau 2 : coûts externes du transport routier pour l'année 2006 (ARE, 2008, p. 4)

<i>Accidents (point de vue des modes de transport)</i>	2'017	25.0 %
<i>Bruit</i>	1'101	13.6 %
<i>Coûts de la santé dus à la pollution de l'air Dégâts aux bâtiments dus à la pollution de l'air</i>	1'834 274	22.7 % 3.4 %
<i>Climat Nature et paysage</i>	1'256 687	15.6 % 8.5 %
<i>Pertes agricoles Dégâts aux forêts</i>	63 64	0.8 % 0.8 %
<i>Dégâts aux sols Coûts supplémentaires en zone urbaine Processus en amont et en aval</i>	107 78 593	1.3 % 1.0 % 7.3 %
<i>Total</i>	8'074	100 %

Sur ces 8 milliards de coûts externes, 76 % sont dus aux transports de personnes (6.1 mia.), dont plus de la moitié (57 %) sont causés par l'utilisation de voitures de tourisme, soit une facture de 3.5 milliards de francs par année. On le voit, une part non négligeable des coûts externes devraient également être facturés aux propriétaires de véhicules électriques, venant s'ajouter aux redevances de financement et d'entretien des infrastructures. Ainsi, une tarification liée aux prestations pourrait favoriser un report modal plus que l'adoption de véhicules propres. En effet, d'un point de vue psychologique, la transparence des coûts de déplacement induite par une telle politique de tarification augmenterait la comparabilité des coûts des prestations entre les divers modes de transport, favorisant, par conséquent, une rationalisation de l'usage des TIM, rendant moins nécessaire la multi-motorisation.

L'introduction d'une telle taxe sur les prestations de tous les véhicules est d'ors et déjà prévue aux Pays-Bas, d'ici 2017. Les idées de surtaxes sur les carburants ou de péages urbains ont été abandonnées car présentant trop d'inconvénients (tourisme du plein, etc.) (Pays-Bas, 2009). La particularité de ce type de taxes, contrairement à celles prévalant actuellement, est qu'elles permettent de moduler le prix d'utilisation d'une infrastructure en fonction de l'heure ou du jour d'utilisation, pas uniquement du type de véhicule utilisé. Cette tarification différenciée sera de mise aux Pays-Bas et est, également, envisagée en Suisse. Tout du moins, le conseiller fédéral en charge des

transports en a-t-il émis l'idée et celle-ci fait partie des recommandations du DETEC concernant l'avenir des réseaux d'infrastructures nationaux. L'objectif étant explicitement, par ailleurs, de créer un signal prix influant sur la demande (DETEC, 2009, p. 67).

Si le remplacement des taxes actuelles par une taxe sur les prestations peut être considéré comme positif pour le système de transport comme pour l'efficacité de l'économie, les coûts des déplacements étant assumés par ceux qui les génèrent, ils peuvent fort bien s'avérer négatifs pour les voitures électriques. Si l'hypothèse voulant que les caractéristiques de ces derniers s'accordent particulièrement bien avec les déplacements pendulaires, les taxes différenciées toucheraient également, en priorité, ce type de déplacements. De cette manière, les coûts de la congestion des infrastructures seraient assumés par les usagers qui en sont à l'origine, mais cela signifierait, dans le même temps, qu'un coût supplémentaire viendrait frapper les véhicules électriques. Ce qui rendrait, comparativement, plus attractif l'achat de véhicules conventionnels à faible consommation.

Cet avantage pourrait être contrebalancé par une taxe sur le CO<sub>2</sub> régulièrement réajustée, afin de compenser les progrès réalisés en termes d'émissions. Ce qui pourrait se justifier au vu de l'augmentation attendue de la mobilité. A ce sujet, les autorités suisses prévoient une croissance de 25 % du trafic voyageurs en voitures-kilomètres d'ici 2030 (DETEC, 2009, p. 54). Ainsi, appréhendée au niveau global, la baisse des émissions de CO<sub>2</sub> du trafic routier devrait être nettement moins significative que si l'on considère uniquement les émissions des véhicules (DETEC, 2009, p. 56). Néanmoins, si les progrès en matière de production d'électricité ne suivent pas la même tendance, il serait injustifié de ne pas taxer la tonne de CO<sub>2</sub> avec la même sévérité. Ce qui se reporterait inmanquablement sur le prix du kWh, réduisant d'autant l'avantage comparatif des voitures électriques.

### **2.1.1. Péage urbain**

L'instauration d'un péage urbain, dont seraient exonérés, totalement ou partiellement, les véhicules propulsés à l'électricité (voire tous les véhicules utilisant des carburants alternatifs aux combustibles fossiles) pourrait, intuitivement, donner de bons résultats en termes d'émissions de CO<sub>2</sub>. Un grand avantage de cette subvention indirecte à l'achat d'un véhicule électrique est que son coût est nul pour la collectivité. En effet, pour autant que les rentrées financières issues du péage n'aient pour objectif que la réduction des émissions de GES du secteur routier (et non le financement d'infrastructures, des transports publics, la réduction de la congestion, etc.), dans le cas de l'utilisation d'un véhicule électrique, l'objectif (réduction des émissions) est atteint et l'encaissement de la taxe ne se justifie, dès lors, plus.

De plus, ce type de tarification ne viendrait pas concurrencer les politiques de report modal mises en place simultanément. En effet, la décision de s'acquitter de la taxe, de la contourner par l'achat d'un véhicule électrique ou en se reportant sur les transports collectifs, relèverait d'une décision individuelle. Elle n'obligerait pas, dès lors, la collectivité à mener une politique de stationnement plus incitative qu'à l'heure actuelle et, par conséquent, à concurrencer les transports collectifs.

En revanche, les inconvénients d'un péage urbain demeurent. A savoir que si sa mise en

place se traduit par le déplacement des activités du centre vers la périphérie, l'effet incitatif sur le report modal, comme sur l'acquisition de véhicules moins polluants est annulé. De plus, les transports collectifs se trouvent fragilisés par l'obligation de desservir des zones moins denses et, par conséquent, moins favorables. Au final, l'effet escompté en termes de réduction des émissions de GES pourrait s'avérer négatif.

## 2.2. Promotion de la densité urbaine

La physionomie des villes actuelles et les pratiques de mobilité des habitants qui les peuplent sont le résultat des politiques d'aménagement du territoire, actuelles comme passées. Ces deux caractéristiques sont, par ailleurs, intimement liées, sans que l'on puisse affirmer pour autant que l'une est à l'origine de l'autre. Elles possèdent, en outre, une propriété commune des plus importantes, à savoir : leur très grande inertie. En effet, malgré les tentatives actuelles d'influer sur le développement urbain afin de l'orienter vers une forme plus concentrée, les villes continuent de s'étendre et, en corolaire, les opportunités qu'elles offrent à se disperser dans des zones suburbaines de plus en plus vastes. Or, les nouvelles politiques d'aménagement reposent sur le postulat que la forme urbaine possède une grande influence sur les pratiques de mobilité observées.

L'expression de forme urbaine consiste en une caractérisation de l'espace urbanisé "à travers une composante quantitative (l'intensité de l'usage du sol) et une composante qualitative (la diversité des usages du sol)" (Pouyanne, 2005, p. 726). La littérature regorge d'articles traitant de la forme urbaine et de son influence sur la consommation énergétique des habitants (en matière de transports ou en général), les interactions sociales, la durabilité de la ville. En schématisant grossièrement, on peut dire que depuis les travaux de Newman et Kenworthy, à la fin des années 80, la communauté scientifique se déchire sur la question entre les tenants de la planification et ses opposants, dans la lignée des Gordon et Richardson, qui estiment que l'efficacité des mesures visant à influencer sur les tendances "naturelles" d'urbanisation n'a jamais pu être démontrée. Néanmoins, au niveau politique, la tendance densificatrice, liant concentration et moindre consommation d'énergie à plutôt le vent en poupe actuellement. La montée en puissance de la question environnementale et la "mode" du développement durable sont, évidemment, passées par là.

La première famille de chercheurs (favorables à la planification) soutient, chiffres à l'appui, que des quartiers denses et mixtes (au sens qu'ils accueillent à la fois des activités et beaucoup d'habitants sur une surface restreinte) sont, simultanément, plus facile à desservir par les transports publics et que l'on y trouve un taux de motorisation des ménages plus faible que dans des quartiers moins concentrés et monofonctionnels. De ce fait, qu'ils sont plus économes en énergie. La promotion de la densité est ainsi considérée comme une des clefs d'un urbanisme plus durable, de "l'état de bonne santé d'un territoire urbanisé [qui] correspond à sa faculté d'offrir un cadre de vie agréable à ses habitants, un environnement sain, et des activités de travail et de loisirs équilibrées. Or, beaucoup d'espoirs sont prêtés à la densité et la mixité pour améliorer la qualité de vie des sites urbains" (Ruzicka-Rossier & Kotchi, 2002, p. 8).

Cependant, "il apparaît difficile d'imposer la ville dense, économe en énergie et favorable

aux transports publics" (Ruzicka-Rossier & Kotchi, 2002, pp. 8-9). Pour tous ces auteurs, la ville durable est forcément "compacte et fonctionnellement mixte" (Prudente, 2007, p. 108) car "l'éclatement des zones d'activités entraîne une dépendance à la voiture privée" (Prudente, 2007, p. 115). En résumé, "les caractéristiques suivantes favorisent une moindre consommation d'énergie par habitant pour la mobilité journalière : une forte densité de population dans l'ensemble de la ville, une forte densité dans chaque zone résidentielle, une densité plus importante au centre qu'en périphérie, une localisation centrale des places de travail, peu de possibilités de stationnement sur les lieux de travail, une décentralisation concentrée au niveau régional et une population importante dans chaque ville" (Naess, 1997; cité par Holden & Norland, 2005, p. 2149).

De l'autre côté, nombre de chercheurs considèrent, là encore à grands renforts de statistiques, que rien ne démontre qu'il existe réellement un lien entre la forme urbaine et la consommation énergétique des habitants. Pour ces derniers, "les politiques visant à réduire les trajets pendulaires domicile-travail sont énergétiquement inefficaces car la part dans la consommation totale de carburant de ce type de trajets est faible" (Gordon & Richardson, 1997; cité par Shim & al., 2006, p. 355)\*. Leurs conclusions oscillent donc entre une absence de lien entre forme urbaine et coût énergétique, tout en reconnaissant que "la proximité d'un centre et, par là, l'accès facilité aux différents services est bénéfique en matière de consommation d'énergie [bien que] ni la densité, ni la mixité n'ont un effet significatif sur la consommation d'énergie pour la mobilité quotidienne" (Holden & Norland, 2005, p. 2156)\*, à la conviction pure et simple que "la ville des courtes distances pourrait, dans certains cas, loin de réduire l'usage de l'automobile, l'amplifier. Le coût moyen d'un déplacement de courte distance étant plus bas, cela pourrait en augmenter le nombre et produire un effet contraire à celui recherché"(Crane, 1996; cité par Gordon & Richardson, 1997, p. 98)\*. Suites à leurs propres recherches, certains chercheurs émettent même l'hypothèse de l'existence d'un mécanisme de compensation qui voudrait que les personnes vivant dans des centres denses et ayant, par conséquent, des besoins en matière de prestations de transport journalières limités, auraient tendance à avoir des déplacements plus longs pour leurs loisirs (Holden & Norland, 2005, p. 2146)\*.

Quoi qu'il en soit, la volonté affichée de réduction globale des émissions de gaz à effet de serre (GES) doit tenir compte des effets supposés de la forme urbaine sur les pratiques de déplacement des individus. Il est évident que les transports collectifs rejettent moins de CO<sub>2</sub> que les véhicules individuels privés, à condition toutefois que ceux-ci aient un taux de remplissage suffisant. Dans le cas contraire, l'utilisation de l'automobile est préférable, dans une optique de réduction des émissions de GES tout du moins. Or, une politique visant à favoriser les transports publics devrait, pour faire preuve d'une certaine efficacité, rendre moins attractif l'usage des autres moyens de transport motorisés. Cependant, la réussite d'une telle politique pourrait contrarier la pénétration massive des voitures électriques sur le marché. Car si ces véhicules étaient utilisés, avant tout, pour les déplacements domicile-travail, ils deviendraient, dès lors, comparativement moins intéressants. En effet, le coût d'opportunité d'un déplacement en TIM jusqu'à son lieu de travail augmentant, la part de l'utilisation de ceux-ci dans les autres types de déplacements (loisirs, achats, vacances, etc.) deviendrait plus

importante, favorisant ainsi les véhicules à moteur à combustion interne.

A l'inverse, une politique visant à favoriser ces véhicules (interdiction de circuler pour les véhicules traditionnels, p. ex.) pourraient grandement inciter à leur acquisition en nombre par les individus et contrarier la volonté de développer les transports collectifs, tout en perpétuant les tendances observées de dispersion des opportunités. Car si l'achat en masse de voitures électriques serait favorable en termes de réduction des émissions de GES, il ne constituerait en aucun cas une solution aux problèmes de congestion et de stationnement auxquels doivent faire face les villes, sans compter les autres externalités négatives du trafic individuel (élimination des épaves, accidents, consommation de sol, imperméabilisation des sols, etc.).

### 2.3. Promotion de la mixité fonctionnelle

Si la littérature sur la densité est très abondante, elle s'occupe, en revanche, très peu de la question de la mixité fonctionnelle et toujours en lien avec la densité. Dans une étude de la région urbaine de Neuchâtel, Patrick Rérat constate que "plus une commune présente une vocation résidentielle, moins les déplacements effectués à pied [...] et en deux roues [...] sont fréquents. Par contre, les trajets en voiture sont moins importants à mesure que la commune en question s'approche d'un équilibre entre habitat et activités économiques, voire s'apparente à un centre d'emploi [...]". Mais il s'empresse, ensuite, de préciser que la relation n'est pas statistiquement significative (Rérat, 2007, p. 52), ce qui est, en revanche, assez significatif de l'état actuel de la question. Constater qu'il existe un lien entre forme urbaine et mobilité, ne signifie d'ailleurs pas constater un lien direct entre forme urbaine et choix modal. Des facteurs intermédiaires viennent se greffer entre les deux. Parmi ceux-ci, la facilité de stationnement n'est vraisemblablement pas le moins significatif.

Pour passablement de chercheurs, "les facteurs socio-économiques et les attitudes individuelles sont des déterminants beaucoup plus importants des comportements de mobilité que la forme urbaine" (Stead & al., 2000; cité par Holden & Norland, 2005, p. 2147)\*. Pour eux, "les gens habitent au centre-ville parce qu'ils préfèrent se déplacer moins, ils ne se déplacent pas moins parce qu'ils habitent au centre-ville" (Boarnet & Crane, 2001; cité par Holden & Norland, 2005, p. 2147)\*. "Ce n'est pas parce que places de travail et habitat sont, spatialement, équitablement répartis que les individus vont nécessairement chercher un emploi proche de leur domicile et vice-versa" (Maat, Van Wee, & Stead, 2005, p. 36)\*. En admettant la pertinence de ces objections, on peut se demander si des politiques jouant directement sur les comportements de mobilité ne montreraient pas plus d'efficacité que si elles cherchent à les influencer indirectement par des opérations urbanistiques aux effets incertains. Cette constatation va dans le sens de notre postulat, évoqué plus haut, voulant que parmi ces leviers, le stationnement soit l'un des plus importants.

Les avis divergent quant à l'influence du choix résidentiel sur le choix modal ou du choix modal sur le choix résidentiel. Dans ce dernier cas de figure, en fonction de l'importance prise par le facteur stationnement, on peut également postuler la grande influence de l'offre en la matière sur le choix résidentiel, cette influence n'étant, toutefois, pas linéaire.

En clair, plus l'offre de stationnement sera limitée, plus grande sera son influence sur le choix résidentiel, par le truchement du choix modal. A l'inverse, une offre surabondante en la matière fera que ce facteur n'entrera plus dans les déterminants du choix modal et, par extension, dans le choix résidentiel. Mais on peut également penser qu'un nombre non négligeable d'individus se trouve, en fait, dans une situation d'*indifférence modale*, au sens que le choix résidentiel prend le dessus. Une fois l'objet désiré trouvé, seulement alors on se préoccupe du mode de transport adéquat, ce d'autant plus dans un marché immobilier tendu. Il y a de forte chance que cela soit, sauf impossibilité, le même que précédemment. Pour ces individus, jouer sur les possibilités de stationnement devrait, en théorie, s'avérer très efficace.

Cependant, dans le cas d'une volonté affichée d'électrification d'une part importante du parc automobile classique, une politique restrictive en matière de stationnement pourrait avoir des conséquences désastreuses sur les ventes de voitures électriques. En effet, **nous postulons que, la disposition d'une place de parking assurée et équipée d'une prise de courant pour la recharge est une condition essentielle à l'attractivité d'une telle voiture.** En effet, si la mobilité domicile travail en TIM devenait impossible, cela signifierait la perte des trajets pour lesquels elle apparaît comme la plus susceptible de remplacer les véhicules à moteur à combustion interne. En revanche, si la question de la limitation des places de stationnement pour les véhicules classiques semble impossible à remettre en question, réserver ces places pour les voitures électriques uniquement constituerait une remarquable incitation à l'achat de tels véhicules. Néanmoins, un succès trop important de ces incitations pourrait amener à un besoin sans cesse accru de places de stationnement, comme celui que connaissent les villes avec les véhicules classiques. De plus, l'inversion après coup d'une telle politique pourrait susciter un grand mécontentement et, pour tout dire, s'avérer simplement impossible. En effet, comment justifier, après avoir favorisé l'achat de véhicules destinés avant tout à la mobilité pendulaire, des restrictions d'usage sur ce type de parcours ?

La mixité fonctionnelle, pour autant qu'elle amène un changement dans les habitudes modales des individus, pose encore un autre problème à la généralisation des véhicules électriques. Le postulat voulant qu'un quartier mixte soit plus favorable aux déplacements de courtes distances et, par conséquent, rende moins nécessaire le recours aux TIM sous entend que l'on s'intéresse à la mobilité pendulaire, de consommation ou pour les loisirs "locaux". En revanche, le fait que le lieu de départ d'un déplacement de longue distance (excursion, week-end, vacances) soit caractérisé par une forte ou faible mixité fonctionnelle n'apparaît pas comme une condition essentielle dans le choix du mode de transport. Ils pourraient même s'en trouver multiplié dans le cas d'un habitat dense et mixte (Holden & Norland, 2005). Or, nous verrons plus loin qu'un des postulats sur lesquels repose cette étude veut qu'une voiture électrique soit plutôt achetée dans le but de remplacer un véhicule supplémentaire que dans celui de devenir la première voiture d'un ménage. Un quartier mixte pourrait amener à se contenter de la possession d'une seule voiture. Et puisque celle-ci se révélerait moins utile sur les trajets courts, cette voiture unique aurait peu de chance d'être propulsée par un moteur électrique.

### 2.3.1. Choix résidentiel

Certains comportements individuels semblent beaucoup plus liés à l'environnement urbain (ou l'inverse) que le choix du type de véhicule possédé. Tout d'abord, les choix de localisation des individus en fonction de leurs lieux de travail, de loisirs et de consommation. Ensuite, le choix modal de ces mêmes individus. Si l'on admet, comme les tenants de la planification, que la mixité fonctionnelle permet de réduire le nombre ou la longueur des déplacements par les moyens transports motorisés individuels, cela signifie que les préférences d'une personne en matière de moyens de déplacement sont liées à la proximité des destinations qu'elle entend rejoindre pour satisfaire ses besoins.

Nous l'avons déjà mentionné, les trajets courts apparaissent plus favorables à l'utilisation de véhicules électriques, pour cause d'autonomie réduite de ces derniers et du surcoût de temps nécessaire à la recharge de leurs batteries. Cependant, nous avons aussi émis l'hypothèse que lorsque l'utilisation de véhicules individuels motorisés sur ce type de trajets n'est pas nécessaire ou souhaitée, les trajets de longue distance deviennent prioritaires dans le choix du type de véhicule possédé. Ainsi, la proximité de lieux de travail, loisirs ou consommation, pour autant que cette proximité incite réellement les individus à se saisir de ces opportunités, pourrait s'avérer néfaste à la large diffusion des véhicules électriques.

Si l'on peut effectivement, de manière intuitive, penser qu'un individu vivant à proximité immédiate de son lieu de travail aura tendance à s'y rendre à pied, il est déjà moins évident qu'il se rendra à l'épicerie du coin pour ses courses, d'autant moins s'il ne s'y rend qu'une fois par semaine, par exemple. Admettons maintenant que ce même individu trouve, proche de chez lui, une grande surface répondant parfaitement à ses besoins en matière d'offre et de prix et qu'il utilise sa voiture comme moyen de convoyage. Dans ce cas, la proximité du service l'incitera moins à grouper ses achats. Avec pour conséquence éventuelle de s'y rendre plusieurs fois par semaine au lieu d'une seule, multipliant d'autant le nombre de trajets parcourus. Avec parfois même, au bilan, un nombre de kilomètres parcourus supérieur à celui qui serait réalisé avec moins de déplacements mais sur des distances plus longues. En revanche, la contrainte de temps demeure et vient, dès lors, contrebalancer cette réserve. De multiples petites courses prennent, en effet, plus de temps que de tout acheter en une seule fois. Ce dernier point est donc à nuancer, son effet étant très incertain.

De même, pour ses activités de loisirs, en admettant qu'il bénéficie de toutes les facilités à courte distance de son domicile, rien n'indique qu'il préférera celles-ci à d'autres, surtout s'il doit arbitrer avec les contraintes de ses compagnons de loisirs qui ne sont pas forcément ses voisins. Plus encore, "une bonne accessibilité à différents services peut également générer une demande de transport supplémentaire en incitant à choisir parmi un choix plus large de lieux de travail, de consommation ou de loisirs" (Holden & Norland, 2005, p. 2150)\*. Or, de par un prix d'achat plus élevé mais des coûts d'exploitation moindre (électricité moins chère, à quantité d'énergie égale, que les carburants traditionnels), les véhicules électriques sont d'autant plus avantageux qu'ils parcourent plus de km. Ainsi, paradoxalement, l'échec des politiques de réduction de l'usage des TIM par la promotion de la mixité fonctionnelle pourrait s'avérer, au final,



favorable à la promotion des voitures électriques. A l'inverse, la réussite de ces mêmes politiques pourrait contrecarrer leur pénétration du marché.

En allant plus loin, si la multiplication des trajets courts se confirme, sans pour autant qu'une part significative de ceux-ci soient transférés vers d'autres modes de transport ou les TIM électriques, le bilan CO<sub>2</sub> pourrait s'avérer très négatif. Premièrement, comme déjà évoqué, par l'augmentation du nombre de trajets parcourus. Deuxièmement, par la multiplication de trajets à froid. Si le remplacement d'une part autre que marginale du parc automobile par des véhicules électriques est jugée souhaitable, il est, dès lors, dans le cas d'une politique de diversification de l'espace urbain, essentiel que ces derniers soient favorisés par rapport à l'usage des voitures traditionnelles. Tout en prenant garde que les avantages accordés ne deviennent pas défavorables aux autres modes de transport.

### 2.3.2. L'utilité des déplacements

Une approche basée sur l'utilité permet de comprendre que le déplacement le plus court ne maximise pas nécessairement la satisfaction de l'individu. Du moment que c'est l'attractivité de la destination qui représente l'utilité et que le déplacement ne représente qu'un coût, l'utilité maximale peut tout à fait être retirée d'un déplacement plus long, d'autant plus si le temps nécessaire à celui-ci est sensiblement égal à celui nécessaire pour rejoindre une destination plus proche (Maat, Van Wee, & Stead, 2005, p. 37)\*.

Si l'on se base sur ce principe, ce n'est pas, en premier lieu, en facilitant l'accès à un service de proximité que ce dernier devient plus attractif mais en restreignant l'accès à des services de même nature plus lointains et, malgré cela, plus désirables a priori. A ce constat, il faut ajouter que plus le service désiré (magasin, place de travail, activité de loisir) est spécial (maximise l'utilité) et est, par conséquent, plus difficilement substituable, moins les chances qu'il soit situé à proximité immédiate du lieu de domicile sont grandes (Maat, Van Wee, & Stead, 2005, p. 40)\*. Pour terminer, il n'est pas certain que la mixité fonctionnelle d'un quartier soit une condition essentielle dans le choix de localisation de tous les individus (sans nier que cela puisse être parfois le cas) mais elle constituera, au mieux, un paramètre en balance avec d'autres. Ces considérations laissent à penser que les TIM garderont leur attractivité, indépendamment de la mixité fonctionnelle des lieux de vie des individus. Ainsi, il apparaît que les voitures électriques devraient être favorisées, si ce n'est de par la conviction qu'elles apporteront une contribution non négligeable à la réduction des émissions de CO<sub>2</sub>, du moins par pragmatisme.

## 2.4. L'importance du stationnement

Les caractéristiques actuelles des voitures électriques, détaillées plus loin, font que le remplacement du parc automobile traditionnel ne peut être total. On peut penser que **seuls les ménages multimotorisés ou, éventuellement, très "politisés" seront amenés, dans un premier temps tout du moins, à passer à la mobilité électrique.** Dans une optique de développement durable, cet état de fait peut faire apparaître comme socialement inéquitable des mesures visant à favoriser l'utilisation de véhicules électriques. En revanche, ces mêmes mesures peuvent être souhaitables sur le plan

environnemental. En effet, comme les ressources en stationnement sont limitées et qu'elles le resteront, un encouragement à l'équipement en voiture électrique par ce biais pourrait, potentiellement, s'avérer très efficace. Et une place de stationnement occupée par une voiture électrique est une place en moins pour un véhicule traditionnel. De plus, cette politique aurait le mérite d'éviter la suppression de places de parking, exercice politiquement très délicat.

De la même manière, comme il apparaît peu vraisemblable, au moins dans un futur proche, de parvenir tant à une ville de proximité, où tout se passe près de chez soi, qu'à une ville multipolaire avec des nœuds concentrés et très bien desservis par des transports collectifs efficaces, il est probable qu'un des moyens les plus efficaces pour initier un report modal soit d'agir sur le stationnement et ce, moins au domicile que sur les lieux de destinations des individus. Sophie Noirjean et Thierry Merle abondent dans ce sens : "Dans le cas des salariés qui se rendent au travail en voiture, les seules mesures réellement efficaces sont la non mise à disposition de places de stationnement sur le lieu de travail par l'employeur et l'absence de places gratuites sur le domaine public situé à proximité. [...] une politique du stationnement doit se décider au sein d'un ensemble territorial cohérent, une agglomération ou un bassin de vie tout entier par exemple." (Noirjean & Merle, 2007, p. 93).

Si une personne bénéficie d'une place de stationnement assurée tant sur son lieu de départ que de destination, sans conviction personnelle contraire, elle aura une incitation naturelle à utiliser sa voiture. Le résultat sera sûrement semblable dans le cas d'une place assurée au lieu de destination uniquement (pour autant que la personne ne renonce pas à la possession d'une voiture). En revanche, dans le cas où le stationnement à destination serait impossible, il y a de forte chance qu'elle opte pour un autre mode de transport pour ce déplacement. Réserver un nombre important de places de stationnement, au moins pendant les heures de grande affluence, aux véhicules électriques permettrait, en théorie, de favoriser les conducteurs de véhicules "zéro émissions", tout en incitant les autres au report modal, sans toucher à la capacité globale de stationnement. Soit à concilier les politiques de réduction des émissions au travers de l'aménagement du territoire avec la promotion de véhicules individuels affichant un meilleur bilan environnemental.

## **2.5. Ordonnance sur la protection contre le bruit (OPB)**

Les objectifs de l'Ordonnance sur la Protection contre le Bruit (OPB) auraient dû être atteints 15 ans après son entrée en vigueur, soit le 31 mars 2002. Ceux-ci n'ayant pu être réalisés dans le laps de temps initialement prévu, une prolongation de ces délais jusqu'en 2018 dans les zones bâties à été consentie. A cette date, toutes les routes devront respecter les valeurs limites d'immissions. A défaut, les cantons contrevenants s'exposent à des sanctions financières de la part de la Confédération (OFEFP, 2003, p. 6).

Pour sa part, le canton de Genève considère dans son plan directeur que, au niveau des mesures actives à prendre (agissant sur la source du bruit), "la réduction du bruit engendré par le trafic routier est directement liée à la politique des transports et la mise

en place du transfert modal" (République et canton de Genève, a). Comme nous l'avons abordé précédemment, cette vision peut constituer une entrave au développement des TIM électriques, en ne cherchant à encourager que la mobilité par les transports collectifs ou la mobilité douce dans le cadre des déplacements quotidiens. Or, en termes de réduction des nuisances sonores à la source, les véhicules électriques peuvent apporter une certaine contribution, à moindre frais pour la collectivité, en remplaçant des véhicules traditionnels. Notamment de nuit, lorsque les valeurs limites sont plus restrictives et que les transports collectifs ne circulent plus que sporadiquement, voire plus du tout. Pendant ces heures creuses, le renoncement à la voiture individuelle devient plus difficile. De plus, proposer une alternative par une offre accrue en transport publics nocturnes est, à la fois, très coûteux et néfaste sur le plan environnemental, les véhicules circulant pratiquement à vide. Sans compter que celle-ci est difficile à justifier, la voirie urbaine étant loin d'être surchargée durant la nuit.

On peut considérer, d'une certaine manière, que circuler en voiture électrique de nuit revient, de fait, à appliquer le principe du pollueur-payeur, les coûts de diminution des émissions sonores étant assumés par leur émetteur. On peut, en outre, émettre l'hypothèse que ce type de déplacements nocturnes, les autoroutes de contournement ayant détourné le trafic de transit des centres-villes, est probablement réalisé pour des motifs professionnels (travail de nuit) ou de loisirs locaux, soit des déplacements de relativement courtes distances, favorables aux véhicules électriques. Il faut, cependant, nuancer cet apport des voitures électriques dans la lutte contre le bruit. En effet, à partir de 50 km/h, le bruit de roulement des pneus devient plus important que le bruit du moteur (voire dès 35 km/h en fonction du type de pneu, du poids du véhicule ou du revêtement routier) (République et canton de Genève, b). Ainsi, les comportements individuels ont également leur importance dans ce domaine. Rappelons, toutefois, que la vitesse limite générale de circulation est fixée, en Suisse, à 50 km/h en zone urbaine, voire 30 km/h dans certains quartiers. Les voitures électriques devraient, par conséquent, conserver un avantage à ce niveau.

## 3. Les énergies fossiles

Les carburants issus du pétrole répondent à hauteur de 96 % à la demande énergétique dans le secteur des transports, lui-même responsable, au niveau mondial, de 62 % de la consommation finale de pétrole (OCDE, 2004, p. 9). Les autres types de carburants, comme les modes de propulsion alternatifs, restent, à ce jour, malgré les espoirs placés en eux, tout à fait négligeables. Cette domination absolue des combustibles fossiles dans les transports, outre le fait qu'elle ne va pas sans poser de nombreux problèmes environnementaux, n'est pas tenable pour une simple question de disponibilité du pétrole.

Le pic de production du pétrole, ou *peak oil*, représente l'instant où la production pétrolière atteindra son maximum. A partir de ce point, les réserves mondiales n'étant pas extensibles à l'infini, cette production ne pourra que décroître, de manière plus ou moins rapide, en fonction des mesures qui seront prises.

On ne peut déterminer avec certitude l'année de survenance du *peak oil*. Tout au plus peut-on affirmer que celle-ci approche. Un indice de cette proximité se trouvant dans le fait que l'augmentation de la consommation progresse, depuis plusieurs années, plus rapidement que la découverte de nouvelles réserves. Une telle situation ne peut, à terme, que déboucher sur une baisse de la production. Certains auteurs l'attendent pour 2012 déjà (Gilbert & Perl, 2008, p. 2).

Quoi qu'il en soit, la chute programmée de la production pétrolière se traduira, fatalement, par une augmentation du prix du baril. Ce qui rendra possible l'exploitation de réserves jusqu'alors commercialement inintéressantes. Dès lors, l'énergie nécessaire à l'extraction du pétrole pourrait, également, prendre l'ascenseur. La prise de mesures menant à une diminution de la dépendance au pétrole est, ainsi, essentielle afin de parvenir à une baisse de la consommation. En outre, plus les mesures prises anticiperont la décroissance de la production pétrolière, moins celles-ci seront douloureuses, car préparées et non prises sous la contrainte de l'urgence.

Selon les principes du développement durable, les efforts portant sur la baisse de la consommation devraient, en priorité, être fournis par les pays les plus développés, qui restent, actuellement, les plus gros consommateurs. Cet engagement permettrait de ne pas entraver le décollage des pays en développement. De plus, les moyens de substitution, les capacités techniques et financières sont plus à la portée des pays riches.

En termes de réduction des émissions de GES du secteur des transports, la proximité du *peak oil* offre un potentiel certain pour le développement de technologies nouvelles, à très faibles émissions, voire à émissions nulles. Notamment (mais pas uniquement, évidemment), le développement et l'introduction massive de la motorisation électrique.

Cependant, pour que ces changements technologiques se traduisent effectivement par une diminution des émissions de GES, il est d'une absolue nécessité que la production d'électricité devienne, elle aussi, dans le même temps, plus verte. En effet, si l'essence n'est, au final, que remplacée par du charbon, l'impact global en termes de rejets de GES pourrait s'avérer négatif, quand bien même, les rejets du secteur des transports se trouveraient drastiquement réduits.

### 3.1. L'énergie en Suisse

Produire de l'énergie nécessite la consommation d'un agent énergétique quelconque. L'énergie primaire correspond à l'énergie renfermée dans l'agent énergétique avant sa transformation (pétrole brut, par exemple). Les agents énergétiques secondaires sont produits par transformation de l'agent primaire (tous les produits pétroliers, notamment). Toute transformation d'agent énergétique se traduit, fatalement, par une perte représentant une part plus ou moins grande de l'énergie primaire. L'énergie finale est celle qui est effectivement délivrée au consommateur (OFEN, 2009, p. 9). Finalement, l'énergie utile est celle qui est effectivement employée pour répondre à un besoin quelconque.

A ce titre, l'électricité n'est pas, à proprement parler, une source d'énergie mais un vecteur énergétique, en ce sens qu'elle permet de transporter l'énergie contenue dans une source d'énergie primaire (pétrole, force hydraulique, chaleur du soleil, etc.) jusqu'à un lieu de consommation, où l'énergie électrique est retransformée en énergie utile (énergie thermique, lumineuse, mécanique, etc.). Néanmoins, par commodité, nous considérons ici l'électricité comme une source d'énergie.

Les énergies fossiles (charbon, pétrole, gaz) représentent 56 % de la consommation brute d'énergie de la Suisse (chiffres de 2008), tous usages confondus (comme indiqué au point 1.2.1, les chiffres sont fort différents si l'on considère uniquement la production indigène d'électricité). Les ressources locales (force hydraulique, biomasse, ordures) 19 % et les combustibles nucléaires 24 %. Les autres énergies renouvelables 1,1 %. Le solde exportateur d'électricité représente 0,3 % de la consommation brute totale (OFEN, 2009, p. 16). Cependant, les importations / exportations d'électricité ne sont pas équitablement réparties, tant sur l'ensemble des mois de l'année que des périodes journalières. Elles peuvent, par conséquent, représenter une part non négligeable dans la consommation d'électricité, largement supérieure au solde de la balance. La consommation primaire totale se monte ainsi à 1'176'000 Terajoules (TJ). La consommation d'énergie finale correspond à 76.5 % de l'énergie primaire (900'040 Tj) (OFEN, 2009, p. 16). Le secteur des transports consomme plus du tiers de cette énergie finale (34,5 %). Cette part est celle qui nous intéresse plus particulièrement ici, notamment celle du secteur routier.

A l'heure actuelle, au niveau mondial, environ 58 % des produits dérivés du pétrole sont consommés par le secteur des transports (marchandises et passagers, tous modes confondus), 61 % en Europe. Selon toutes vraisemblances, cette prédominance est appelée à s'accroître d'ici 2030 (Gilbert & Perl, 2008, pp. 121-122). Un peu moins de 10 % (fioul) jusqu'à 17 % (essence) de l'énergie contenue dans le pétrole brut est perdue

du puits au réservoir (tableau 17). Ces pertes peuvent être grossièrement réparties entre extraction et raffinage (10 %) et transport (5 %) (Gilbert & Perl, 2008, p. 121).

Cependant, ces chiffres ne sont valables que pour le pétrole "conventionnel". Or, les réserves de pétrole de ce type, facilement *extractible* et *rafinable*, sont appelées à décliner plus vite que celles de pétroles de moins bonne qualité, avec deux conséquences inévitables. Premièrement, la proportion de pertes entre le puits et le réservoir est appelée à augmenter, avec pour conséquence que les gains sur le rendement des moteurs à combustion interne sera plus faible que ceux obtenus, toutes choses égales par ailleurs, par les progrès technologiques des constructeurs automobiles. Deuxièmement, cette production moins efficace se traduira fatalement par une hausse des coûts de production se reportant sur le prix à la pompe, c'est-à-dire, sur le consommateur final. Avec pour effet de réduire l'écart de prix sur le cycle de vie avec un véhicule électrique, pour autant que l'augmentation de la production électrique n'ait pas pour source d'énergie primaire, les mêmes fiouls lourds que ceux dont seront de plus en plus issus essence et diesel.

### **3.1.1. Impact des voitures électriques sur la consommation d'électricité**

Quel serait l'impact sur la consommation d'électricité d'un remplacement massif des véhicules classiques par des véhicules électriques ? Gilbert et Perl, citant diverses études, estiment que cette consommation supplémentaire pourrait représenter une augmentation de 15 à 40 % dans les pays développés, dans le cas d'un remplacement complet du parc automobile actuel par des véhicules électriques à batteries (Gilbert & Perl, 2008, p. 161). La production d'électricité devrait, par conséquent, augmenter de manière similaire.

Cependant, une augmentation de la production d'électricité de 15 % ne signifie pas automatiquement une augmentation de 15 % des capacités de production. En clair, si la France électrifierait l'entier de son parc automobile, cela ne nécessiterait pas forcément d'ajouter neuf nouveaux réacteurs nucléaires à son parc de cinquante huit (EDF) en service à l'heure actuelle. Tout dépend, en effet, des périodes pendant lesquelles les besoins supplémentaires se feront sentir. Car si les capacités de production existantes sont proches de la saturation durant les pics de consommation, elles sont, en revanche, largement suffisantes hors de ces périodes de forte demande. Or, les principales périodes de recharge des véhicules électriques se situeraient, majoritairement, la nuit, et, les jours ouvrables, dans le courant de la matinée et de l'après-midi, quand les véhicules sont à l'arrêt et leurs utilisateurs au travail. Soit, justement hors des périodes de pics. Ainsi, les capacités de production supplémentaires nécessaires pourraient représenter 0 à 10 % des capacités actuelles (Gilbert & Perl, 2008, p. 161).

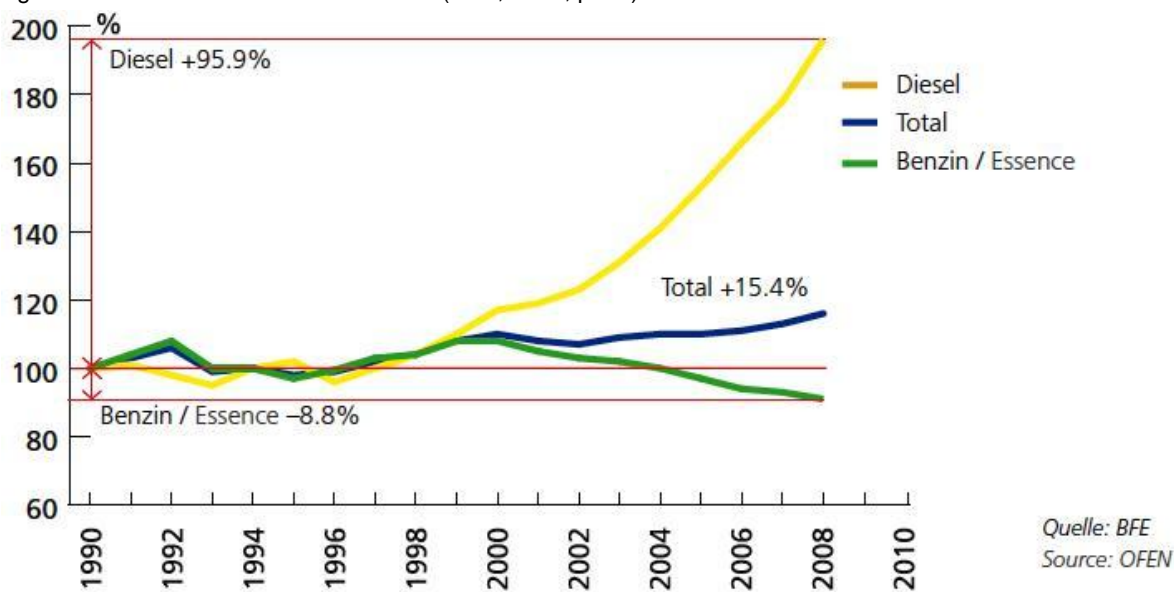
Plus encore, certains auteurs imaginent déjà que les véhicules en stationnement, ce qui est le cas de 93 à 96 % du temps (Turton & Moura, 2007, p. 1092), pourraient servir d'accumulateurs afin de restituer les kWh nécessaires lors des périodes de forte demande. Cette technique permettrait de maximiser les productions dépendantes des conditions climatiques (éolien, solaire). En effet, les conditions favorables à ces modes de production d'électricité ne correspondent pas nécessairement aux pics de demande. L'utilisation des véhicules à l'arrêt comme capacités de stockage permettrait d'utiliser

ces sources d'énergie au maximum lors des périodes favorables, l'électricité étant, ensuite, restituée lorsque le besoin s'en fait sentir. Ce stockage / déstockage permanent représenterait une consommation supplémentaire, de par les pertes qu'il induirait. Ces pertes sont estimées à 34 % pour les batteries NiMH (Matheys & al, 2006, p. 100) mais pourraient être considérablement réduites (jusqu'à 2-10 %) avec les nouvelles batteries Li-ions. En revanche, il réduit les besoins en capacités de production supplémentaires (Gilbert & Perl, 2008, p. 162).

## 3.2. Consommation des véhicules

La consommation énergétique des véhicules dépend de nombreux facteurs. Certains sont à mettre sur le compte des caractéristiques propres des véhicules, alors que d'autres dépendent uniquement de l'usage qui en est fait. Il faut, du reste, garder à l'esprit que les véhicules consommant le moins ne sont pas forcément les plus efficaces énergétiquement parlant mais ceux qui ne roulent pas. De fait, si les véhicules n'ont cessé de progresser en matière d'efficacité énergétique, l'augmentation du poids, de la puissance et des prestations kilométriques des voitures fait que les ventes de carburant n'ont pas diminué.

Figure 4 : ventes de carburant en Suisse (TCS, 2009, p. 17)



### 3.2.1. Rendement énergétique des voitures

Le rendement énergétique d'un moteur à combustion interne "du puits à la roue" est d'environ 14 % pour un véhicule à essence, respectivement 18 % pour un véhicule diesel. "Du puits au réservoir", les pertes se montent à 15 % pour l'essence (20 % pour le diesel). Selon les estimations de l'OCDE, des réductions de 20 % des émissions de CO<sub>2</sub> seraient possibles grâce aux nouveaux moteurs à essence, jusqu'à 50 % pour des véhicules hybrides (OCDE, 2004, p. 15). Dans le cas des véhicules électriques, tout dépend de la source d'énergie utilisée pour produire l'électricité nécessaire à leur fonctionnement. Si celle-ci provient de centrales thermiques, le gain en émissions de CO<sub>2</sub> est nul du puits à la roue (OCDE, 2004, p. 15).

Les principales pertes d'énergie d'une voiture équipée d'un moteur à combustion interne se produisent "du réservoir à la roue", sous forme, entre autres, de pertes thermiques, mécaniques ou à cause de la technique même d'un moteur à explosion (inertie). Inversement, dans le cas des véhicules électriques, ces pertes sont faibles par rapport à celles "du puits au réservoir".

Le tableau suivant présente les estimations de l'OCDE concernant la répartition de l'utilisation de l'énergie contenue dans le carburant (essence) d'un véhicule de taille moyenne (début des années 1990) :

Tableau 3 : énergie consommée par une automobile familiale de taille classique (OCDE, 2004, p. 50)

<b>Type de trajet</b>		<b>Urbain</b>	<b>Autoroute</b>
<i>Énergie contenue dans le carburant</i>	<i>Consommation d'énergie</i>	100 %	100 %
<i>Pertes dans la motorisation</i>	<i>Pertes thermodynamiques</i>	60 %	60 %
	<i>Pertes du moteur</i>	12 %	3 %
	<i>Pertes de la transmission</i>	4 %	5 %
	<i>Total</i>	76 %	68 %
<i>Consommation des composants</i>	<i>Auxiliaires</i>	2 %	1 %
	<i>Accessoires</i>	1 %	1 %
	<i>Climatisation (si utilisée)</i>	10 %	10 %
	<i>Total</i>	13 %	12 %
<i>Utilisation pour la propulsion</i>	<i>Résistance à l'air</i>	2 %	11 %
	<i>Résistance au roulement</i>	4 %	7 %
	<i>Pertes cinétiques / freinage (aucune inclinaison)</i>	5 %	2 %
	<i>Total</i>	11 %	20 %

Il serait faux de penser que seules les pertes de motorisation varient entre un véhicule électrique et un véhicule classique. Les autres données également, puisque le rendement de l'alternateur d'un moteur à explosion (qui produit l'électricité nécessaire aux composants annexes du véhicule) n'est pas identique à celui des centrales produisant l'électricité du réseau.



Le tableau suivant indique la puissance nécessaire à un véhicule particulier pour surmonter diverses formes de résistances :

Tableau 4 : Puissance (kW) requise pour surmonter diverses formes de résistance à la progression du véhicule (poids du véhicule = 1.1 t, surface frontale = 1.75 m<sup>2</sup>, coefficient de résistance à l'air = 0.45 (OCDE, 2004, p. 51)

<b>Utilisation du véhicule</b>	<b>Roulement</b>	<b>Aérodynamique</b>	<b>Inertie</b>	<b>Gravité</b>	<b>Total</b>
<i>Utilisation urbaine, 20 km/h (vitesse moyenne)</i>	0.7 (4.2 %)	0.09 (0.5 %)	15.9 (95.2 %)	0	16.7
<i>Vitesse constante, 60 km/h horizontale</i>	2.5 (51 %)	2.4 (49 %)	0	0	4.9
<i>Vitesse constante, 140 km/h horizontale</i>	9.4 (24 %)	30.1 (76 %)	0	0	39.5
<i>Vitesse constante, 80 km/h pente à 5 %</i>	3.7 (17.4 %)	5.6 (26.3 %)	0	12.0 (56.3 %)	21.3

Concernant la consommation d'énergie nécessaire à la propulsion (entre 11 et 20 % de la consommation totale), il faut signaler que le poids du véhicule joue un rôle prépondérant à vitesse réduite. Les véhicules électriques étant appelés, en grande partie, à une utilisation urbaine, leur surpoids, dû aux batteries, peut devenir handicapant à ce niveau. Ils sont, en revanche, plus efficaces à bas régime.

### 3.2.2. Poids, dimension et puissance des voitures

La prise de poids des véhicules ne résulte pas uniquement des préférences individuelles et de l'adéquation du niveau de vie avec ces préférences. Plusieurs autres facteurs en sont, également, partiellement responsables. Notamment, l'amélioration des niveaux de sécurité et de confort. Ainsi, deux véhicules identiques, ou, plus exactement, le modèle actuel comparé au modèle d'origine (p. ex. VW Golf I 1.6 l. GTi, 810 kg vs Golf VI 1,4 l. Trendline, 1'217 kg) n'accusent pas le même poids.

La particularité de ces facteurs est qu'ils ne sont pas tous influençables par les convictions individuelles, même en cas de prise de conscience environnementale généralisée. En effet, il ne serait pas acceptable de renoncer à des évolutions ayant permis des améliorations de la sécurité, sous prétexte de réduire le poids des voitures. En revanche, les voitures électriques rendent possible des économies de poids au niveau de l'insonorisation, source d'embonpoint pour les véhicules (tout au moins en ce qui concerne le bruit du moteur).

Il est à signaler que la surface frontale moyenne des véhicules est en augmentation, partout dans le monde (OCDE, 2004, p. 52). Ainsi, la mode des véhicules plus gros n'implique pas seulement une consommation supplémentaire de par le surpoids à mettre en mouvement, mais également parce que les gros véhicules offrent une plus grande surface de résistance à l'air (moindre aérodynamisme). Par conséquent, les progrès réalisés en matière d'efficacité des moteurs sont compensés, totalement ou partiellement, par les préférences des consommateurs dans leurs choix de véhicules.

Parmi ces consommateurs, on peut imaginer que ceux décidant, uniquement pour des raisons de convictions personnelles, d'opter pour l'achat d'un véhicule électrique doivent être, par avance, sensibilisés à l'efficacité énergétique de leur voiture. En revanche, si cet achat n'est motivé que par des incitations étatiques (financières, en termes de facilités offertes, etc.), il n'est pas certain que les acheteurs optent pour le véhicule au meilleur rendement énergétique. Il faut encore signaler que la mode, peut-être en train de s'essouffler, des gros 4x4 n'est pas responsable de la plus grande part de l'augmentation de la consommation des véhicules. En effet, aux Etats-Unis, l'augmentation du nombre de ces véhicules dans le parc automobile représente, toutes choses égales par ailleurs, une augmentation de 5 % de la consommation. La prise de poids moyenne de l'ensemble du parc automobile est responsable, quant à elle, d'une augmentation de 9 % de la consommation de carburant et 14 % sont dus à l'augmentation de sa puissance moyenne (Gilbert & Perl, 2008, p. 207). Ce goût pour la puissance est illustré par le fait que les moteurs hybrides sont, souvent, utilisés pour accroître la capacité d'accélération des véhicules classiques, plus que pour en réduire les émissions (Gilbert & Perl, 2008, p. 207).

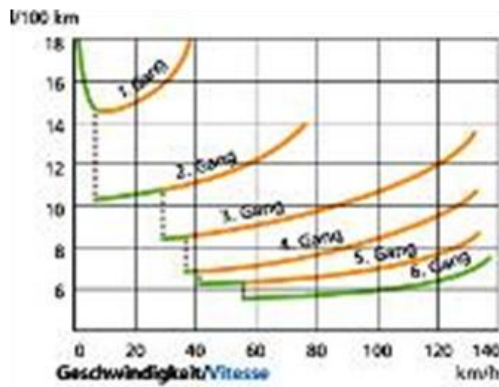
Si l'on considère le coût en carbone d'une voiture sur l'ensemble de son cycle de vie, outre le fait que l'augmentation de la puissance des véhicules se traduit par une consommation énergétique accrue et, par conséquent, des rejets de CO<sub>2</sub> supplémentaires, il faut encore ajouter que les véhicules puissants ont, également, un impact négatif sur la sécurité routière. Sans compter les coûts externes directs générés par des accidents supplémentaires, on devrait, dès lors, constater une relation inversement proportionnelle entre la puissance des véhicules et la durée de vie de ceux-ci. Or, un cycle de vie raccourci est fatalement synonyme de rejets de CO<sub>2</sub> supplémentaire, puisqu'il faut produire des véhicules à une cadence supérieure. Une limitation de la puissance des véhicules pourrait donc avoir un double impact positif sur les rejets de GES.

Le mode de transport routier est, en revanche, moins consommateur de matériel sur l'ensemble de son cycle de vie que les autres moyens de transport (rail notamment) (Gilbert & Perl, 2008, pp. 227-228), ce qui pourrait parler en faveur des véhicules électriques, pour autant que l'on considère comme réglé le problème des émissions polluantes et de GES.

### **3.2.3. Style de conduite et conditions de circulation**

D'autres facteurs entrent encore en ligne de compte dans la consommation des véhicules. Parmi ceux-ci, le style de conduite n'est pas à négliger. Encore une fois, on ne peut affirmer d'office que ce paramètre dépend uniquement du conducteur et non de la technologie du véhicule utilisé. Une particularité des voitures électriques tient à leur couple puissant et aux reprises élevées les caractérisant. Or, il est possible que ces performances aient un effet incitatif sur le style de conduite adoptée par le chauffeur. En clair, que celui-ci aie envie "d'utiliser" les possibilités offertes par son véhicule, avec un effet négatif sur sa consommation d'énergie. Un style de conduite agressif peut augmenter jusqu'à 20 % les émissions de CO<sub>2</sub> d'une voiture classique (OCDE, 2004, p. 52). Un tel style ne sera, par conséquent, pas non plus neutre pour une voiture

Figure 5 : consommation en fonction de la vitesse et du rapport (TCS, 2009, p. 36)



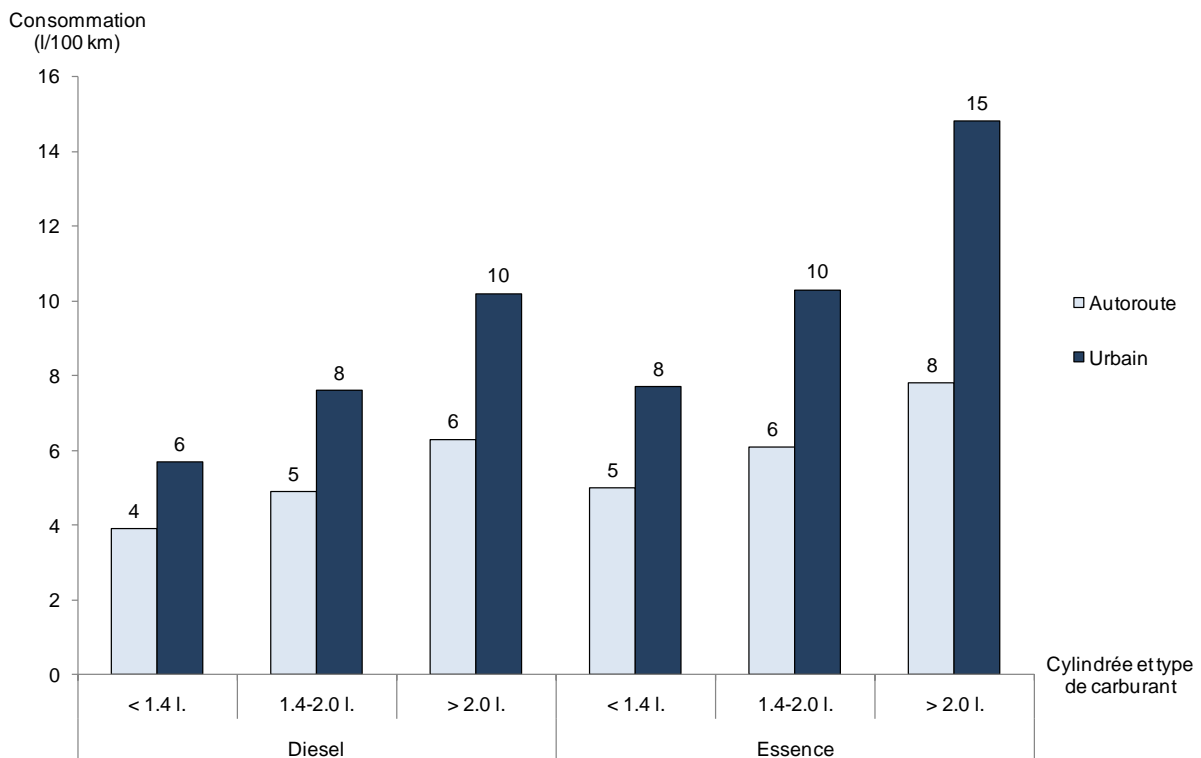
électrique, même si les émissions supplémentaires seront à chercher "avant le réservoir", soit lors de la production de l'électricité.

Les conditions de circulation constituent un autre facteur influant grandement sur la consommation des véhicules. En effet, la succession d'arrêts et de démarrages caractérisant la conduite urbaine a des conséquences très négatives sur les performances énergétiques de ces derniers. A 10-15 km/h de moyenne, la consommation et

les émissions peuvent être multipliées par trois (OCDE, 2004, p. 53), celle des voitures électriques également.

Cependant, si la consommation d'électricité par ces véhicules augmente en conduite urbaine, les conditions de sa production restent constantes. On peut donc agir sur le rendement des centrales électriques afin de l'améliorer pour répondre au mieux à cette demande supplémentaire. Ce n'est pas le cas en ce qui concerne les combustibles fossiles. Que la voiture en utilise beaucoup ou peu, la valeur énergétique d'un litre d'essence, par exemple, ne varie pas. Les émissions de CO<sub>2</sub> produites par la combustion de ce volume de carburant non plus. Les véhicules électriques ont, par conséquent, un avantage potentiel à ce niveau.

Figure 6 : consommation en fonction des conditions de circulation (Données TCS, 2009)



### 3.2.4. Consommation, émissions : valeurs officielles et réelles

L'écart entre la consommation de carburant affichée des véhicules, établie lors de procédures d'essai et la consommation en situation de conduite normale peut s'avérer très important, jusqu'à 25 % de consommation supplémentaire (OCDE, 2004, p. 15). De plus, cette différence a tendance à s'accroître avec le temps. En effet, les véhicules sont de plus en plus souvent équipés d'accessoires gourmands en énergie. La climatisation, notamment, très répandue aux Etats-Unis depuis longtemps, a maintenant conquis le marché européen et s'est totalement démocratisée. Or, les données de consommation officielles ne tiennent pas compte de ces consommations annexes. De plus, nous l'avons vu, les performances énergétiques d'une voiture dépendent largement du style de conduite adopté et du lieu d'utilisation (voiries urbaines, rurales, autoroute).

Tableau 5 : variation de la consommation de carburant et des émissions due à l'utilisation de la climatisation, par type de route (en % supplémentaires) (OCDE, 2004, p. 63)

<b>Emissions</b>	<b>Urbaine</b>	<b>Rurale</b>	<b>Autoroute</b>	<b>Mixte</b>
<i>Consommation de carburant</i>	29	30	24	27
<i>CO<sub>2</sub></i>	28	25	21	25
<i>CO</i>	796	616	478	605
<i>HC</i>	260	271	114	207
<i>NO<sub>x</sub></i>	76	17	17	31
<i>PM<sub>x</sub></i>	139	64	262	159

### 3.2.5. Véhicules classiques

Les émissions des véhicules neufs vendus depuis 2000, et donc conformes aux normes Euro 3, sont inférieures de 90 % à ce qu'elles étaient au cours des années quatre-vingts. Les émissions des véhicules Diesel ont également été sensiblement réduites (OCDE, 2004, p. 10). L'association des constructeurs européens d'automobiles (AECA) a conclu un accord avec la Commission Européenne visant à réduire, en moyenne, de 25 % par rapport à 1995 les émissions de CO<sub>2</sub> des voitures neuves vendues en 2008, pour les ramener à un niveau moyen global de 140 g/km.

Cependant les émissions de CO<sub>2</sub> dues au transport ont continué de croître à un rythme de 2 % par an au cours de la décennie écoulée (OCDE, 2004, p. 11). Si les améliorations techniques permettent de réduire les émissions des véhicules, les progrès réalisés sont, dans le même temps, neutralisés par la tendance à l'augmentation du poids des véhicules, de leur puissance et des kilomètres parcourus (OCDE, 2004, p. 12). Les véhicules diesel à injection directe à haute pression sont, à l'heure actuelle, ceux offrant les meilleures performances en matière de consommation de carburant et de rejets de CO<sub>2</sub>, parmi les véhicules classiques (OCDE, 2004, p. 12).

### 3.2.6. Véhicules à carburants alternatifs

Parmi ces véhicules, ceux propulsés au GPL (gaz de pétrole liquéfié) sont les plus largement diffusés. Leurs émissions de CO<sub>2</sub> sont moindres par rapport aux véhicules à essence. Elles sont, en revanche, plus importantes que pour les moteurs diesel, l'avantage, dans ce cas là, s'observant au niveau des particules fines. Cependant, l'engouement pour les moteurs diesel fait que certains constructeurs ont décidé d'arrêter la production de véhicules au GPL (OCDE, 2004, p. 13).

D'autres technologies permettent de rouler au gaz naturel comprimé (GNC) ou au méthanol. Cependant, les problèmes posés par ces carburants font que ces technologies restent marginales. Finalement, les biocarburants ont pu représenter un espoir grandissant mais qui s'est avéré de courte durée, en raison de la soustraction de surfaces agricoles dédiées, en temps normal, à l'alimentation ou à la déforestation que leur production implique. Leur coût est, de plus, deux à trois fois plus élevés que celui des carburants issus du pétrole (OCDE, 2004, p. 13). Pour terminer, les biocarburants représentent une contribution aux réductions des émissions de CO<sub>2</sub> bien plus importante lorsqu'ils se substituent à des combustibles fossiles pour la production de chaleur ou d'électricité que lorsqu'ils sont utilisés comme carburant dans les transports (CEMT, 2007, p. 12).

### 3.2.7. Nouvelles technologies

#### Véhicules hybrides

Les véhicules hybrides couplent un moteur électrique avec un moteur à combustion interne classique afin d'en augmenter le rendement global. Un autre système, plus marginal à l'heure actuelle mais appelé à prendre de l'importance, consiste en un petit moteur thermique produisant l'électricité nécessaire quand les batteries s'épuisent, afin d'augmenter l'autonomie globale du véhicule. Certains possèdent, en outre, une prise permettant de recharger leurs batteries sur le réseau électrique (plug-in hybrid electric vehicle).

#### Véhicules à pile à combustible

Les véhicules à pile à combustible peuvent être considérés comme des véhicules "zéro émission" dans le cas de l'utilisation de l'hydrogène comme carburant. Cependant, la production de ce gaz en grande quantité est coûteuse et, elle même, très consommatrice d'énergie. Ces handicaps font que, malgré l'importance des sommes consacrées à la recherche dans ce domaine, il est peu probable que les véhicules équipés de piles à combustible représentent une réelle alternative aux véhicules classiques, dans un avenir proche tout du moins (OCDE, 2004, p. 14).

A ce stade, il semble bien que les véhicules électriques à batteries représentent l'évolution la plus plausible en ce qui concerne les TIM, du moins dans un avenir proche et sauf découverte technologique majeure. **L'électricité peut, ainsi, être considérée comme "le carburant alternatif le plus probable"** (Gilbert & Perl, 2008, p. 119) bien que, dans nombre d'analyses, la propulsion électrique soit jugée plus favorablement en ce qui concerne les véhicules connectés au réseau que les voitures individuelles à batteries.

# LA VOITURE ÉLECTRIQUE

La motorisation électrique est, à l'heure actuelle, pensée dans l'optique du remplacement d'une part du parc de voitures individuelles, c'est-à-dire comme un moyen de transport de personnes. Les progrès se propageront-ils, à terme, également au fret ? Il est impossible de le dire en l'état. Nous postulons ici que la motorisation électrique concernera bien le transport motorisé individuel de personnes et nous ne nous intéressons qu'à cet aspect de la mobilité. Ce qui n'exclut pas d'autres applications des progrès attendus. Les japonais expérimentent déjà le chargement sans fil des batteries, par induction électromagnétique et rêvent, dans le futur, d'autoroutes rechargeant les voitures en cours de route (C dans l'air, 2009b). Si ce type de technologie parvenait à prouver son efficacité, les voitures électriques deviendraient, de fait, des véhicules connectés au réseau. Nous nous contentons ici d'évaluer le potentiel des voitures électriques à batteries, susceptibles d'être commercialisée dans un futur immédiat.

Le terme "véhicule électrique" peut, dans la littérature, désigner des types de véhicules forts différents. On trouve, en effet, des :

- véhicules électriques connectés au réseau (grid connected vehicle, GCV). Il s'agit des trains, trams et, pour ce qui concerne le mode de transport routier, des trolleybus;
- véhicules électriques hybrides (hybrid electric vehicle, HEV);
- véhicules hybrides rechargeables (plug-in hybrid electric vehicle, PHEV), dont les batteries sont rechargeables sur secteur;
- véhicules à pile à combustible (fuel cell vehicle, FCV), propulsés par un moteur électrique;
- véhicules électriques à batteries (battery electric vehicle, BEV).

En outre, le terme "véhicule" est un terme générique englobant tous les moyens de transport.

Dans la présente étude, sauf indication contraire, l'appellation "véhicule électrique" ou "voiture électrique" désignera les voitures électriques à batteries. Véhicules classiques, traditionnels ou conventionnels, les voitures à moteur à combustion interne. De plus, nous utiliserons parfois les abréviations anglaises "BEV" pour désigner les voitures électriques ou "ICEs" pour les voitures à moteur à combustion interne.

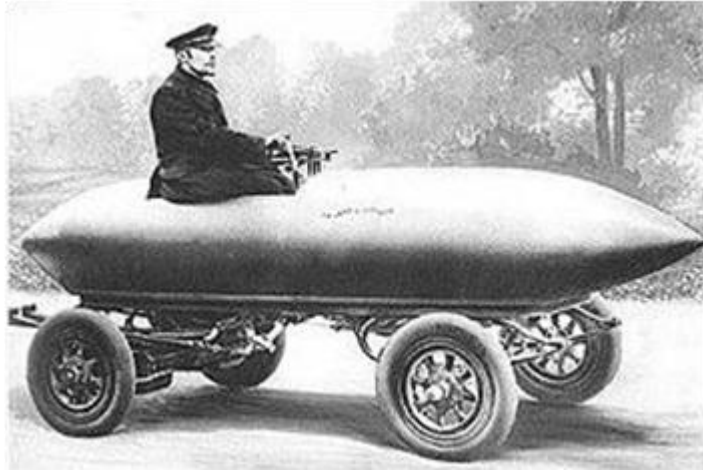
## 4. Brève histoire de la voiture électrique

L'intérêt pour l'électricité comme mode de propulsion des voitures n'est pas un fait nouveau mais est, en réalité, aussi vieux que l'automobile elle-même. En fait, cet intérêt a été très fluctuant depuis le XIX<sup>e</sup> siècle, au gré des aléas politico-économiques et des avancées technologiques. Ainsi, le premier véhicule électrique, produit en 1873, a précédé de dix ans le premier véhicule à essence. Du reste, jusqu'à la fin du XIX<sup>e</sup> siècle,

c'est sur ce type de technologies que se concentrent les progrès du secteur de l'automobile.

Cependant, l'intérêt pour cette technologie va s'essouffler, vaincue par les progrès constants des performances des moteurs à combustion interne et l'absence de solution apportée au problème de capacité des batteries (AIE, 1994, pp. 21-22). Ce dernier paramètre semble demeurer, quelle que soit l'époque considérée, le point

Figure 7 : La jamais contente, voiture électrique belge, dépasse pour la première fois les 100km/h en 1899 (www.voitureelectrique.net)



d'achoppement sur lequel se heurtent les concepteurs de véhicules électriques. A partir des années 1930, l'intérêt pour la propulsion électrique ne renaîtra plus qu'au gré de conditions particulières. Au Japon, dans la période d'avant guerre, pour cause de rationnement des combustibles issus du pétrole, aux USA, pendant le 1er choc pétrolier, puis, plus tard, à cause des inquiétudes nées de la pollution de l'air croissante. A chaque fois, cet intérêt fera long feu, d'autres solutions ayant été apportées aux problèmes auxquels le moteur électrique était sensé répondre (fin de la guerre, améliorations techniques des moteurs classiques, catalyseurs, etc.) (AIE, 1994, pp. 22-25).

De fait, rien ne permet d'affirmer que le regain d'intérêt pour les véhicules électriques observé actuellement ne sera pas, à nouveau, contrecarré par l'émergence plus rapide d'une technologie nouvelle, apportant une alternative satisfaisante à la consommation de combustibles fossiles. Voire par un changement radical dans la manière actuelle de concevoir la mobilité individuelle. Cependant, notre étude est basée sur le postulat que les progrès technologiques en la matière feront que les véhicules électriques représenteront une alternative, sous certaines conditions, aux voitures traditionnelles.

#### **4.1. La voiture électrique aujourd'hui et demain**

L'actuel regain d'intérêt pour la propulsion électrique provient principalement du fait que l'utilisation d'un véhicule électrique n'est génératrice d'aucunes émissions directes. De plus, ceux-ci se caractérisent par un niveau de confort élevé et une excellente accélération, de par le rendement beaucoup plus important des moteurs électriques par rapport aux moteurs à combustion interne.

A côté de ces qualités intrinsèques, les moteurs électriques sont, contrairement aux moteurs classiques, très performant à bas régime et sur les trajets en pente et / ou entrecoupés d'arrêts et de redémarrages fréquents. De plus, leur autonomie moindre fait qu'ils sont bien adaptés à des trajets à froid, sur de courtes distances, là où, justement, les véhicules classiques sont les plus polluants. Ces caractéristiques font penser à

Philippe Klein, vice-président de Renault, que **les voitures électriques collent parfaitement aux déplacements quotidiens; pour les courses, se rendre au travail ou accompagner les enfants à l'école** (C dans l'air, 2009b).

Leurs handicaps sont plutôt à chercher dans un coût d'acquisition élevé, une autonomie insatisfaisante doublée d'un temps de recharge des batteries important et le manque d'infrastructures nécessaires à leur utilisation (recharge). Dans son rapport de 2004, l'OCDE jugeait peu probable que les améliorations apportées aux batteries permettent la commercialisation à grande échelle des véhicules électriques dans un avenir proche (OCDE, 2004, p. 13). Du reste, au cours des années quatre-vingt-dix, plusieurs versions électriques de modèles existants ont connus un échec commercial (Citroën Saxo, Peugeot 106, p. ex.), principalement pour cause d'autonomie trop faible (60 km environ) de leurs batteries au plomb. Or, depuis, cet état de fait ne semble plus aussi certain. Au

Figure 8 : Bluecar (Turbo, 2008)



salon de l'automobile de Genève de mars 2009, plusieurs voitures électriques ont été présentées en vedette par des constructeurs automobiles, nouveaux ou reconnus.

La "Bluecar", du groupe français Bolloré, en association avec l'italien Pininfarina, s'est, notamment, fait remarquer dans les stands de Palexpo (C dans l'air, 2009a).

Mille exemplaires de cette petite voiture devraient être commercialisés d'ici juin 2010 (initialement prévu pour fin 2009), et le constructeur compte sur une production de vingt mille unités d'ici 2012 (Turbo, 2008). Ce modèle offre une autonomie de 250 km, avec une vitesse de pointe de 130 km/h. Le temps de charge des batteries lithium-métal-polymère qui l'équipent est de six heures sur une prise standard. Des bornes de recharges rapides (restant à installer) devraient, à l'avenir, permettre une recharge en 2 heures. Pour terminer, une recharge flash (5 min.) autorisant une autonomie de 25 km est possible en cas de besoin (Bluecar).

De son côté, l'américain General Motors prévoit de commercialiser son Opel Ampera à partir de 2011. De fait, l'Ampera n'est que la version européenne de la Chevrolet Volt (elle même évolution électrique de la Chevrolet Sequel, propulsée par une pile à combustible) qui devrait faire son entrée sur le marché américain en 2010 (initialement prévue en 2007). Cependant, la situation financière catastrophique de GM pourrait sonner le glas de cette voiture hybride offrant 60 km d'autonomie en tout électrique. Le moteur d'1.4 l, utilisé comme générateur d'électricité, permettant de prolonger l'autonomie jusqu'à 500 km.

Cette tendance s'est confirmée et amplifiée au salon de Francfort, à l'automne 2009. Le français Renault présentait à cette occasion pas moins de quatre concept-cars électriques (Renault Twizy Z.E.; Renault Zoe Z.E. Concept; Renault Fluence Z.E. Concept; Kangoo Z.E. Concept), dont les versions commerciales devraient être disponibles d'ici 2011-2012.



Mais la voiture électrique faisant le plus parler d'elle à l'heure actuelle est le roadster de l'américain Tesla motors. Cette sportive, bâtie sur un châssis de Lotus Elise, sortie d'une start-up de la Silicon Valley, atteint les 100 km/h en moins de 4 secondes, pour une vitesse de pointe de 200 km/h et est en passe de devenir la nouvelle coqueluche des stars d'Hollywood. Cependant, son principal atout réside dans ses batteries Li-ions affichant une autonomie de 350 km. La Tesla roadster devrait pénétrer le marché européen début 2010. Néanmoins, son prix (100'000 dollars) fait que cette voiture restera confinée à un marché de niche. En revanche, le constructeur, subventionné par le gouvernement américain, prépare pour l'hiver 2011 une berline familiale, baptisée Model S, qui devrait être proposée au prix de 50'000 dollars. De plus, plusieurs constructeurs établis affichent de l'intérêt pour une collaboration avec Tesla, dans le but de développer leurs propres modèles électriques (Daimler, Nissan, p. ex.).

Figure 9 : Tesla roadster en charge (L'Express, 2009)



Le tableau suivant présente quelques uns des modèles de voitures électriques appelées à pénétrer le marché automobile au cours des prochaines années ainsi que leur autonomie et leur niveau de consommation affiché :

Tableau 6 : modèles de voitures électriques rapidement commercialisables (non exhaustif)

<b>Voitures électriques à batteries</b>	<b>Batteries</b>	<b>Autonomie (km)</b>	<b>Consommation (Wh/km)</b>
<i>Audi e-tron</i>	<i>Lithium-ions</i>	248	214
<i>Bolloré-Pininfarina Bluecar</i>	<i>Li-Métal-Polymère</i>	250	120
<i>Citroën C0</i>	<i>Lithium-ions</i>	130	123
<i> Loremo EV</i>	<i>Lithium-ions</i>	--	60-80
<i>Mini E</i>	<i>Lithium-ions</i>	167	210
<i>Mitsubishi iMiEV</i>	<i>Lithium ions</i>	160	100
<i>Nissan Leaf</i>	<i>Lithium-ions</i>	160	150
<i>Peugeot iOn</i>	<i>Lithium-ions</i>	130	123
<i>Renault Fluence Z.E. Concept</i>	<i>Lithium-ions</i>	160	125
<i>Tesla roadster</i>	<i>Lithium-ions</i>	390	110
<b>Plug-in hybrid</b>			
<i>Opel Ampera</i>	<i>Lithium-ion</i>	60 (tout électrique)	267

#### 4.1.1. Techniques utilisées et caractéristiques des voitures électriques

Les technologies utilisées pour les voitures électriques sont diverses et, pour une grande part, encore largement perfectibles. Le principal problème entravant leur pénétration immédiate du marché demeure leur faible autonomie, en comparaison aux voitures équipées de moteurs à combustion interne. De plus, les batteries équipant les véhicules électriques restent également très chères et constituent, par la même occasion, un surcoût non négligeable à l'achat de ce type de voitures. De fait, le développement des batteries constitue le défi technologique le plus difficile à relever (AIE, 1994, p. 67).

### 4.1.2. Batteries

Il existe une multitude de modèles de batteries pouvant équiper des voitures électriques. Les caractéristiques demandées à ces accumulateurs d'énergie sont :

- énergie et puissance massique<sup>3</sup> élevée;
- long cycle de vie;
- faibles coûts;
- sécurité;
- simplicité d'entretien;
- recyclabilité;
- aucun risque de pollution de l'environnement après la mise au rebut;
- possibilité d'estimations précises de l'énergie restante;
- autodécharge faible;
- recharge rapide (AIE, 1994, pp. 67-68).

Les batteries actuellement existantes utilisent une multitude de composés. Les accumulateurs de première génération étaient au plomb. Sont ensuite apparues les batteries au nickel / cadmium, elles-mêmes suivies par tout un assortiment d'autres compositions aux caractéristiques propres. Cependant, malgré la diversité des technologies utilisées, aucune batterie n'est en mesure, à l'heure actuelle, de répondre à l'ensemble des conditions posées.

Les problèmes sont divers. Les composés peuvent s'avérer nocifs pour l'environnement (métaux lourds), rares (et donc chers)<sup>4</sup>, nécessiter un entretien supplémentaire (électrolyse de l'eau de la batterie), poser des problèmes de décharge à l'arrêt ou encore de mémoire de charge (obligation de décharge complète de la batterie, sous peine de perte d'énergie massique). Néanmoins, le principal problème de ces accumulateurs, quelle que soit la technique utilisée, reste qu'ils offrent à l'automobile qu'ils équipent une autonomie largement inférieure à celles des voitures classiques. A titre de comparaison, l'énergie massique d'une batterie au plomb est de 39 Wh/kg, 69 pour une batterie Nickel-métal-hydrure (NiMH) et 125 pour une batterie au lithium. De son côté, l'essence possède une énergie massique de 12'500 Wh/kg, soit une quantité 180 fois supérieure à celle d'une batterie NiMH. En considérant un rendement des moteurs à combustion interne de 14 %, contre 61 % pour les moteurs électriques, le ratio demeure plus de 40 fois supérieur, en faveur du moteur à combustion interne (Gilbert & Perl, 2008, p. 149).

---

<sup>3</sup> L'énergie massique correspond à l'énergie maximale, exprimée en Watts\*heure (Wh), pouvant être restituée par un accumulateur par rapport à sa masse en kg (Wh/kg). La puissance massique est la puissance maximale pouvant être libérée par l'accumulateur, par rapport à sa masse. Elle est exprimée en Watts par kg (W/kg).

<sup>4</sup> A titre d'exemple, l'anticipation de l'augmentation de la demande de lithium pour les batteries à fait flamber le prix de ce métal, passé de 260 à 2'300 dollars la tonne en cinq ans. De plus, on assiste déjà aux premières manœuvres géopolitiques pour contrôler les réserves de minerai (Libération, 2009).

## 4.2. Marché des véhicules électriques

Le nombre de véhicules électriques actuellement en circulation dans le monde est difficile à évaluer. Une seule chose est certaine, ce nombre représente une quantité infime du parc automobile total. En Suisse, l'effectif de ces voitures se montait à 517 unités en 2008 (OFS).

Depuis le début des années quatre-vingt-dix, la principale impulsion pour la recherche et la diffusion de véhicules électriques est venue de la décision du California Air Resources Board (CARB) d'imposer un minimum de 2 % de véhicules à émissions nulles dans les ventes de véhicules légers d'ici 1998, 5 % d'ici 2001 et 10 % dès 2003. Ainsi, les sommes investies par les constructeurs automobiles dans la recherche et le développement en la matière l'ont été dans la crainte d'une généralisation de ces règles à l'ensemble des pays de l'OCDE (AIE, 1994, p. 28).

La principale préoccupation des constructeurs concerne l'accueil qui serait réservé par le public à un véhicule électrique performant. Afin d'estimer les potentialités réelles de tels véhicules, des études ont tenté de comparer les performances des véhicules électriques avec l'utilisation qui est effectivement faite du parc automobile actuel. Ainsi, l'Electrical Vehicle Development Corporation (EVDC) a constaté que 38 % des utilitaires en circulation aux USA parcourent moins de 96 km quotidiennement, 79 % moins de 145 km (AIE, 1994, p. 30). D'autres se sont efforcées de confronter les caractéristiques des véhicules électriques aux parcours habituels des individus. Ces études ont montré, par exemple, que 57 % des ménages américains pourraient se contenter d'une voiture avec une autonomie de 130 km, que 60 % d'entre eux parcourent moins de 155 km, etc. De plus, 28 % possèdent au moins deux véhicules avec un garage équipé d'une prise de courant (AIE, 1994, p. 32).

Néanmoins, il faut admettre que les estimations du nombre de véhicules conventionnels pouvant, potentiellement, être remplacés par des véhicules électriques ne donne aucun renseignement sur les intentions qu'auraient, effectivement, les usagers dans le cas de la commercialisation en série de ce type de voitures. En effet, ce n'est pas parce qu'un véhicule apparaît plus adapté à l'usage habituel qu'en fait une personne que cette dernière va, fatalement, opter pour ce véhicule. D'autant moins si celui-ci est plus cher ou inspire moins confiance, de par l'inexpérience de son usage. De plus, rien ne prouve que les individus soient capables d'estimer correctement l'usage qu'ils font de leurs véhicules. Ou encore, qu'ils soient convaincus que cet usage ne variera pas et que, par conséquent, ils n'auront jamais besoin d'une autonomie supérieure à celle que leur offre une voiture électrique.

Du côté des constructeurs automobiles, le patron de Renault-Nissan, Carlos Ghosn, estimait, au salon de Francfort 2009, que **les voitures électriques représenteraient 10 % des ventes de voitures neuves en 2020** (C dans l'air, 2009b). Ses prévisions étaient basées sur le fait que 80 % des déplacements quotidiens font moins de 60 km et sont, par conséquent, adaptés à ce type de véhicules. Cette adéquation, accompagnée d'une croissance attendue du prix du pétrole, d'une prise de conscience toujours plus large des problèmes environnementaux et de progrès techniques fonde l'optimisme du

constructeur au losange.

#### **4.2.1. Projets pilotes**

Plusieurs projets pilotes ont été menés, ou sont actuellement en cours, pour expérimenter la pénétration à grande échelle des véhicules électriques sur le marché. Dans ce chapitre, nous allons nous intéresser à deux d'entre eux. Le premier a été mené dans la région de Mendrisio et avait pour objectif de démontrer la compatibilité de ce type de véhicules avec l'usage qu'en font les individus. Il a, également, permis d'expérimenter diverses incitations à l'achat de voitures électriques et de mesurer leur efficacité.

Le second projet est conduit par l'entreprise Better Place, en association avec le constructeur automobile Renault-Nissan, et devrait débuter en 2011 en Israël et au Danemark. Il a pour objectif d'établir un réseau d'échange de batteries au niveau d'un pays afin de tester l'utilisation des véhicules électriques à cette échelle.

#### **4.2.2. Progetto veicoli elettrici leggeri**

La commune de Mendrisio a été choisie par l'Office fédéral de l'énergie pour accueillir un projet pilote et de démonstration des véhicules électriques légers (VEL). Ce projet s'est déroulé de 1995 à 2001 et a concerné, au final, 396 véhicules (objectif initial de 350). L'idée originelle était de parvenir à 8 % du parc automobile de la commune mais ce but n'a pu être atteint, car la zone d'étude a été, par la suite et pour diverses raisons, étendue aux huit communes limitrophes de Mendrisio et même au delà. De plus, le projet qui ne devait, à l'origine, concerner que les voitures de tourisme a été étendu à tout type de véhicule propulsé par un moteur électrique. Notamment aux motos, très répandus dans le canton du Tessin. Au final, les voitures de tourisme, à 2 ou 4 places, représentaient 34 % du parc de véhicules électriques du projet, soit 132 voitures (état au 30 juin 2001) (Schwegler & Wegmann, 2001, pp. 2-4).

Cette expérience grandeur nature poursuivait principalement trois objectifs, à savoir "démontrer une utilisation judicieuse des VEL dans la vie de tous les jours, tester et évaluer les mesures promotionnelles, intégrer les VEL dans une conception de la mobilité progressiste et écologique" (Schwegler & Wegmann, 2001, p. 2). Plusieurs mesures promotionnelles à l'achat de véhicules électriques ont été mises à l'essai au cours de ce projet. Toutes n'ont pas montré la même efficacité, si bien que certaines ont été abandonnées en cours de route. Ces mesures étaient d'ordres divers :

Tableau 7 : Aperçu des principales mesures promotionnelles mises en œuvre à Mendrisio (Schwegler & Wegmann, 2001, p. 5)

<b>Financières</b>		<i>subvention à l'achat</i> <i>suppression de l'impôt sur les véhicules à moteur</i> <i>réduction des primes d'assurance</i>
<b>Infrastructurelles</b>	<i>bornes de recharge</i>	<i>bornes de recharge publiques</i> <i>gratuité de l'énergie</i> <i>bornes obligatoires dans les locaux neufs</i>
	<i>stationnement</i>	<i>places de parc réservées</i> <i>suppression de la taxe de parcage</i> <i>doublage de la durée maximale de parcage</i>
<b>De soutien</b>	<i>avant l'achat</i>	<i>location de VEL</i> <i>courses d'essai</i>
	<i>après l'achat</i>	<i>garantie de 3 ans sur les batteries</i> <i>service de dépannage gratuit</i> <i>véhicule de remplacement en cas de panne</i> <i>formation permanente des spécialistes</i> <i>rabais sur la location de véhicules traditionnels</i> <i>cours de conduite</i> <i>abonnements généraux journaliers à prix réduits</i>
<b>Sur le plan de la communication</b>	<i>médias</i>	<i>hebdomadaire régional "L'Informatore"</i> <i>journaux tessinois</i> <i>radio régionale « 3iii »</i> <i>télévision suisse italienne</i> <i>médias suisses</i> <i>médias étrangers</i> <i>presse spécialisée</i>
	<i>manifestations</i>	<i>ExpoVEL à Mendrisio</i> <i>stand VEL dans des expositions régionales</i> <i>présentation lors de congrès</i>
	<i>publicité</i>	<i>catalogue de véhicules</i> <i>publicité par les revendeurs</i> <i>VEL dans les locaux de vente</i> <i>publicité au cinéma</i> <i>publicité par affiches</i>
	<i>internet</i>	<i>site</i>
	<i>documentation</i>	<i>3 rapports intermédiaires sur l'essai</i> <i>série de publications concernant l'essai</i> <i>vidéo « A Sustainable Car »</i> <i>présentation écran tactile (touch-screen) »</i>

Au niveau de la réalisation des objectifs, l'essai de Mendrisio a démontré que les VEL étaient utilisés judicieusement par les usagers. Ceux-ci ont manifesté un taux de satisfaction élevé. Quant à la consommation d'énergie, cette dernière a été estimée à 2,5 l/100 km (énergie secondaire)<sup>5</sup> (Schwegler & Wegmann, 2001, p. 6). En ce qui

<sup>5</sup> Pour la définition de l'énergie secondaire, se reporter au point 4.1.

concerne les mesures promotionnelles, certaines se sont révélées indispensables pour le lancement d'un tel projet :

- **la contribution à l'achat de véhicules** : indispensable afin de contrebalancer les surcoûts avant que le nombre de vente ne génère des économies d'échelle suffisantes;
- **l'information** : pour améliorer le niveau de connaissance des acheteurs potentiels;
- **les essais de conduite** : si possible de plusieurs jours;
- **les bornes de recharge publiques** : tant pour les usagers que les acheteurs potentiels (Schwegler & Wegmann, 2001, p. 7).

Dans le cas où une politique de promotion des véhicules électriques, afin de lutter contre les émissions de GES, serait menée dans le canton de Genève, de telles mesures de promotion s'avéreraient, sans doute, tout aussi nécessaires, d'autant plus si la collectivité s'engageait sur cette voie alors que ce type de véhicules reste méconnu du plus grand nombre (c'est-à-dire, sans attendre qu'ils aient fait leurs preuves dans d'autres collectivités).

Concernant les voitures électriques proprement dites, l'essai de Mendrisio a permis de démontrer que **la moitié d'entre eux (50 %) ont été achetés comme véhicules supplémentaires, l'autre moitié pour remplacer un véhicule existant**. Quant aux comportements de mobilité, les observations montrent que, pour les ménages dont les caractéristiques n'ont pas varié du début à la fin de l'expérience (pas de changement de lieu de travail ou de domicile, pas de nouvel accédant au permis de conduire, etc.), **les véhicules électriques se sont substitués aux véhicules classiques** (Schwegler & Wegmann, 2001, pp. 9-10), ce qui apparaît comme favorable en termes environnementaux. Selon les résultats de l'étude, les VEL ont permis, malgré une augmentation avérée de 9 % des prestations kilométriques, d'économiser 35'000 litres d'essence, 142'000 kg de CO<sub>2</sub>, 220 kg de NO<sub>x</sub> et 3 kg de PM<sub>10</sub> sur une année (particuliers uniquement) (Schwegler & Wegmann, 2001, p. 10).

#### 4.2.3. Project better place

Better Place est un fournisseur de services pour les véhicules électriques. Plus précisément, cette société cherche à implanter et développer un réseau de recharge et d'échange de batteries à l'échelle d'un pays. Les points de charge standards sont des bornes installées aux lieux de domicile, de travail ou dans les espaces publics permettant une recharge des batteries en 4 à 8 heures (Better place). Un système de recharge rapide (20 minutes), permet, également, la recharge des batteries à hauteur de 80 % (Better place, 2009).

Cependant, la particularité du projet Better Place / Renault-Nissan, consiste en l'essai à grande échelle d'un système d'échange de batteries. Cette technologie offre un double avantage. Ou plutôt, remédie, partiellement tout au moins, à un double handicap lié tout à la fois à la faible autonomie affectant les voitures électriques et à leur prix d'achat. Elle permet, en effet, premièrement de supprimer le temps de charge des batteries, leur

échange se faisant en moins de temps qu'il n'en faut pour faire le plein de carburant, étendant ainsi, potentiellement à l'infini, le rayon d'action des voitures électriques. Il faut cependant relativiser ce point, l'échange de batteries devant se renouveler, en comptant que les infrastructures le permettent, bien plus fréquemment que le remplissage du réservoir d'un véhicule traditionnel. Le second avantage du système que Better Place et son partenaire Renault-Nissan entendent mettre en place tient au fait que le constructeur automobile reste propriétaire des batteries, abaissant d'autant le prix d'achat des voitures électriques. Le coût des batteries compte, en effet, pour une bonne part dans le prix d'achat de ce type de véhicules.

Les premières voitures devraient être mises en circulation en 2011 et les partenaires s'engagent à en commercialiser 100'000 d'ici 2016 (Better place, 2009). Ces deux expériences, menées à grande échelle, semblent montrer que les constructeurs commencent à prendre au sérieux la recherche / développement dans le domaine des voitures électriques. Que celles-ci seront appelées à jouer un rôle croissant dans la mobilité individuelle motorisée et rompront, dans un avenir proche, avec une certaine image de véhicules bricolés par des écologistes en mal de fantaisie.

#### **4.2.4. Incitations à l'achat de véhicules électriques**

Les incitations étatiques à l'achat de véhicules électriques, comme de véhicules classiques énergétiquement plus propres peuvent prendre plusieurs formes. La première d'entre elles, et la plus aisée à mettre en œuvre, consiste en des subventions à l'achat ou des avantages fiscaux accordés aux véhicules plus efficaces sur le plan environnemental. Cette forme de subvention s'apparente à une diminution des frais fixes. Or, ces coûts ont plusieurs défauts. Premièrement, ils sont les plus minimisés par ceux qui les supportent et, par conséquent, les moins incitatifs (ou dissuasifs, selon le point de vue adopté). A cela s'ajoute que, plus le prix d'achat d'un véhicule est élevé, plus le véhicule en question a de grandes chances d'être de grande taille, lourd, suréquipé et donc polluant. Par conséquent, la valeur ressentie de la taxe est d'autant plus faible que le véhicule est cher (une personne pouvant se permettre l'achat d'un véhicule à 100'000.-- Fr. aura, la plupart du temps, moins de peine à s'acquitter d'une facture finale de 103'000.-- Fr que celle qui devrait payer 10'300.-- Fr au lieu de 10'000.-- Fr). De plus, un véhicule polluant qui ne roule pas pollue moins qu'un véhicule efficace énergétiquement parlant et qui circule quotidiennement. Une telle taxe est donc socialement doublement injuste. C'est pourquoi, les incitations de second type s'avèreraient, certainement, beaucoup plus efficaces. Celles-ci consistent en une taxation des véhicules liée aux prestations, à l'image ce qui se fait déjà pour les poids lourds. Elles peuvent prendre de nombreuses formes. En fonction du lieu d'utilisation, du nombre d'occupants ou du type de véhicule, de l'heure d'utilisation, etc. De cette manière, le coût de la taxe est, psychologiquement, directement liée au trajet effectué, ce qui permet de beaucoup plus facilement en appréhender le coût.

A ce stade, il apparaît nécessaire de mentionner que les voitures électriques, en tenant compte des émissions libérée pour la production d'électricité au niveau mondial, ne présentent pas automatiquement un meilleur bilan CO<sub>2</sub> que, par exemple, les véhicules diesel de dernière génération, avec filtre à particules. Cependant, il ne faut pas négliger



l'importance psychologique du passage à ce type de propulsion. Dans ce cas, en effet, l'individu a l'impression de participer directement à l'effort environnemental. Dit plus simplement, il a fait sa part. Les collectivités ont, ensuite, toute latitude pour promouvoir les économies et la production d'électricité propre. L'avantage des véhicules électriques est qu'ils fonctionnent indifféremment avec n'importe quel type de production électrique (Gilbert & Perl, 2008, p. 157). Pas besoin d'adapter le moteur parce que l'électricité stockée dans les batteries provient maintenant d'un parc éolien et plus d'une turbine à gaz. Ce n'est pas forcément le cas en ce qui concernerait un changement de carburant alimentant les moteurs à combustion interne (biocarburants, etc.). Il est ainsi plus facile de "verdir", après coup, l'électricité alimentant le parc de voitures électriques que d'inventer un nouveau carburant pour les véhicules conventionnels.

Dans le même temps, quand ces efforts auront produit leurs effets et que la production d'électricité sera devenue plus durable, les voitures électriques auront également fait des progrès. Ce qui leur permettra de répondre aux attentes d'une part grandissante de conducteurs et, par la même occasion de toucher une clientèle qui ne pouvait pas être atteinte avant, ces véhicules électriques de nouvelle génération étant, en outre, propulsés avec de l'électricité plus "propre".

## DEUXIÈME PARTIE : MÉTHODOLOGIE

## 1. Postulats de départ

Nous pouvons maintenant préciser les choix qui orienteront la réponse à notre questionnement. Le premier postulat, déjà évoqué, sur lequel se base notre travail est que l'électrification partielle du parc automobile suisse se fera au travers de l'acquisition de véhicules à batteries fixes. En outre, l'usage des voitures électriques est conditionné à l'existence d'infrastructures de recharge, qui, à l'heure actuelle, n'existent pas encore. Nous considérerons ici ce problème comme d'ors et déjà résolu et, ainsi, les lieux potentiellement adéquats comme équipés. Il est, en effet, extrêmement compliqué d'estimer le frein à l'achat d'une voiture électrique que représente, pour les individus, un réseau de points de recharges insuffisant. Nous sommes, par conséquent, contraints de faire comme si les adaptations nécessaires étaient achevées.

Nous devons déterminer les parts de marché potentielles des voitures électriques parmi les nouvelles mises en circulation dans l'agglomération. De par les caractéristiques propres aux voitures électriques, tout le monde ne peut, selon notre postulat, être un usager potentiel de ce moyen de transport. Plusieurs conditions doivent être réunies pour cela. Nous allons donc nous attacher, dans un premier temps, à dresser le portrait robot des utilisateurs potentiels. Comme les acheteurs de véhicules à propulsion électrique doivent pouvoir recharger les batteries de voiture au moins au domicile, voire au lieu de destination, au-delà d'une certaine distance ou si le véhicule est utilisé durant la journée, ces personnes doivent nécessairement disposer d'une prise au domicile assurée, donc d'une place de parking privée. Ils doivent, également, disposer d'une place assurée au lieu de destination, idéalement équipée d'une prise pour la recharge. Ainsi, la question du stationnement prend tout son sens dans le cadre de l'électrification du parc automobile. Si les véhicules conventionnels ne peuvent se garer n'importe où pour des raisons légales, les voitures électriques subissent, quant à elles, une contrainte encore plus importante, la non disponibilité d'une place de stationnement équipée pour la recharge des batteries peut signifier, tout simplement, l'impossibilité du retour au point d'origine.

De plus, l'autonomie des véhicules à propulsion électrique fait que leur utilisation est adaptée à des trajets relativement courts et réguliers. Les déplacements pendulaires (hors considérations de politique des transports) se prêtent particulièrement bien à l'utilisation de ce type de voitures. Cependant, les voitures n'étant pas utilisées uniquement dans le cadre des déplacements pendulaires, elles ne peuvent pas, dans la plupart des cas, prétendre être l'unique véhicule d'un ménage. Seul le cas des ménages possédant une seule voiture de petite cylindrée échappent à cette règle, leur véhicule étant, de toute façon, peu adapté à des trajets longs. Le tableau suivant résume les caractéristiques sur lesquelles nous nous baserons pour identifier les personnes susceptibles de s'équiper d'une voiture électrique. Ces caractéristiques nous aideront à

déterminer le potentiel des voitures électriques en Suisse.

Tableau 8 : caractéristiques nécessaires pour l'acquisition et l'utilisation d'une voiture électrique

<b>Stationnement</b>	<i>Place de parking privée au lieu de domicile équipée d'une prise de courant pour la recharge</i>  <i>Place de parking assurée au lieu d'arrivée, si possible équipée d'une prise de courant pour la recharge</i>
<b>Déplacements</b>	<i>Trajets entre le lieu de domicile et le lieu de travail</i>  <i>Trajets d'une longueur maximale de 75 km aller-retour</i>  <i>Trajets d'une longueur maximale de 150 km aller-retour, vers un lieu équipé pour la recharge des batteries et marqués par un intervalle de longue durée entre l'aller et le retour</i>
<b>Ménages concernés</b>	<i>Ménages équipés d'une petite voiture (cylindrée inférieure à 1.4 l.)</i>  <i>Ménages multimotorisés</i>
<b>Voitures concernées</b>	<i>Petites voitures (cylindrée inférieure à 1.4 l.)</i>  <i>Voiture supplémentaire dans un ménage multimotorisé</i>

Les données utilisées pour répondre à notre interrogation de départ sont celles du micro-recensement transport 2005 (MRT 2005). Celles-ci se présentent sous la forme de neuf bases de données SPSS concernant les véhicules, les trajets, les trajets nationaux uniquement, les étapes des trajets, les ménages, les personnes des ménages, les personnes interrogées et, finalement, deux bases de données sur les voyages effectués (voyages d'une journée et voyages avec nuitée), moins intéressantes pour nous. Ces bases de données sont combinables entre elles et nous permettent de répondre à nos interrogations.

La première opération à effectuer consiste à isoler les ménages de l'agglomération franco-valdo-genevoise de ceux du reste de la Suisse. Pour ce faire, nous sélectionnons les ménages dont le lieu de domicile est situé dans les communes genevoises ou du district de Nyon. A partir de cette première manipulation, nous pouvons sélectionner les données correspondantes dans toutes les autres bases.

## 2. Hypothèses

Suite à notre analyse théorique de la mobilité et de la consommation énergétique du transport individuel de personnes en Suisse, nous pouvons maintenant formuler nos hypothèses à tester :

- H1. Le remplacement d'une part du parc automobile de l'agglomération franco-valdo-genevoise par des voitures électriques, malgré les progrès technologiques des voitures à moteur à combustion interne à venir, permettrait de réduire significativement les rejets de CO<sub>2</sub> du système régional de transport de personnes;**
- H2. Cette réduction bénéficierait, majoritairement, aux trajets pendulaires.**

### 2.1. Identification des ménages

Les données du MRT 2005 nous permettent d'identifier les ménages correspondant aux caractéristiques définies. Celui-ci nous renseigne, en effet, sur le nombre de voiture à disposition des ménages, le genre de voiture, sur les moyens de transport utilisés pour se déplacer, ainsi que sur la disposition ou non d'une place de parking privée aux lieux de domicile et de travail et la gratuité ou non de celle-ci. Nous considérons les places garanties au lieu de travail et au domicile comme équipée (ou facilement équipable) pour la recharge des batteries.

Ces informations nous permettent de déterminer le taux de ménages correspondant aux caractéristiques requises et leur lieu de résidence, ce qui nous permettra d'identifier les trajets sur lesquels les voitures électriques se substitueront aux véhicules classiques, tout comme le type de route sur lesquelles ces prestations kilométriques seront réalisées.

### 2.2. Modélisation du parc automobile

La modélisation du parc automobile de l'agglomération représente une des plus grosses parts de ce travail. Cela nécessite de calculer les taux annuels de nouvelles mises en et hors circulation des voitures. De ces taux, nous tirons une "pyramide des âges" des véhicules en circulation, essentielle pour calculer le coefficient de consommation du parc automobile de chaque année et, par conséquent, l'indice de consommation moyen du parc automobile de chaque année future.

### 2.3. Coefficients de consommation

Pour calculer les coefficients annuels de consommation des véhicules, nous segmentons le parc automobile par type de carburant (essence, diesel, hybrides, électricité) et catégorie de cylindrée, afin d'obtenir la structure du parc automobile. Nous corrigeons, dans un deuxième temps, la structure obtenue par les taux de prestations kilométriques attribuables à chaque segment.

Nous adaptons l'année de base obtenue en fonction de l'évolution passée et présente

des ventes de véhicules ainsi que de l'évolution des prestations kilométriques de chaque segment. Nous obtenons, de cette manière, une clef de répartition des prestations kilométriques effectuées chaque année.

Dans la table obtenue, nous pouvons substituer, selon une clef de répartition, une proportion de voitures électriques déterminée pour tester nos hypothèses.

### **2.3.1. Type de routes**

Nous devons encore déterminer sur quelles routes et dans quelles proportions les prestations kilométriques sont réalisées. Par traitement des données du MRT 2005, nous pouvons estimer dans quelles conditions de trafic les trajets sont réalisés et, ainsi, attribuer à chaque kilomètre, le coefficient de consommation moyen calculé par type de route. En multipliant les coefficients de consommation des segments de véhicules par ceux du type de route, nous obtenons, au final, le coefficient de consommation moyen de chaque kilomètre parcouru.

### **2.3.2. Démarrages à froid**

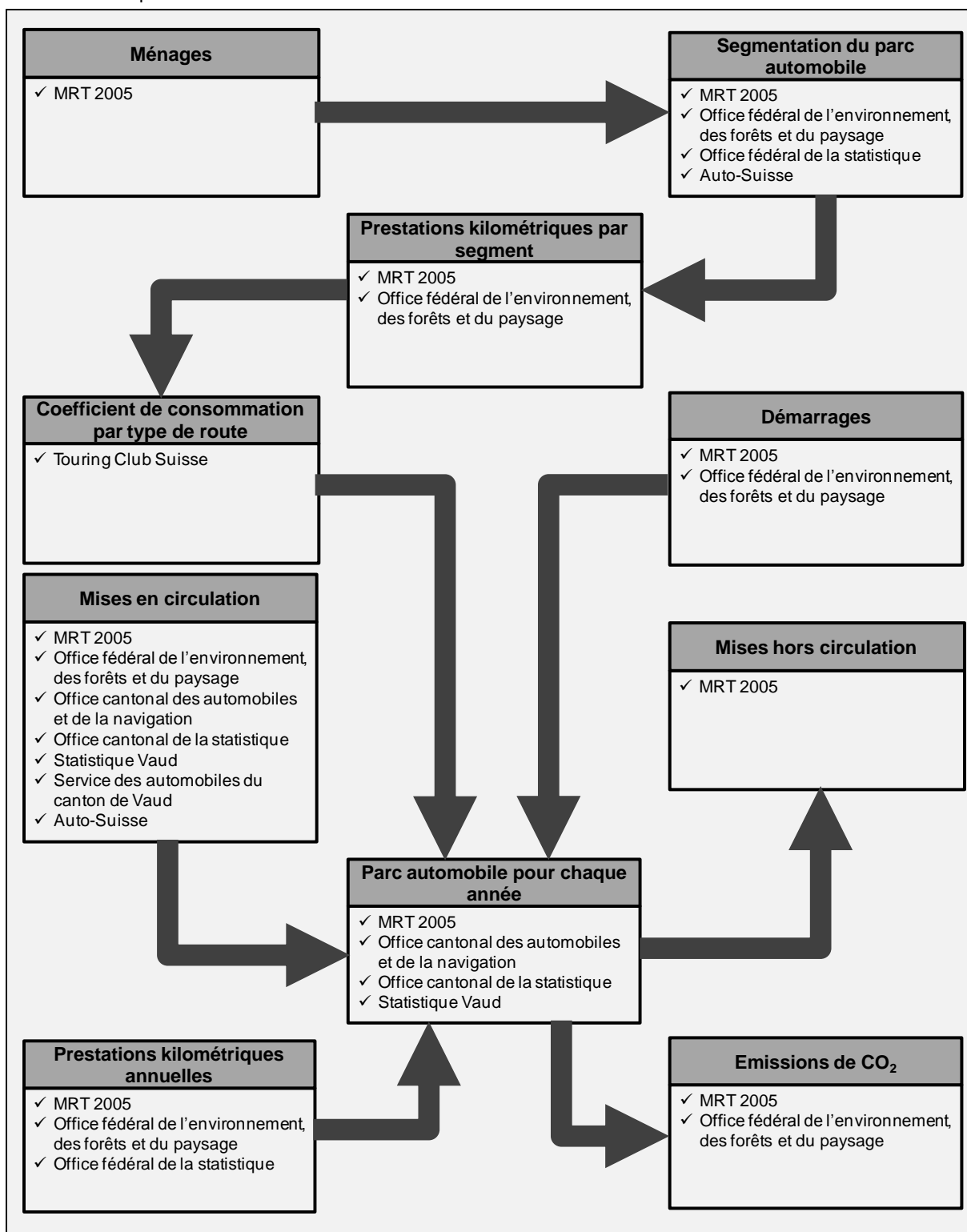
La dernière opération, avant le test de nos hypothèses, consiste à tenir compte de la différence de consommation due aux démarrages à froid. Chaque étape marquée par un arrêt suffisamment long implique un redémarrage à froid du véhicule. Les voitures électriques ne souffrant pas d'une consommation supplémentaire dans ce genre de cas, il faut en tenir compte pour ne pas les pénaliser par rapport aux véhicules traditionnels.

## **2.4. Test des hypothèses**

Le test de nos hypothèses constitue la partie la plus simple de notre analyse. Une fois connus les coefficients de consommation de chaque kilomètre parcouru, pour chaque année du parc, il nous suffit de multiplier cette consommation par les coefficients de CO<sub>2</sub> émis par la combustion de chaque type de carburant. En faisant varier le taux de voitures électriques dans le parc automobile, nous pouvons, dès lors, constater leur effet sur les émissions de CO<sub>2</sub> de celui-ci et répondre à notre question de départ. Le point suivant résume, sous forme schématique, la méthodologie suivie pour arriver à nos résultats.

### 3. Schéma de la méthode

Figure 10 : méthodologie appliquée pour le calcul des émissions de CO<sub>2</sub> et données utilisées pour chaque input



## TROISIÈME PARTIE : RÉSULTATS



# IDENTIFICATION DE LA POPULATION CIBLE

## 1. Population cible

Nous avons déjà déterminé un certain nombre de conditions à remplir pour pouvoir se déplacer avec une voiture électrique (tableau 9). Sur la base de ces critères, nous pouvons déterminer, à présent, la proportion de ménages susceptibles de se porter acquéreurs d'un tel véhicule.

### 1.1. Déplacements

Pour déterminer les trajets adéquats pour pouvoir utiliser un véhicule à batteries, nous sélectionnons les déplacements du MRT 2005 selon les critères suivants (trajets réalisés en tant que conducteur de voiture uniquement) :

- déplacement de maximum 75 km aller-retour au domicile;
- déplacement de maximum 150 km aller-retour au domicile si le but du déplacement est de se rendre à son travail.

Ce procédé nous permet de constater que tous les déplacements pour motif "travail", en "voiture conducteur" répondent à ces critères, tout comme 99.6 % des déplacements d'"achats" et 96.3 % des déplacements de loisirs. Au vu de ces résultats, nous ne tenons compte, dans la détermination de la population cible pour les voitures électriques, que des caractéristiques personnelles et ignorons celles concernant les déplacements effectués.

### 1.2. Caractéristique du domicile

La base "ménages" du MRT 2005 ne nous indique pas dans quel type de logement vivent les personnes sondées. En revanche, il répartit les types d'occupants du domicile principal en quatre catégories :

- locataire, preneur à bail ou sous-locataire;
- copropriétaire;
- propriétaire;
- logement de fonction ou gratuit.

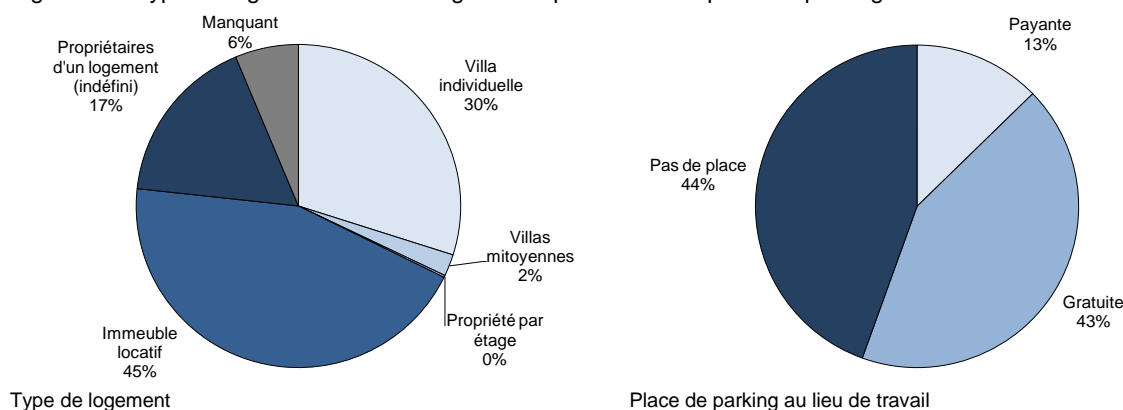
D'autres variables renseignent encore sur le nombre de logements dans l'immeuble d'habitation, la possession d'un jardin privatif ou d'un grand balcon / terrasse. En croisant ces données avec celle des zones d'habitation (centre-ville, suburbain 1<sup>ère</sup> couronne, suburbain 2<sup>e</sup> couronne, périurbain), nous estimons les types d'habitation dans lesquels résident ces ménages (maisons individuelles, villas jumelles, propriétés par étage, immeubles locatifs) selon les règles suivantes :

- une habitation comportant un seul logement et un jardin privatif est une villa individuelle;
- une habitation comportant plusieurs logements et un jardin privatif est une villa mitoyenne;
- une habitation comportant plusieurs logements, sans jardin; une habitation située dans le centre-ville, comportant plusieurs logements et dont les occupants sont propriétaires sont des propriétés par étage;
- les locataires d'un appartement dans un immeuble à plusieurs logements, dans le centre-ville ou les zones suburbaines sont des immeubles locatifs.

Cette répartition nous permet d'estimer la part des personnes disposant d'une prise de courant pour la recharge des batteries à leur domicile. Nous estimons que tel est le cas pour les ménages résidant en maisons individuelles ou en villas mitoyennes.

En appliquant ces critères de sélection aux données du MRT 2005, nous apprenons que 32 % des ménages résident en villas individuelles ou mitoyennes et que 43 % bénéficient d'une place de stationnement gratuite sur le lieu de travail. Ces chiffres nous apparaissent quelque peu surévalués. Néanmoins, nous n'avons pas besoin de données plus précises dans le cadre de cette étude. Les constructeurs automobiles tablent, en effet, sur une part de marché des véhicules neufs d'environ 10 % en 2020. Les caractéristiques constatées offrent, par conséquent, une marge suffisante, même dans le cas d'une évaluation trop généreuse.

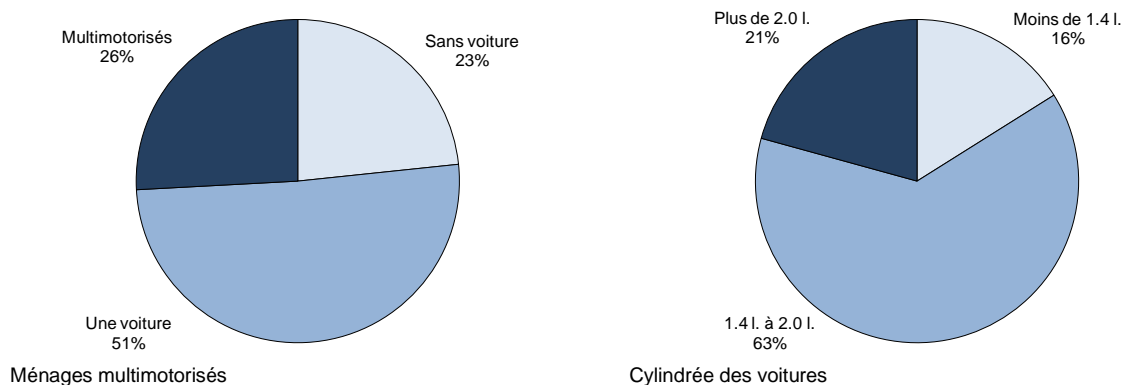
Figure 11 : type de logements des ménages et disposition d'une place de parking sur le lieu de travail



### 1.3. Caractéristiques des ménages et des voitures

Finalement, concernant le niveau de motorisation des ménages genevois et du district de Nyon, le MRT 2005 nous apprend que 26 % d'entre eux possèdent au moins deux voitures. 16 % des voitures du parc de l'agglomération affichent une cylindrée inférieure à 1.4 litres.

Figure 12 : ménages multimotorisés et cylindrée des voitures des ménages



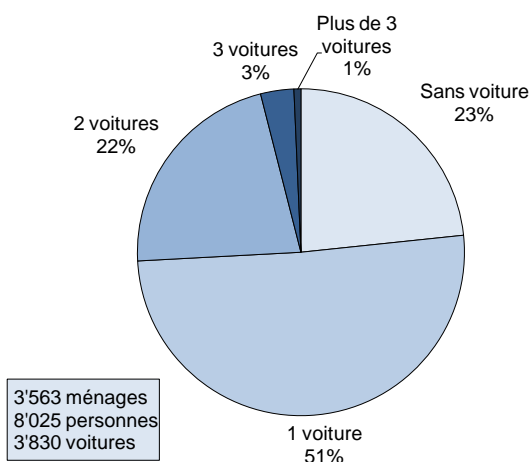
Au vu de ces chiffres, nous pouvons estimer que les parts de marché des voitures électriques, sauf modification majeure de leurs caractéristiques, pourraient représenter, à terme, au maximum un quart à un tiers du parc de l'agglomération. Nous retenons, par conséquent, **un plafond de 30 % du parc automobile pour les voitures électriques.**

## 2. Parc automobile

L'analyse des données du MRT 2005 concerne un parc automobile de 3'830 voitures de tourisme et 847 deux-roues motorisés (2RM) (canton de Genève district de Nyon). **Sur l'ensemble du canton de Genève, 217'487 voitures et 42'572 motocycles étaient en circulation au 31 décembre 2005** (Office cantonal des automobiles et de la navigation, 2009), pour une population de 440'982 habitants (OCSTAT, 2009). Le taux de motorisation est, par conséquent de 0.49 voitures par habitant (0.1 deux-roues motorisés) ou 0.46, respectivement 0.11 selon les données du MRT 2005.

Le district de Nyon, quant à lui, comptait 77'985 habitants (12 % de la population cantonale) à la même époque (Statistique Vaud, 2009), pour un parc automobile vaudois de 350'484 véhicules. En postulant que ce dernier est

Figure 13 : parc automobile dans l'agglomération franco-valdo-genevoise



équitablement répartis selon les districts, nous obtenons un parc de 41'999 voitures de tourisme dans le district de Nyon, soit un taux de motorisation de 0.54 voiture par habitant. Selon le même calcul, le district compterait 5'250 deux-roues motorisés (0.07/h.). Si l'on se base sur l'échantillon du MRT 2005, le taux de motorisation du district de Nyon est de 0.59 voitures par habitant (0.08 deux-roues motorisés). Cette différence s'explique par le fait que les habitants des centres urbains sont, globalement, moins motorisés. Le premier taux est, par conséquent, tiré vers le bas par la ville de Lausanne, ce qui n'est pas le cas pour le canton de Genève, puisque la ville est incluse dans les données sélectionnées du MRT 2005. Pour cette raison, nous considérerons comme valable le taux des statistiques cantonales pour Genève et celui du MRT 2005 pour le district de Nyon. Par conséquent, nous obtenons **pour le district de Nyon un parc 45'649 voitures (12.09 % du parc de voitures vaudois) et 6'118 2RM.**

**Le parc automobile de la partie suisse de l'agglomération franco-valdo-genevoise comptait ainsi, en 2005, 263'136 voitures et 48'690 deux-roues motorisés.** L'âge moyen du parc de voitures est de 8.36 ans (9.5 ans pour les 2RM).

## 2.1. Evolution du parc automobile

"L'effectif de véhicules de n'importe quelle année future peut être représenté par la somme des nouvelles mises en circulation attendues ainsi que des véhicules restants de chaque année d'homologation [...]. Les taux de mise hors circulation relativement stables sur l'axe du temps constituent une base de projection fiable. L'évolution comparativement incertaine des nouvelles mises en circulation n'a qu'une incidence minimale car les mises en circulation annuelles représentent moins de 10 % du parc automobile (OFEFP, 2004, p. 16). Nous allons, comme le recommande l'OFEFP appliquer cette méthode au parc automobile de l'agglomération franco-valdo-genevoise.

### 2.1.1. Mises hors circulation

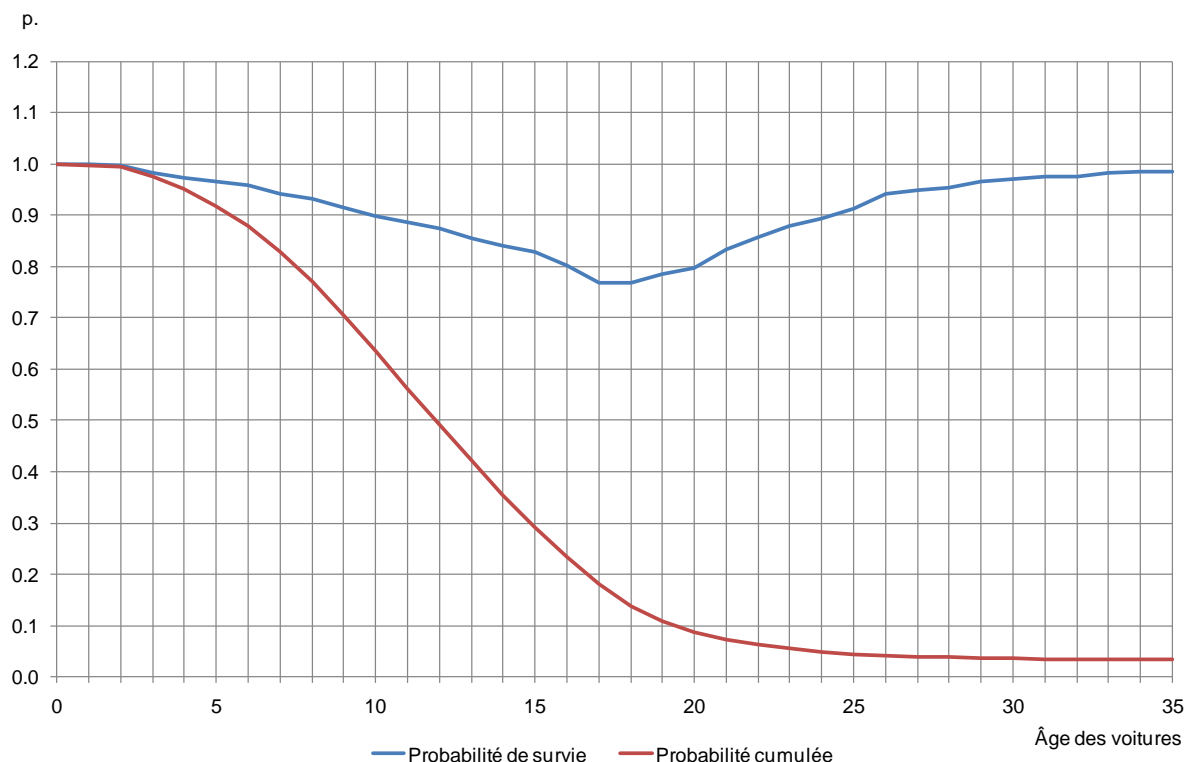
Tout d'abord, nous calculons le taux de mises hors circulation des véhicules d'après les données du MRT 2005. L'enquête a porté sur un effectif total de 3'613 voitures parmi les ménages sondés dans le canton de Genève et le district de Nyon. Nous avons, tout d'abord, réparti ces voitures par années d'immatriculation et par canton. Cependant, les données présentaient des pics, probablement dus à la tendance des enquêtés à répondre par un âge arrondi de leurs véhicules (les pics observés concernaient les 5 ans, 10 ans, etc.) plutôt que par les années de mise en circulation. Ces pics rendaient problématique l'établissement d'un "modèle de survie" des voitures. Il a donc fallu procéder à un lissage préalable, afin de gommer l'effet de regroupement observé.

La méthode utilisée a été de prendre en compte la moyenne sur les 5 années précédentes et les 5 années suivantes pour chaque effectif annuel de véhicules. Certains pics trop prononcés ont encore été gommés en utilisant la moyenne arithmétique de l'effectif de l'année précédente et suivante, ignorant ainsi l'effectif de l'année en question. Une fois cette opération effectuée, la somme des différences entre le nombre de voitures d'une année par rapport à l'année précédente correspond au nombre total de voitures retirées de la circulation en 2005. Avec l'effectif total des véhicules du MRT 2005, nous pouvons calculer le taux de mise hors circulation des

voitures que nous considérons comme stable sur l'axe du temps.

Ces calculs permettent d'arriver au modèle de mise hors circulation suivant :

Figure 14 : probabilité d'une voiture d'être encore en circulation l'année suivante et probabilité cumulée de ne plus être en circulation



Comme on peut le voir, le taux de mise hors circulation des véhicules progresse rapidement jusqu'à un maximum autour de 17 ans d'âge avant de s'inverser. Ainsi, les anciens véhicules survivants ne sont, pour ainsi dire, plus retirés de la circulation. **L'application de ce modèle de survie aux données du MRT 2005 nous indique des taux de mise hors circulation de 6.7 % pour le canton de Genève et de 6.26 % pour le district de Nyon.**

### 2.1.2. Nouvelles mises en circulation

L'évolution du parc automobile est assez difficile à modéliser, surtout en ce qui concerne la partie vaudoise de l'agglomération. En effet, les statistiques sur le parc automobile sont disponibles par canton. S'il est, par conséquent, relativement aisé d'anticiper l'évolution du parc automobile pour le canton de Genève (avec toutefois les réserves évoquées plus haut), les calculs sont, en revanche, compliqués en ce qui concerne le district de Nyon. Et nécessitent le croisement de plusieurs sources.

Comme indiqués plus haut, l'OFEFP estime que le taux annuel de nouvelles mises en circulation est inférieur à 10 % du volume du parc automobile suisse. Selon les données du MRT 2005, **les voitures mises en circulation en 2005, dans le canton de Genève, représentaient seulement 4.44 % du parc.** La collecte des données s'étant étendue de janvier 2005 à avril 2006, ce chiffre peut être considéré uniquement comme un estimateur du taux de nouvelles mises en circulation en 2005 (des voitures auront, en

effet, été détruites, volées ou exportées au cours de l'année). Cependant, l'effectif des véhicules mis en circulation en 2005 est de plus d'un tiers inférieur à celui de l'année précédente et de moitié par rapport à celui de 2003, malgré les sorties occasionnées entretemps. Cette sous-évaluation est due au fait que les interrogations ont été menées sur un jour de l'année. Les personnes interrogées en janvier, par exemple, disposaient de onze mois pour changer de véhicule ou en acquérir un nouveau. Ces nouvelles mises en circulation ne sont pas prises en compte dans les chiffres du MRT 2005. Ainsi, si l'on considère l'année 2004, le taux de nouvelles immatriculations est de 6.83 %. Si l'on prend en compte l'effectif 2005 lissé avec ceux des cinq années précédentes, ce taux monte à 7.34 %.

On trouve, dans les statistiques de l'Office cantonal des automobiles et de la navigation de Genève, la dimension du parc d'automobiles de 2004 à 2007. L'analyse de ces données montre une **contraction moyenne de 0.28 %** de ce dernier sur la période en question. Pour l'année 2005, cette contraction était de 0.37 % (Office cantonal des automobiles et de la navigation, 2009). Si l'on se réfère au modèle de survie, développé au chapitre précédant sur la base des données du MRT 2005, le taux de mises hors circulation des voitures est de 6.7 % du parc. Nous pouvons, par conséquent, calculer un **taux de nouvelles mises en circulation pour l'année 2005, à Genève, de 6.33 %**.

Les mêmes opérations effectuées pour le district de Nyon donnent des résultats assez différents. Les calculs effectués sur la base des données du MRT 2005 indiquent des taux de nouvelles mises en circulation allant de 5.16 % (2005) à 10.45 % (2004). Les données lissées, selon la même méthode que pour le canton de Genève, donnent un taux de 8.91 %. Par comparaison, le parc automobile du canton de Vaud montre une progression de 0.87 % sur la période 2004-2007 (+0.43 % en 2005). En ajoutant les sorties (5.2 % du parc), calculées sur la base de notre modèle de survie, le taux de nouvelles mises en circulation s'affiche à 5.63 %. Ce taux nous apparaît, néanmoins, sous-évalué pour au moins deux raisons. Premièrement,

Tableau 9 : évolution différenciée de la population du canton de Vaud et du district de Nyon

	2005	2010	2015	2020	2025
Pop. canton de Vaud (milliers)	651	691	725	755	785
Croissance canton (en %)		6	11	16	21
Pop. district de Nyon (milliers)	78	87	94	100	106
Croissance district (en %)		11	20	28	35

le service vaudois des automobiles fournit les chiffres au 30 septembre et non au 31 décembre. Deuxièmement, de manière bien plus importante, la croissance de la population du district de Nyon est beaucoup plus forte que celle du canton de Vaud dans son ensemble (voir tableau ci-dessus). Le taux de nouvelles mises en circulation observé doit donc, également, y être plus élevé. Le taux de croissance de la population du district de Nyon de 2005 à 2025 est, en moyenne, supérieur de 0.61 % par année à celui du canton (0.82 % jusqu'en 2015 et 0.41 % de 2016 à 2025). En postulant la stabilité du taux de nouvelles mises en circulation à long terme, nous obtenons ainsi, par

un calcul linéaire, des **taux annuels de nouvelles mises en circulation de 9.85 % jusqu'en 2015 et de 8.46 % de 2016 à 2030, dans le district de Nyon.**

Le tableau suivant résume, à fin de comparaison, les statistiques des importateurs suisses d'automobiles :

Tableau 10 : évolution du parc automobile suisse (Auto-Suisse, 2009)

	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009
<i>Parc automobile suisse (en milliers de voitures)</i>	3'754	3'811	3'861	3'900	3'956	3'989	4'040
<i>Voitures mises en circulation</i>	271'541	269'211	259'426	269'421	284'674	288'525	263'915**
<i>Nouvelles mises en circulation (en %)</i>	7.23	7.06	6.72	6.91	7.20	7.23	6.53
<i>Dont diesel (en % des mises en circulation)</i>	21.54	25.94	28.07	29.96	32.52	32.39	29.28
<i>Dont 4x4 (en % des mises en circulation)</i>	20.05	20.82	21.67	24.92	26.02	24.94	26.10
<i>Dont alternatifs (en % des mises en circulation)</i>	-	-	-	-	2.20	1.90	2.10
<i>Mises hors circulation (en %)</i>	5.70	5.75	5.72	5.48	6.34	5.97	5.83
<i>Variation du parc (nb de voitures)</i>	57'461	50'091	38'572	55'773	34'024	50'301	28'553

\* Estimation sur la base de la progression moyenne des années précédentes

\*\* Estimation sur la base des données de janvier à novembre 2009

Selon ces données, **le taux moyen de nouvelles mises en circulation représente 6.98 % du parc automobile de l'ensemble de la Suisse**, ce qui équivaut à un taux de croissance moyen du parc de 1.16 % sur la période 2003-2009.

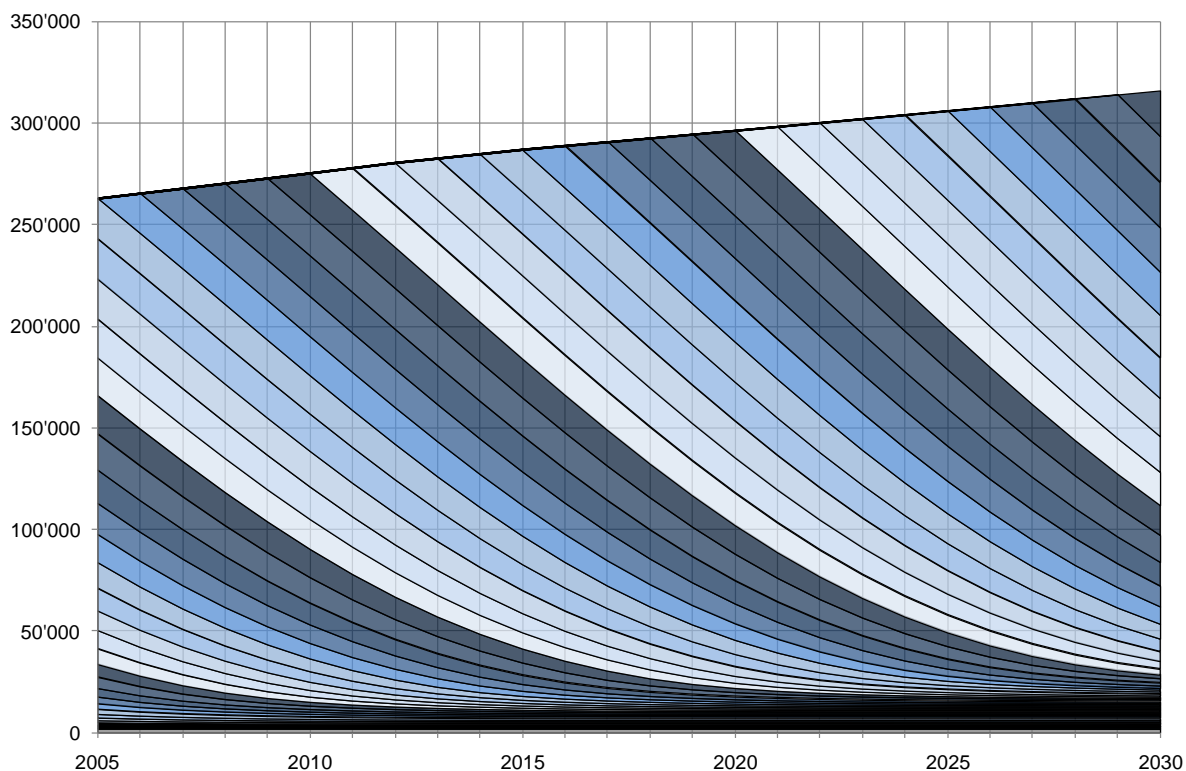
Au vu des chiffres présentés, nous décidons d'adopter pour nos calculs des taux de nouvelles mises en circulation différenciés pour le canton de Genève et le district de Nyon. Le taux de 6.33 %, correspond à la contraction observée du parc automobile genevois au cours de l'année 2005 (-0.37 %), corrigée du taux de mise hors circulation (6.7 %). Ce dernier taux peut être considéré, à l'instar de ce que suggère l'OFEFP, comme constant sur la ligne du temps (OFEFP, 2004, p. 16) et nous le conservons, par conséquent, en l'état. En revanche, au vu des projections démographiques pour le canton de Genève, le taux de mise en circulation de 6.33 % nous apparaît sous-évalué à long terme. L'office cantonal de la statistique prévoit, en effet, selon divers scénarii, une croissance de la population, d'ici 2030, allant de 0.46 % à 0.77 %, en moyenne annuelle depuis 2005 (0.63 % en moyenne des scénarii), avec un fléchissement autour des années 2012-2014 (OCSTAT, 2009). Du reste, si la contraction du parc a été, en moyenne, de 0.28 % de 2004 à 2007, elle ne représentait, déjà, plus que de 0.04 % de 2006 à 2007 (Office cantonal des automobiles et de la navigation, 2009).

En conséquence, nous décidons de retenir, pour le canton de Genève, **des taux de nouvelles mises en circulation de 7.09 % jusqu'à 2013 et de 6.90 % dès 2014** pour notre scénario tendance. Ces chiffres correspondent au taux de 6.33 % de nouvelles mises en circulation, corrigé de la croissance démographique attendue (en moyenne des scénarii de l'OCSTAT).

Pour le district de Nyon, nous retiendrons la moyenne arithmétique entre le taux calculé sur les données lissées du MRT 2005 (8.91 %) et ceux calculés sur la base des chiffres du service des automobiles du canton de Vaud, corrigé de la croissance supérieure de la population du canton de Vaud (9.85 % jusqu'en 2015, 8.46 % ensuite), soit des **taux de nouvelles mises en circulation dans le district de Nyon de 9.38 % et 8.68 %**.

Nous conservons un taux différencié pour les deux parties de l'agglomération car, nous le verrons plus loin, les coefficients d'émissions ne sont pas les mêmes entre ces zones. Par commodité, nous considérons ce taux comme également constant, à long terme, sur l'axe du temps.

Figure 15 : évolution prévue du parc automobile de l'agglomération d'ici 2030<sup>6</sup>



La figure ci-dessus représente, année après année, la part de véhicules restant de chaque nouvelle année de mise en circulation de voitures, dans l'agglomération franco-valdo-genevoise. Nous utilisons les données employées dans l'établissement de ce graphique comme base de calcul des effectifs de voitures de chaque année dans le

<sup>6</sup> Chaque ligne de couleur du graphique représente une année de nouvelles mises en circulation et la continuelle décroissance de son effectif à travers le temps. Une colonne constitue une coupe dans le parc automobile montrant, pour une année donnée, le nombre de voitures de chaque année constituant cette année de parc. Par exemple, en 2005, on trouve, sur un parc de 263'000 voitures, environ 20'000 voitures de 2005, 18'000 voitures de 2004 et ainsi de suite.



parc. Ce qui nous permet de tenir compte de l'évolution des technologies dans l'établissement de coefficients d'émissions d'une année quelconque. A titre de vérification, le chiffre des nouvelles mises en circulation de voitures de tourisme, en 2008 dans le canton de Genève, était de 15'617 (OFS, 2009b). Appliqué depuis l'année 2005, notre modèle nous fournit, pour la même année, le chiffre de 15'522 voitures, soit une différence de 0.61 %.

### 3. Coefficient de consommation

Maintenant que nous disposons d'une bonne connaissance du parc automobile de l'agglomération, nous allons nous attacher à établir un coefficient de consommation pour chaque année.

#### 3.1. Structure du parc automobile

Pour commencer, nous répartissons le parc de voitures selon le type de propulsion (essence, diesel, hybride), pour chaque année du parc. Nous subdivisons ensuite cette répartition en trois catégories de cylindrée (< 1.4 l, 1.4 l à 2 l, > 2 l). Ces trois catégories sont celles proposées par l'OFEFP (OFEFP, 2004, p. 16) et nous nous y tiendrons. Notamment, parce que nous avons postulé que les petites voitures faisaient partie des plus à même d'être remplacées par des voitures électriques. Par souci de simplification, et parce que ce type de véhicules ne représente qu'une part minime du parc, nous regroupons tous les véhicules en circulation, non propulsé par un moteur à essence ou diesel, avec les véhicules hybrides. De plus, nous les considérerons comme possédant des caractéristiques uniques. Leur effectif est, en effet, beaucoup trop petit, dans les données du MRT 2005, pour que nous puissions les répartir en catégories pertinentes.

Comme mentionné plus haut, la base de données des véhicules du MRT 2005 nous permet de répartir les véhicules dans les différentes catégories déterminées. Cependant, les clefs de répartition obtenues ne sont valable que jusqu'au milieu des années 1990. Ensuite, les effectifs deviennent trop petit (notamment pour les véhicules diesel) et la répartition, par conséquent, trop aléatoire. Pour cette raison, nous appliquons cette méthode jusqu'aux mises en circulation des années 1997 (diesel) et 1990 (essence). Pour les années antérieures, ainsi que pour les années postérieures à 2009, nous appliquons les répartitions fixes ci-contre. Ce choix est établi sur la base des années précédentes, en postulant la stabilité de cette répartition d'une année à l'autre. En ce qui concerne les années passées, les éventuelles fluctuations à long terme peuvent être négligées, car plus l'on remonte dans le temps, plus la part de ces véhicules dans le parc devient ténue. Pour les années à venir, cette répartition est une projection pouvant

Tableau 11 : répartition des véhicules anciens par catégories et projection après 2009

	< 1.4 l.	1.4 - 2.0 l.	> 2.0 l.
<i>Essence (1989 et plus anciens)</i>	20 %	60 %	20 %
<i>Essence (après 2009)</i>	25 %	55 %	20 %
<i>Diesel (1997 et plus anciens)</i>	5 %	65 %	30 %
<i>Diesel (après 2009)</i>	10 %	50 %	40 %

être modulée. Entre 2005 et 2010, la segmentation progresse régulièrement jusqu'à atteindre ces taux fixes déterminés.

En ce qui concerne la répartition par type de propulsion, nous nous basons sur les données du MRT 2005 pour notre année de base (2005). A partir de cette année de base, nous utilisons les statistiques de l'OFS (OFS, 2009b), où nous trouvons la répartition des nouvelles mises en circulation pour les véhicules à essence, diesel, hybrides (et autres en ce qui nous concerne) et électriques, de 2005 à 2008. Les statistiques des importateurs suisses d'automobiles (Auto-Suisse, 2009) nous fournissent, quant à elles, ces mêmes données de 1999 à 2008. A partir de 1999, nous appliquons une régression progressive de la part des véhicules diesel jusqu'au plancher de 3 % en 1995, chiffre qui correspond à la part des véhicules diesel dans le parc automobile suisse de l'époque (OFS, 2009b). Nous considérons, à partir de cette année, une répartition constante de 97 % de véhicules à essence et 3 % de voitures diesel (nous négligeons la part des autres types de propulsion).

Cette répartition nous permet d'estimer les parts de marché futures des voitures de tourisme diesel et essence. L'OFEFP prévoyait, en 2004, une continuation de la croissance des parts de véhicules diesel jusqu'à 30 % des nouvelles mises en circulation en 2010, puis une stabilisation à 30 % (OFEFP, 2004, p. 23). Pour notre part, la motorisation diesel représentant déjà 32 % des voitures neuves en 2008 (pic à 33 % en 2007), nous décidons de conserver un taux constant de nouvelles mises en circulation de diesels de 32 % (hors changement du aux voitures électriques).

Enfin, à partir de 2010, sur la base du potentiel des voitures électriques défini plus haut, ainsi que de la segmentation du parc automobile suisse, **nous postulons que les parts de marché gagnées par ce type de véhicules le seront à 75 % au dépend des véhicules à essence neufs et à 25 % des véhicules diesel.** Nous appliquerons la même clef de répartition en ce qui concerne les véhicules hybrides.

### 3.2. Répartition des prestations kilométriques par catégories

Maintenant que nous avons calculé les parts de chaque segment de véhicules dans le parc automobile, nous pouvons calculer leur part respective dans les prestations kilométriques réalisées à l'échelle de l'agglomération.

Les données du MRT 2005 nous permettent de calculer les kilomètres parcourus en une année dans notre zone d'étude. Pour l'année 2005, la population enquêtée a parcouru 107'600 km, dont 49'000 en voiture. Nous pouvons répartir cette distance entre chacun de nos segments du parc automobile, pour obtenir le pourcentage de kilomètres parcourus par chaque catégorie de voiture. Nous calculons, dans un deuxième temps, les kilomètres effectués par chaque segment, à effectifs de voitures égaux, afin d'obtenir un coefficient de prestations kilométriques pour chacun d'eux. Selon les données de l'OFEFP, les prestations des véhicules diesel seraient plus élevées que celles des voitures à essence (OFEFP, 2004, p. 24). Or, les chiffres du MRT 2005 ne confirment que partiellement cette observation. A effectif égal, les véhicules diesel de cylindrée inférieure à 1.4 l parcourent, en effet, beaucoup plus de km. Cependant, ces véhicules comptent parmi les plus rares (0.3 % du parc). Les autres catégories de véhicules diesel

fournissent des prestations comparables, voire légèrement inférieures, à celles des véhicules à essence. Nous décidons, par conséquent, de nous fier à ces données. Pour terminer, nous répétons l'opération pour chaque motif particulier de mobilité (travail, loisirs, achats, etc.).

Les coefficients de prestations kilométriques ainsi calculés nous permettent de corriger la part de chaque segment de véhicules, déterminée précédemment, de ses prestations effectives (un véhicule ne circulant pas n'émettant, par définition, pas de CO<sub>2</sub>). Nous considérons, dans cette étude, que les pourcentages de prestations réalisées par chaque segment sont constants d'année en année, même s'il est probable que

Tableau 12 : part des segments dans le parc et coefficient de prestation kilométriques

	< 1.4 l.	1.4 - 2.0 l.	> 2.0 l.
<i>Diesel</i> (part segment)	.008	.187	.089
<i>Diesel</i> (coefficient prestations)	1.400	.921	.984
<i>Essence</i> (part segment)	.125	.446	.140
<i>Essence</i> (coefficient prestations)	.899	1.039	1.004

celui des véhicules diesel progresse plus rapidement que les autres.

### 3.3. Consommation de carburant

La loi fédérale sur les réductions des émissions de CO<sub>2</sub> (loi sur le CO<sub>2</sub>) du 8 octobre 1999 imposait une réduction des émissions de CO<sub>2</sub> dues à l'utilisation énergétique des carburants fossiles de 8 % d'ici 2010, par rapport au niveau de 1990 (Assemblée fédérale, 1999, p. 1). Or, jusqu'à présent, l'augmentation du trafic à "réduit pratiquement à néant l'effet de réduction spécifique des émissions de CO<sub>2</sub> des voitures neuves" (OFS, 2009b, p. 30). L'objectif convenu entre Auto-Suisse et le DETEC correspondait, quant à lui, à une réduction de la consommation des véhicules de 3 % par année (baisse de 24 % de 2000 à 2008). Ce qui n'aurait, de toute façon, pas suffi pour atteindre l'objectif fixé. De plus, la réduction prévue dans le cadre du protocole de Kyoto correspond à un taux calculé sur les ventes de carburants, et non sur le volume consommé par les véhicules en Suisse. Or, de par les prix à la pompe pratiqués dans ce pays, la Suisse vend plus de carburant qu'elle n'en consomme à l'intérieur de ses frontières. Quoi qu'il en soit, la consommation moyenne des voitures n'a diminué, jusqu'en 2007, que de 1.5 % par année, malgré les progrès techniques observés. Cette faible amélioration est due au choix de véhicules plus gros et puissant prévalant jusqu'ici (TCS, 2009, p. 17). L'OFEFP table, dès lors, sur une baisse de la consommation des voitures neuves de 2 % par année dans le futur (OFEFP, 2004, p. 30). Nous nous basons ici, par conséquent, sur des taux de consommation supplémentaires de 1.5 % par année avant 2009 et de réduction de 2 % dès 2010 et ce, pour toutes les catégories de véhicules.

En ce qui concerne les voitures électriques, les émissions de CO<sub>2</sub> dépendent du mode de production de l'électricité. Nous considérons que la quantité d'électricité nécessaire au déplacement d'une voiture demeure constante, bien que des améliorations soient, là encore, possibles. La récupération de l'énergie de freinage est déjà d'actualité sur les

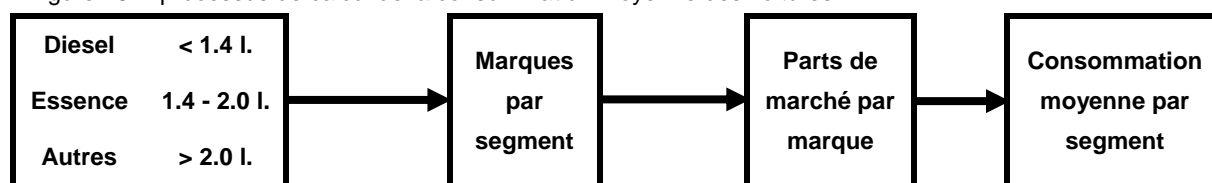
voitures électriques actuelles. Plus encore, la décharge à froid des batteries devrait diminuer avec l'amélioration de ces dernières. Comme ces progrès sont, à l'heure actuelle, très incertains, nous négligeons ces paramètres. La consommation des voitures électriques est considérée comme constante, seule variant la part de ces dernières dans le parc automobile.

### 3.3.1. Consommation des voitures

Pour établir la consommation moyenne des voitures, nous nous basons sur deux sources de données. Tout d'abord, le "Catalogue consommation 2009", édité par le Touring Club Suisse (TCS), nous fournit l'indice de consommation mixte (urbain / extra-urbain) indiqué par le constructeur, pour chaque modèle de voiture homologué en Suisse, ainsi que la consommation urbaine et non urbaine de la plupart de ces mêmes modèles (TCS, 2009). En second lieu, nous nous référons aux données de l'association des importateurs suisses d'automobiles pour connaître les parts de marché de chaque marque (état novembre 2009) (Auto-Suisse, 2009).

Pour commencer, nous segmentons, comme précédemment, le catalogue automobile en catégorie de carburant utilisé et cylindrée. Nous calculons, ensuite, la consommation moyenne par marque, pour chacun de nos segments, puis nous multiplions le résultat obtenu par les parts de marché respectives de chaque marque<sup>7</sup>. Pour terminer, nous pouvons calculer la moyenne de consommation des voitures, par segment, pondérée par le poids respectif de chaque marque dans ce segment.

Figure 16 : processus de calcul de la consommation moyenne des voitures



La catégorie "autres" regroupait, à l'origine, les voitures équipées pour rouler au gaz naturel (uniquement ou en combinaison avec l'éthanol) à l'éthanol / essence et les véhicules hybrides (batteries / moteur à combustion interne). Les véhicules roulant au gaz sont caractérisés par un niveau de consommation élevé (tout en sachant que la combustion du gaz produit moins de CO<sub>2</sub> que celle des combustibles issus du pétrole). De même, il est difficile de calculer les émissions des véhicules roulant à l'éthanol (quel pourcentage des prestations est effectivement réalisé avec ce combustible). Pour ces raisons, nous avons décidé de ne retenir, dans la catégorie "autres", que la consommation

Tableau 13 : consommation moyenne du parc automobile 2009

	< 1.4 l.	1.4 - 2.0 l.	> 2.0 l.
Diesel	4.487	5.793	7.891
Essence	5.948	7.516	10.115
Autres			4.400

<sup>7</sup> Comme nous ne connaissons ces parts que pour l'ensemble du parc et non par segment, nous postulons que celles-ci sont identiques dans chaque segment, pour toute marque présentant au moins un modèle dans le segment en question. Cette façon de procéder introduit fatalement un léger biais, chaque constructeur n'étant pas, en réalité, également représenté dans chaque segment. Nous décidons d'ignorer ce biais, estimant que son effet sur la globalité des résultats serait faible.

des voitures hybrides, afin de faciliter la comparaison avec les voitures électriques. De la même façon, afin de ne pas, par trop, avantager ces dernières, nous n'avons retenu que la consommation moyenne des voitures hybrides de cylindrées petites et moyennes. En effet, dans les gros véhicules, les moteurs hybrides sont, le plus souvent, utilisés afin d'en augmenter la puissance et non d'en réduire la consommation.

Pour cette raison, la consommation moyenne des gros véhicules hybrides est plus élevée que celle des autres motorisations (y compris essence). L'hybridation des moteurs des petites et moyennes voitures nous apparaît, dès lors, plus dans l'esprit prévalant en ce qui concerne les voitures électriques et, par conséquent, plus comparable avec elles. Pour cette raison, les véhicules hybrides n'auront qu'un seul indice de consommation moyenne. Le tableau 14 indique les indices obtenus pour l'année 2009, selon les données constructeurs, en trafic mixte urbain / extra-urbain.

### 3.3.2. Consommation des voitures électriques

Les voitures électriques ne consomment pas directement de carburants fossiles. Leur consommation est, par conséquent, souvent exprimée en tonnes équivalent pétrole. Comme nous nous intéressons à "leurs" émissions de CO<sub>2</sub>, nous exprimons ici leur consommation d'énergie en Watts x heure par kilomètre (Wh/km). Une fois le mix électrique utilisé pour charger leurs batteries connu, il est aisé de convertir cette consommation en masse de CO<sub>2</sub>.

Nous prenons ici en compte une moyenne de 130 Wh/km, tirée des données du tableau 7. De fait, la consommation affichée des voitures électriques étant très variable et ces dernières n'étant pas encore, pour la plupart, en circulation, il est très difficile d'estimer leur consommation réelle d'électricité. Nous majorerons ce chiffre de 130 Wh/km de 30 % afin de tenir compte des pertes de charge et décharge des batteries. Celles-ci peuvent, en effet, représenter jusqu'à 37 % de la consommation électrique des voitures (Gilbert & Perl, 2008, p. 155). Nos calculs seront, par conséquent, basés sur une consommation d'électricité des voitures de 170 Wh/km, **soit 17 kWh/100 km**. Là encore, nous considérerons cette consommation comme fixe, les progrès à venir en la matière étant impossibles à anticiper. Par ailleurs, nous adoptons un coefficient de consommation unique, quelles que soient les conditions de circulation. Premièrement, les voitures électriques se montrent particulièrement à l'aise à bas régime, à froid et dans des conditions de circulation caractérisées par des arrêts et redémarrages fréquents. Deuxièmement, la consommation de ce type de voiture augmente rapidement à partir d'une certaine vitesse (raison pour laquelle la vitesse de pointe de toutes les voitures électriques est bridée). Ces deux caractéristiques font que la différenciation entre milieu urbain et extra-urbain ne nous apparaît pas pertinente pour les voitures électriques, contrairement à la situation prévalant pour les véhicules traditionnels.

### 3.3.3. Trafic urbain et extra urbain

Concernant les indices de consommation en milieux urbains et extra-urbains, nous calculons, selon les données du catalogue consommation 2009 du TCS (TCS, 2009), une sous-consommation allant de -15 % à -24 % en milieu extra-urbain. Inversement, la surconsommation en milieu urbain va de +24 % à +38 % (tableau 15) :

Tableau 14 : diminution / augmentation de la consommation en milieu extra-urbain / urbain par rapport à la consommation mixte

	<i>Diesel</i>		<i>Essence</i>		<i>Autres</i>	
< 1.4 l.	-15 %	24 %	-17 %	29 %	-17 %	35 %
1.4 - 2.0 l.	-16 %	30 %	-20 %	35 %	-27 %	38 %
> 2.0 l.	-21 %	24 %	-24 %	38 %	-24 %	42 %

Nous appliquons, par conséquent, les minorations / majorations en question aux indices de consommation calculés précédemment, sous réserves des modifications précisées au point suivant. Concernant la catégorie "Autres", pour les mêmes raisons que celles invoquées plus haut (prise en compte uniquement des véhicules hybrides de petites et moyennes cylindrées), nous appliquons les taux des véhicules diesel de cylindrée inférieure à 1.4 l.

### 3.3.4. Consommation officielle et consommation réelle

Jusqu'en 1999, la consommation "mixte" affichée par le constructeur correspondait, grosso-modo, à la consommation en conditions réelles. Or, depuis, l'écart s'est creusé entre la consommation officielle et réelle, notamment en ce qui concerne les petites voitures, à faible consommation (5 l/100 km), jusqu'à atteindre une surconsommation de 0.5 à 1 l aux 100 km (TCS, 2009, p. 26). Cette différence est due au fait qu'en conditions réelles, les voitures sont plus chargées (100 kg de charge supplémentaire engendrent 0.5 l de consommation supplémentaire sur 100 km). De plus, les équipements annexes (phares, autoradio, climatisation, etc.) augmentent encore la consommation, tout comme les conditions de circulation et le style de conduite. Au final, les valeurs affichées, pour la conduite en milieu urbain, des voitures à basse consommation correspondent plus à la consommation réelle que les valeurs pour trafic mixte.

Nous majorons, par conséquent, la consommation des voitures, après soustraction / addition des différences de consommation indiquées au point précédent, de la manière suivante :

- **+0.5 l aux 100 km pour la circulation en milieu extra-urbain;**
- **+0.75 l aux 100 km pour les voitures de cylindrée supérieure à 1.4 l en milieu urbain**

- **+1 l aux 100 km pour les voitures de cylindrée inférieure à 1.4 l en milieu urbain.**

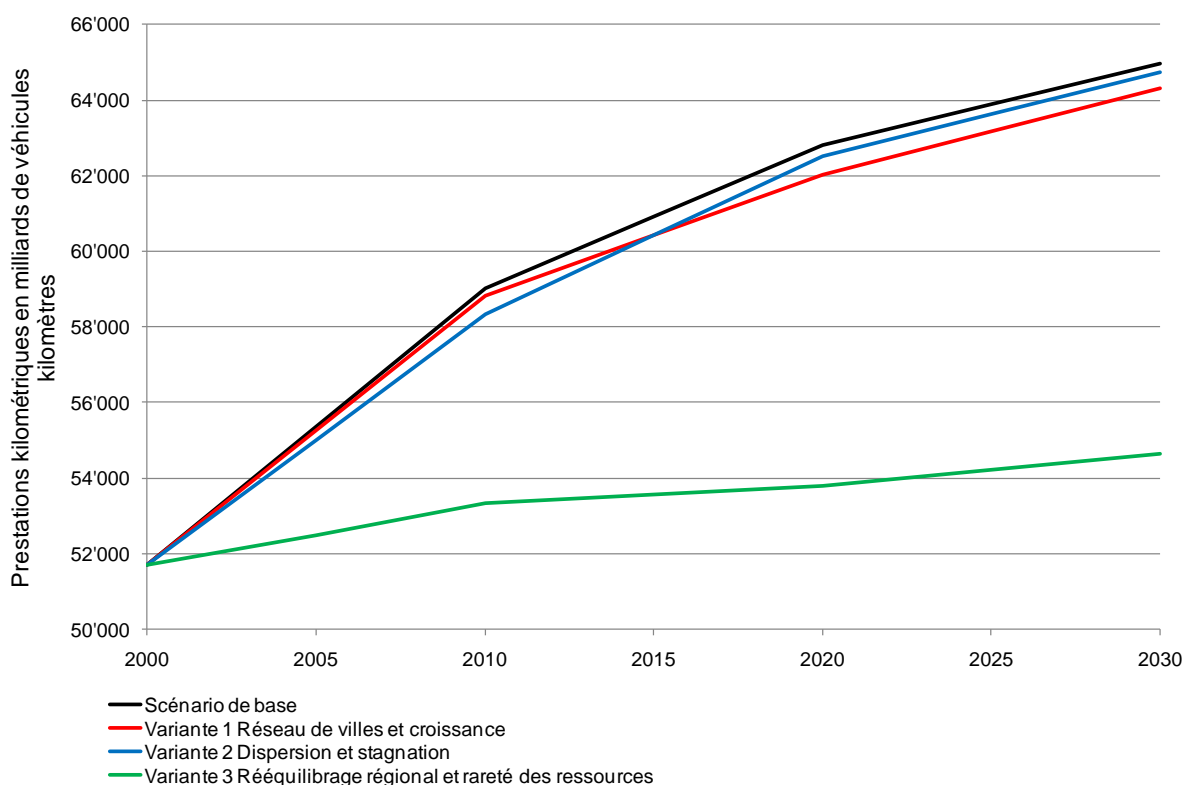
Nous considérons, par ailleurs, ces indices comme fixes à travers le temps.

## 4. Evolution des prestations kilométriques

Dans son rapport de 2006 sur les prévisions du transport de personnes à l'horizon 2030, l'ARE prévoit une augmentation du trafic en voyageurs-kilomètres comprise entre 15 % et 29 % (23.7 % dans le scénario de base). Concernant le trafic pendulaire, l'augmentation ne serait que de 0.5 % par an (scénario de base) (ARE, 2006, p. XVIII). Le taux d'occupation des véhicules étant appelé à reculer légèrement, les prestations kilométriques des voitures sont appelées à augmenter davantage. Outre le scénario de base, trois variantes supplémentaires existent :

- variante 1 : réseau de ville et croissance;
- variante 2 : dispersion et stagnation;
- variante 3 : rééquilibrage régional et rareté des ressources.

Figure 17 : évolution des prestations kilométriques jusqu'en 2030 (ARE, 2006)



Ces variantes au scénario de base sont fonction de plusieurs paramètres :

- évolution démographique;
- contexte économique;
- systèmes et cycles de valeurs sociaux (modes de vie);

- politique suisse et européenne des transports;
- organisation du territoire;
- évolution technologique des transports (ARE, 2006, p. XVI).

Figure 18 : description des scénarii de l'ARE (ARE, 2006, p. XVII)

	Scénario de base	Scénario no 1 « Réseau de villes et croissance »	Scénario no 2 « Dispersion et Stagnation »	Scénario no 3 « Rééquilibrage régional et rareté des ressources »
<b>Conditions économiques</b>				
Evolution économique	Prévisions de base selon seco : PIB 2002 à 2030 : +1% par an	Scénario de base + 50%, c'est-à-dire 1,5% par an	Scénario de base - 50%, c'est-à-dire 0,5% par an	Scénario de base
UE-Suisse	Poursuite des accords bilatéraux, mais pas d'adhésion avant 2030		Rythme de rapprochement ralenti	Scénario de base
Prix des ressources énergétiques (prix du brut)	Prix comparativement bas à long terme, légère hausse entre 2015 et 2030			Doublement par rapport au scénario de base d'ici 2015, quadruplement entre 2015 et 2030
<b>Evolution démographique et sociale</b>				
Evolution démographique	Croissance démographique faible (+4,7% entre 2000 et 2030, scénario « tendance » OFS : taux de croissance démographique à la baisse)			
Structure de la population	Population vieillissante (scénario « tendance » OFS : hausse du taux de dépendance des personnes âgées, baisse du taux de dépendance des jeunes)			
Modes de vie	Poursuite de l'individualisation, société de loisirs, flexibilisation des horaires de travail	Revalorisation des valeurs urbaines (culture, formation), ouverture	Scénario de base	Comportement de consommation et de loisirs plus respectueux des ressources
<b>Organisation du territoire</b>				
Répartition de la population, structure du milieu bâti	« Une Suisse des métropoles » (Rapport 2005 sur le développement territorial, ARE)	« Une Suisse polycentrique et urbaine » (réseau de villes)	« Dispersion et éclatement » (déclin urbain)	« Une Suisse des régions » (solidarité territoriale)
Politique d'aménagement du territoire	Pas de redistribution significative des compétences entre Confédération, cantons, communes	Renforcement des planifications d'ordre supérieur (canton, Confédération)	Mise en œuvre peu rigoureuse des planifications d'ordre supérieur	Renforcement des planifications d'ordre supérieur (canton, Confédération)
<b>Politique des transports</b>				
Extension des infrastructures	Achèvement du réseau autoroutier, grands projets TP selon FTP retardés, compléments avant tout dans les agglomérations	Montant des investissements supérieur à celui du scénario de base, priorité aux TP	Montant des investissements inférieur à celui du scénario de base, au détriment des TP	Montant des investissements identique à celui du scénario de base, priorité aux TP et à la locomotion douce
Evolution de l'offre de TP	Accroissement réduit de l'offre par rapport aux 20 dernières années	Extension massive de l'offre dans le trafic d'agglomération et à grande distance	Stagnation du trafic à grande distance et d'agglomération ; réduction de la desserte de base dans l'espace rural	Légèrement supérieure à celle du scénario de base
Prix	Le coût des transports routiers reste bas, internalisation des coûts externes, pas d'instruments d'incitation appliqués à l'ensemble du pays	Renchérissement du transport routier par rapport au transport ferroviaire par des taxes fiscales (taxe sur le CO <sub>2</sub> , taxes sur les carburants)	Scénario de base	Introduction de nouvelles taxes d'incitation en prévision de l'évolution attendue du prix du pétrole brut (importantes jusqu'à 2015, puis en diminution)
<b>Technologies</b>				
Technologies énergétiques et de systèmes d'entraînement	Optimisation des systèmes d'entraînement conventionnels	Légère accélération du développement des systèmes d'entraînement de recharge	Scénario de base	Les systèmes d'entraînement de recharge et les technologies à haute efficacité gagnent en importance.

Les scénarii de l'ARE nous permettent de déterminer le pourcentage de variation des prestations kilométriques des véhicules par périodes de cinq ans depuis l'an 2000. Le MRT 2005 nous fournit les prestations kilométriques effectuée en 2005 par les véhicules des ménages sondés. En reportant ces prestations à la dimension du parc automobile de l'agglomération, nous pouvons, ainsi, calculer le niveau des prestations pour chaque période de cinq ans jusqu'en 2030<sup>8</sup>.

<sup>8</sup> Nous considérons les variations annuelles comme constantes dans chaque période de cinq ans. De plus, les variations des prestations kilométriques pronostiquées pour l'ensemble du parc automobile suisse sont reportées, sans modification, sur celui de l'agglomération franco-valdo-genevoise.



## 4.1. Répartition sur le réseau routier

La dernière opération à réaliser avant de pouvoir passer au calcul des émissions de CO<sub>2</sub> proprement dite consiste à répartir les kilomètres parcourus sur le réseau routier. Pour ce faire, nous utilisons les données du MRT 2005. Nous commençons par attribuer une typologie à chaque point de départ et d'arrivée d'une étape en divisant l'agglomération en 13 zones :

- |                          |                       |                       |
|--------------------------|-----------------------|-----------------------|
| 1. Centre-rive gauche    | 2. Centre-rive droite | 3. Agglomération nord |
| 4. Agglomération sud     | 5. Agglomération est  | 6. Campagne-lac       |
| 7. Champagne             | 8. Mandement          | 9. Meyrin-aéroport    |
| 10. Versoix-Terre sainte | 11. Nyon              | 12. Rolle             |
| 13. Hors agglomération   |                       |                       |

Dans un second temps, nous divisons chaque étape en trajet "urbain" et "extra-urbain". Les zones urbaines retenues sont les villes de Genève et de Nyon. Nous appliquons à ces villes des rayons urbains de, respectivement, quatre kilomètres et un kilomètre depuis le centre. Nous pouvons, dès lors, utiliser les routines suivantes :

- une étape interne aux villes de Genève ou de Nyon est entièrement urbaine;
- entre la ville de Genève et une zone périurbaine, ou inversement, les 4 premiers km sont urbains, le reste de l'étape est extra-urbaine (une étape de moins de 4 km est donc entièrement urbaine);
- entre la ville de Nyon et le reste de l'agglomération, ou inversement, le 1er km est urbain;
- entre les villes de Genève et de Nyon, 5 km sont urbains;
- entre la zone 6 et les zones 9, 10, 11 ou 13, ou inversement, 8 km sont urbains (les automobilistes doivent traverser la ville de Genève);
- les autres étapes sont entièrement extra-urbaines.

Cette méthode nous permet de calculer la proportion de la longueur des étapes en milieu urbain ou extra-urbain. Les étapes ayant pour objet la recherche d'une place de parking sont ajoutée aux trajets urbains, dans la proportion de chaque motif de trajet (travail, achats, loisirs), bien que les pendulaires aient, en réalité, plus fréquemment une place réservée à leur lieu de destination. En procédant de la sorte, nous obtenons les répartitions suivantes :

Tableau 15 : répartition des prestations kilométriques dans l'agglomération franco-valdo-genevoise

	<i>Travail</i>	<i>Achats</i>	<i>Loisirs</i>	<i>Total</i>
<i>Prestation kilométriques en zones urbaines (en % des prestations)</i>	24.86	31.18	14.58	21.27
<i>Prestations kilométriques en zones extra-urbaines (en % des prestations)</i>	75.14	68.82	85.42	78.73

## 5. Emissions de CO<sub>2</sub>

### 5.1. Coefficients d'émissions

L'agence internationale de l'énergie (AIE) donne une estimation des rendements des phases de conversion des différentes sources d'énergie primaire. Bien que la production suisse d'électricité soit essentiellement d'origine hydraulique et nucléaire, nous nous intéressons, également, au rendement des centrales thermiques à charbon et au fioul. Non pas parce que la Suisse produit une grande quantité d'électricité dans des centrales thermiques, mais parce que ce mode de production d'électricité est fréquent dans les pays voisins (Allemagne notamment), où la Suisse se fournit partiellement en électricité. Ce rendement est, également, valable pour la production du carburant des véhicules à moteur à combustion interne.

De plus, afin de contrer la probable pénurie d'électricité en Suisse, programmée pour 2020, la construction de turbines à gaz, est envisagée, c'est pourquoi nous considérons également le gaz naturel. Ces centrales sont sensées, de manière provisoire, produire l'électricité nécessaire pour assurer la "souveraineté électrique" de la Suisse, un développement supplémentaire des énergies nucléaires et hydroélectriques semblant difficile, voire impossible, pour des raisons d'acceptation populaire.

Le tableau suivant décrit les rendements par phase :

Tableau 16 : rendement énergétique des phases de conversion et de transport de l'énergie (AIE, 1994, p. 155) (OFEN, 2007)

<b>Phase</b>	<b>Rendement (%)</b>
<i>Récupération du pétrole brut</i>	96.9
<i>Transport du pétrole brut</i>	98.9
<i>Raffinage du pétrole brut (essence)</i>	87.4
<i>Raffinage du pétrole brut (fioul)</i>	95.2
<i>Transport de l'essence</i>	99.2
<i>Transport du fioul</i>	99.3
<i>Extraction et collecte du gaz naturel</i>	93.7
<i>Transport du gaz naturel</i>	96.3
<i>Production d'électricité (centrale à cycle combiné au gaz naturel, en Suisse)</i>	58-60
<i>Extraction du charbon</i>	98.1
<i>Transport du charbon</i>	99.3

La combustion d'un litre d'essence et de diesel produit, selon les sources, respectivement 2.26 et 2.73 kg de CO<sub>2</sub> (Environnement Canada), ou encore, 2.34 / 2.61 kg (OFEV, 2006). Nous utilisons, ici, les chiffres de l'office fédéral de l'environnement.

### 5.1.1. Cycles de démarrages à froid et arrêts

Une fois calculé les coefficients d'émissions de CO<sub>2</sub>, nous pouvons ajouter les émissions supplémentaires dues aux démarrages des voitures (surconsommation due au moteur froid) et aux arrêts (évaporation). Nous utilisons les chiffres fournis par l'OFEFP pour la période allant de 1980 à 2030 (émissions supplémentaires par cycle et nombre de cycles par véhicule et par jour) (OFEFP, 2004). Pour les années précédant 1980, nous majorons chaque année de l'inverse de la diminution moyenne annuelle constatée entre 1980 et 1985. Ces chiffres sont donnés en grammes de CO<sub>2</sub> émis par cycle de démarrage et d'arrêt des voitures et ne sont pas segmentés par type de carburant. Par conséquent, nous les ajoutons simplement aux émissions calculées par trajet, en fonction du nombre d'étapes de ceux-ci nécessitant un cycle démarrage / arrêt.

### 5.1.2. Emissions de CO<sub>2</sub> par kWh consommé en Suisse

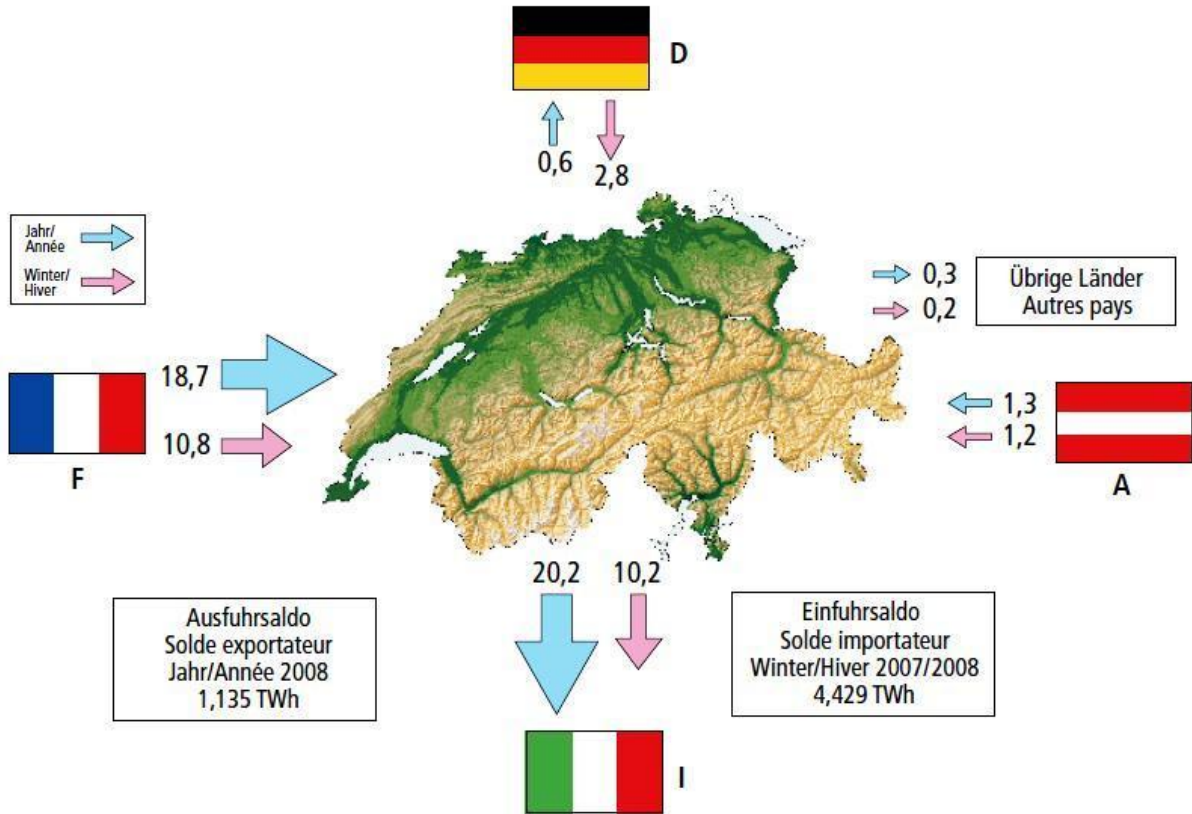
La Suisse est globalement exportatrice d'électricité sur une année et importatrice durant les mois d'hiver, la France étant sa principale pourvoyeuse de courant. De par l'importance de l'énergie nucléaire dans le mix électrique de ce pays, la France émet très peu de CO<sub>2</sub> pour sa production d'électricité.

Tableau 17 : émissions de CO<sub>2</sub> des fournisseurs d'électricité de la Suisse (g / kWh) (Econologie.com)

<b>France</b>	<b>Allemagne</b>	<b>Autriche</b>
90	600	200

L'Allemagne, au contraire, possède un important parc de centrales thermiques fonctionnant au charbon. Le bilan carbone de sa production électrique s'en ressent, dès lors, fortement.

Figure 19 : importation / exportation d'électricité par pays en 2008 et durant l'hiver 2007-2008 (OFEN, 2009, p. 5)



Dans le cas de la production indigène suisse d'électricité, la part de l'énergie hydroélectrique prévaut largement, suivie par l'énergie nucléaire. L'ensemble des autres modes de production représente moins de 5 % de la production totale. En ne considérant que les émissions de CO<sub>2</sub> causées par la transformation de l'énergie primaire en électricité, les énergies hydraulique et nucléaire sont à "émissions 0".

Concernant la part restante, nous considérerons que celle-ci provient de turbines à gaz à cycle combiné. Premièrement, la construction de ce type de centrales est envisagée. En second lieu, les centrales thermiques au fioul sont appelées, à l'avenir, à disparaître du mix électrique suisse. Pour terminer, la part des énergies renouvelables devrait croître sans, toutefois, représenter une proportion significative par rapport aux autres modes de production. Pour ces trois raisons, nous considérons que la production d'électricité par des turbines à gaz, moitié moins émettrices que les centrales au fioul, mais beaucoup plus que les énergies renouvelables, peut constituer une estimation acceptable de la production marginale d'électricité en Suisse.

Figure 20 : part des différentes sources d'énergie dans la production suisse d'électricité (OFEN, 2009, p. 3)

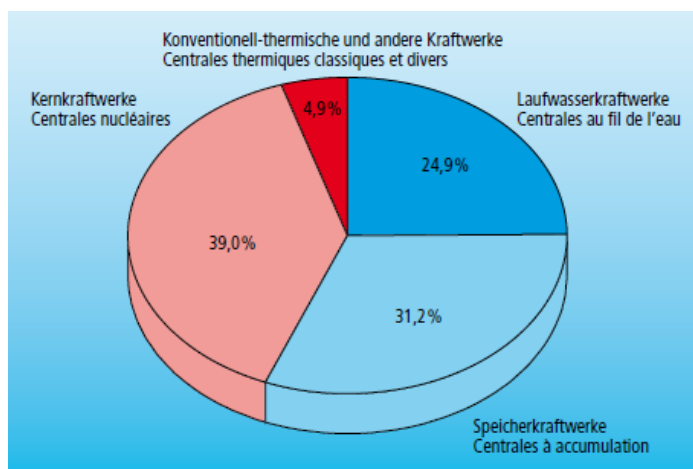


Tableau 18 : émissions de CO2 par kWh produit (SFEN)

<i>Mode de production</i>	<i>Hydraulique</i>	<i>Nucléaire</i>	<i>Turbine à Gaz</i>	<i>Fuel</i>	<i>Charbon</i>	<i>Renouvelables</i>
<i>Emissions (en g de CO<sub>2</sub>)</i>	4	6	427	891	978	3-150*
<i>Emissions (transformation)**</i>	0	0	385	807	941	0

\* de 3 g minimum pour l'éolien à 150 g max. pour le photovoltaïque

\*\* selon données du tableau 3

Nous ne pouvons déterminer avec exactitude la part de la production suisse qui sera consommée par les voitures électrique. En théorie, celle-ci pourrait subvenir à 100 % des besoins en la matière. Nous nous basons ici sur une moyenne générale. La Suisse à produit, en 2008, 64'414 GWh d'électricité, dont 4.9 % par des modes de production générateurs de CO<sub>2</sub>. A côté de sa propre production, elle a importé 49'793 GWh supplémentaires. L'électricité importée provient à 73 % de France, 19 % d'Allemagne et 8 % d'Autriche. Le solde importateur (mois d'hiver) est de 4'429 GWh. En gardant cette proportion pour l'année et en considérant le solde importateur comme la proportion d'électricité importée consommée, le taux d'énergie importée est de 6 %, avec un coefficient d'émissions de CO<sub>2</sub> de 195 g/kWh. Pour la production indigène, ce dernier est de 19 g/kWh. Ainsi, **l'électricité consommée par les voitures électriques représente, dans cette étude, 30 grammes de CO<sub>2</sub> par kWh.**

## IMPACT DES VOITURES ÉLECTRIQUES

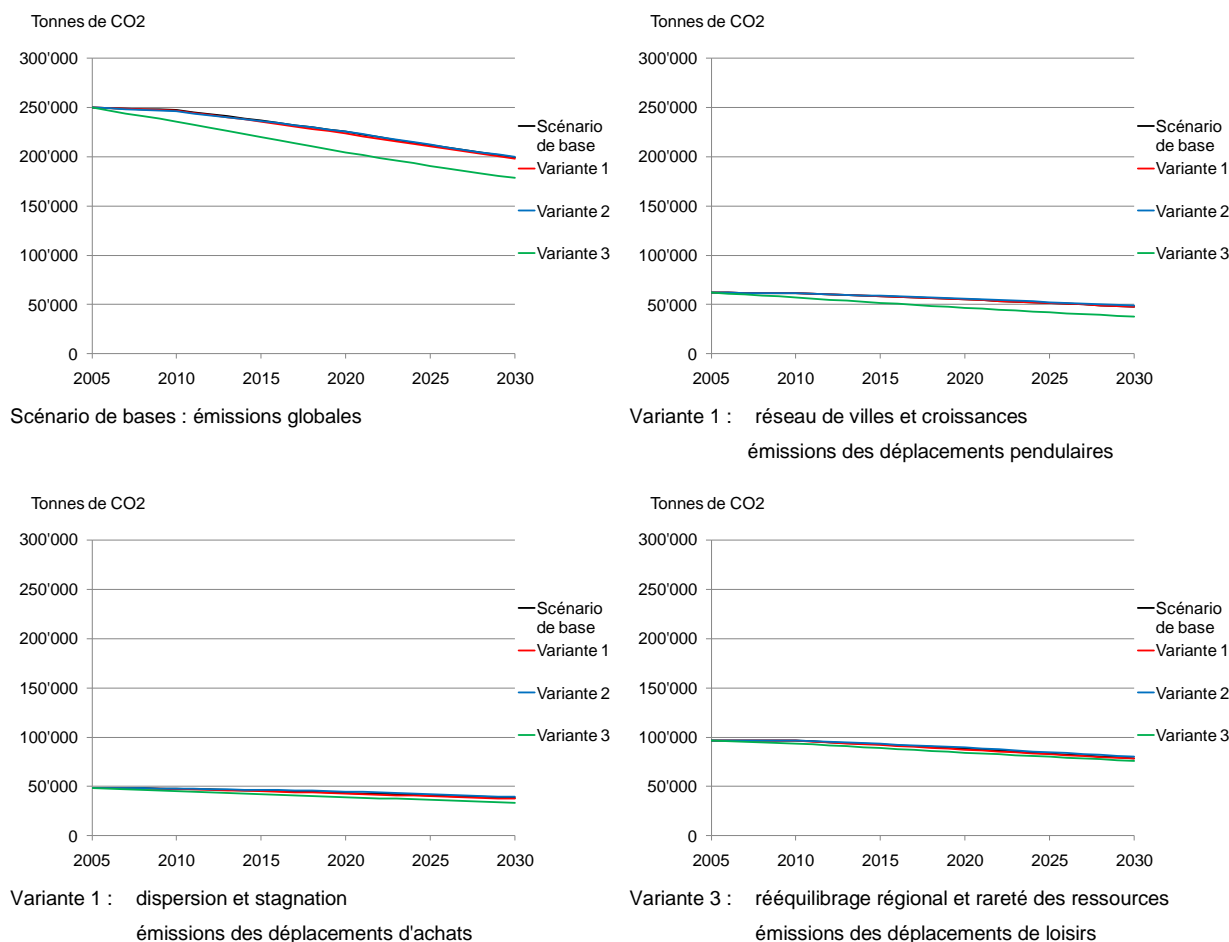
Les différents scénarii d'évolution des prestations kilométriques de l'ARE ont été décrits précédemment. Nous avons, pour notre part, établi des scénarii de pénétration des voitures électriques dans le parc automobile de l'agglomération. Afin d'éviter les confusions, à partir d'ici, le terme "scénario" désignera ceux de l'ARE. Quand nous parlerons des nôtres, nous emploierons le terme "modèle".

Ces modèles sont les suivants :

- modèle Renault : les ventes de voitures électriques représentent 10 % des ventes de voitures neuves en 2020;
- modèle encouragement politique marqué : les voitures électriques représentent 30 % du parc automobile en 2030;
- modèle intermédiaire : les voitures électriques représentent 10 % du parc automobile en 2020;
- modèle alternatif : similaire au modèle encouragement politique marqué, à la différence que, cette fois, ce sont les voitures hybrides qui représentent 30 % du parc automobile en 2030 (pas d'introduction de voitures électriques).

En croisant les prévisions de croissance des prestations kilométriques de l'ARE (point 4, partie 3) avec notre système de calcul des émissions de CO<sub>2</sub>, sans introduction de voitures électriques ou hybrides dans le parc automobile, nous pouvons constater que les émissions sont appelées à reculer dans l'agglomération franco-valdo-genevoise, de 249'613 tonnes en 2005 à 199'227 tonnes en 2030, soit une diminution de 20 % par rapport aux émissions de 2005. Cette diminution concerne tous les motifs de déplacements retenus ici. Les taux de réduction les plus faibles observés sont ceux de la mobilité de "loisirs", ces derniers allant de 21.32 % (variante 3) à 16.93 % (variante 2). La baisse observée dans les déplacements pendulaires est plus importante dans les variantes 2 et 3, en 2020 comme en 2030.

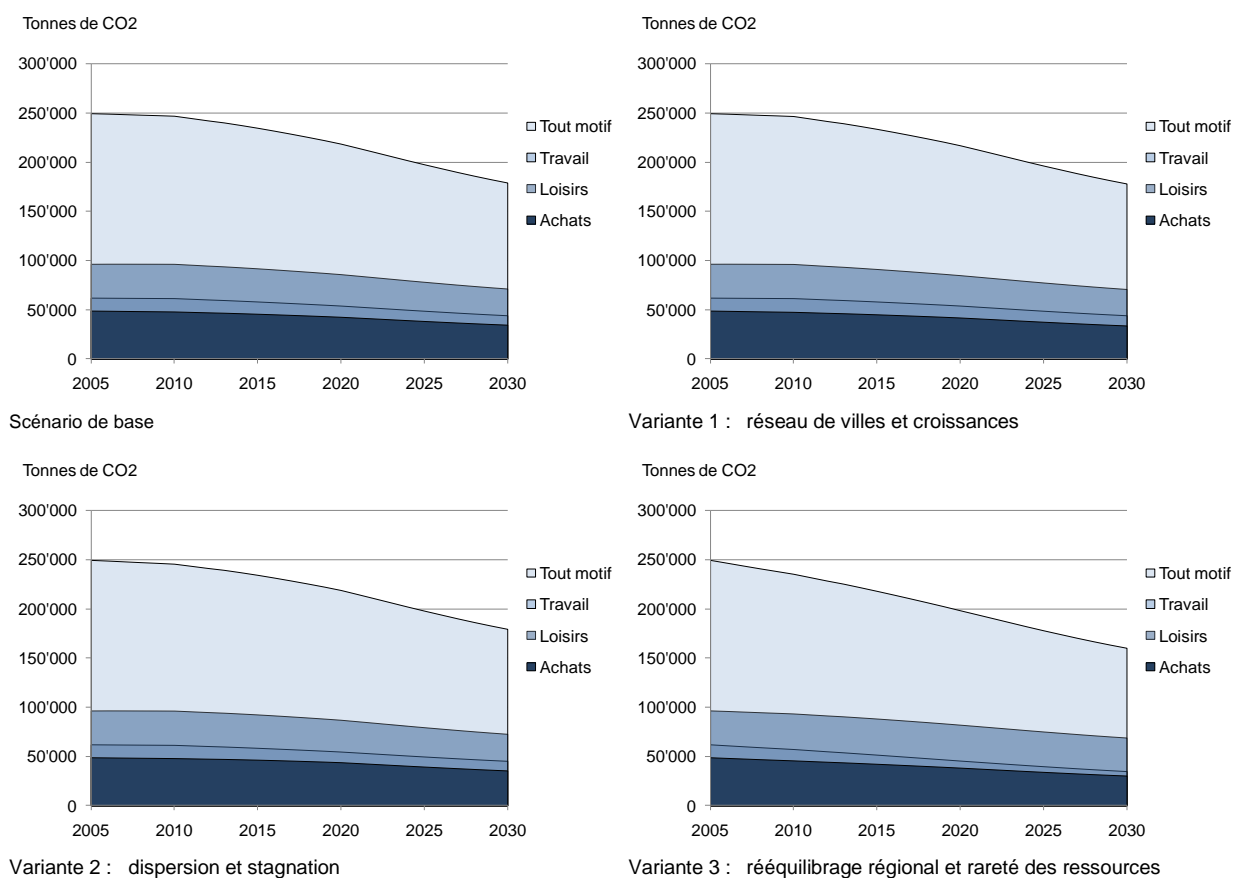
Figure 21 : évolution des émissions de CO<sub>2</sub> des voitures de tourisme sans électrification du parc, selon les scénarii de l'ARE



## 6. Modèle Renault

Le chiffre de 10 % de voitures neuves électriques en 2020 correspond aux prévisions du constructeur automobile Renault. Nous avons, par conséquent, retenu ce chiffre en premier lieu. Dans ce modèle, nous appliquons une introduction progressive de 1 % par année à partir de 2011, pour atteindre 10 % des ventes en 2020. Par la suite, les ventes de voitures électriques progressent encore quelques années pour, finalement, se stabiliser à 15 % en 2030. Dans ce modèle, les voitures électriques représenteraient 3 % du parc automobile en 2020 et 11 % en 2030.

Figure 22 : évolution des émissions de CO<sub>2</sub> des voitures de tourisme avec électrification du parc à hauteur de 10 % des ventes de voitures neuves en 2020 (modèle Renault)



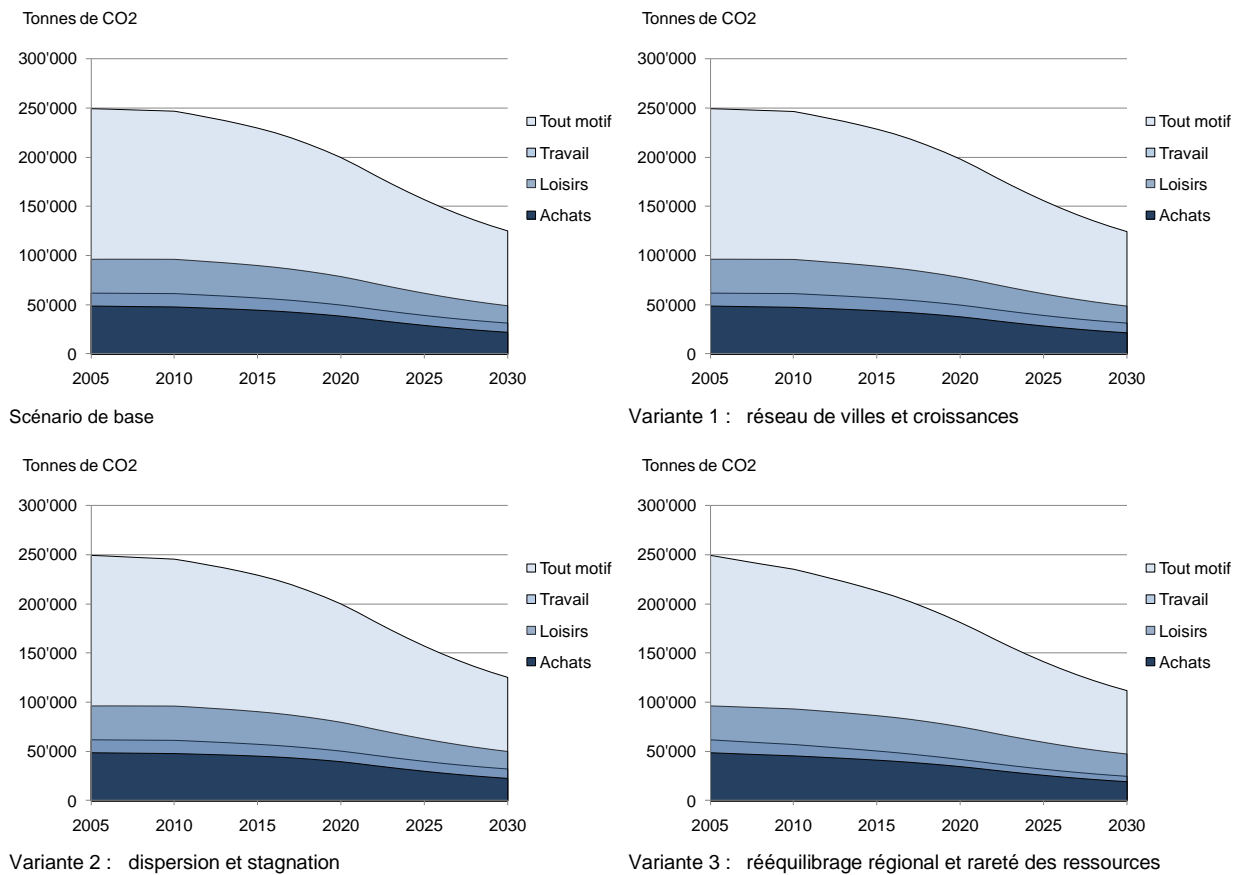
Ce premier modèle se traduit par une baisse des émissions de CO<sub>2</sub> allant de 10 % (variante 2, motif "achats") à 27 % (variante 3, motif "travail") en 2020, respectivement 27 % à 44 % en 2030 (voire annexe 1 pour tous les chiffres de réduction des émissions, en tonnes de CO<sub>2</sub> et en % par année par rapport à 2005). Les émissions des déplacements de "loisirs" baissent de 11 % en 2020 dans le scénario de base et de 15 % dans la variante 3. La baisse des émissions des déplacements pendulaires en 2020 est légèrement supérieure à la baisse globale dans le scénario de base et la variante 3. Elle est, en revanche inférieure dans les mêmes proportions dans les variantes 1 et 2. En 2030, la baisse est également supérieure dans la variante 1.

## 7. Modèle encouragement politique marqué

Dans ce modèle, la politique des transports menée dans l'agglomération encourage au maximum l'acquisition et l'utilisation de voitures électrique (réservation des places de stationnement, fermeture du centre aux autres véhicules, fiscalité, etc.). L'efficacité de ces mesures est telle qu'en 2030, les voitures électriques représentent 30 % du parc automobile de l'agglomération. Atteindre cette proportion signifie que les voitures électriques représentent 40 % des ventes de voitures neuves dès l'année 2022, avec augmentation progressive depuis 2011 et stagnation ensuite.



Figure 23 : évolution des émissions de CO<sub>2</sub> des voitures de tourisme avec électrification du parc à hauteur de 30 % en 2030 (modèle encouragement politique marqué)



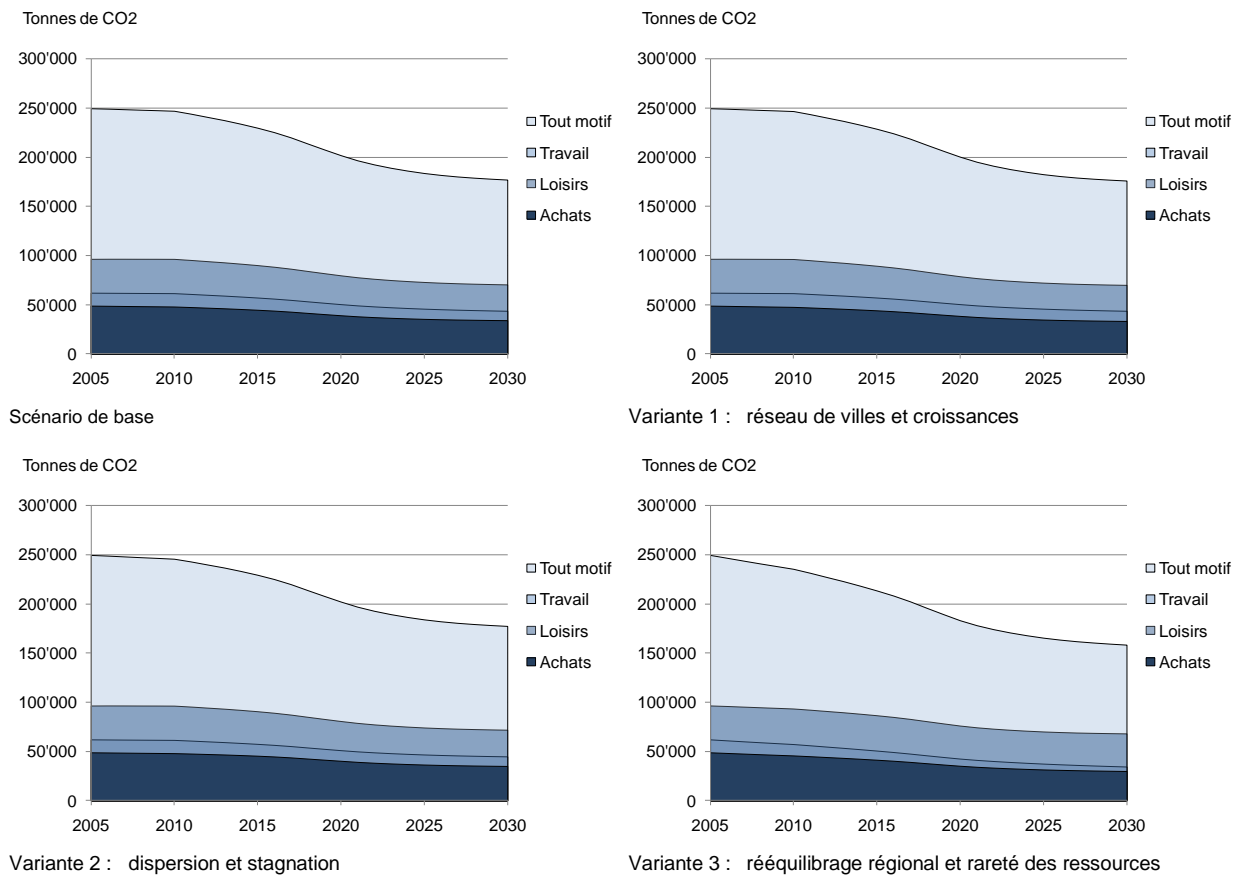
La baisse des émissions de CO<sub>2</sub> est massive dans ce modèle, quelle que soit la variante de l'ARE retenue. Les émissions des déplacements de "loisirs" reculent de 18.24 % en 2020 dans le scénario de base par rapport à 2005 alors que le recul global (tous motifs confondus) en 2030 flirte avec la barre des 50 % (annexe 2), soit 125'351 tonnes de CO<sub>2</sub> émises en 2030 contre 249'613 tonnes en 2005 (scénario de base). La baisse des émissions des déplacements pendulaires en 2020 est sensiblement supérieure à la baisse globale dans la variante 3 et légèrement dans les variantes 1 et 2. On ne constate que peu de différence dans le scénario de base. Les baisses observées sont, en revanche, inférieures à celles des déplacements d'"achats", sauf dans la variante 3. Les différences sont identiques en 2030, excepté que, dans la variante 3, la baisse devient plus importante pour les déplacements d'"achats".

## 8. Modèle intermédiaire

Entre le modèle tendance des constructeurs automobile (modèle Renault) et le modèle extrême précédent, nous estimons, à présent, un cas intermédiaire. Ici, les voitures électriques ne représentent plus 10 % des ventes de voitures neuves mais 10 % du parc automobile dès 2020, avec stagnation et régression par la suite (pour cause de changement des habitudes modales, par exemple, rendant inutile la multi-motorisation, et par conséquent, les voitures électriques moins attractives). Dans un tel cas de figure, les ventes progressent presque aussi rapidement, à partir de 2011, que dans le modèle

"encouragement politique marqué", mais connaissent une chute brutale ensuite, jusqu'à ne plus représenter que 5 % des ventes de voitures neuves en 2030.

Figure 24 : évolution des émissions de CO<sub>2</sub> des voitures de tourisme avec électrification du parc de 10 % en 2020 puis régression

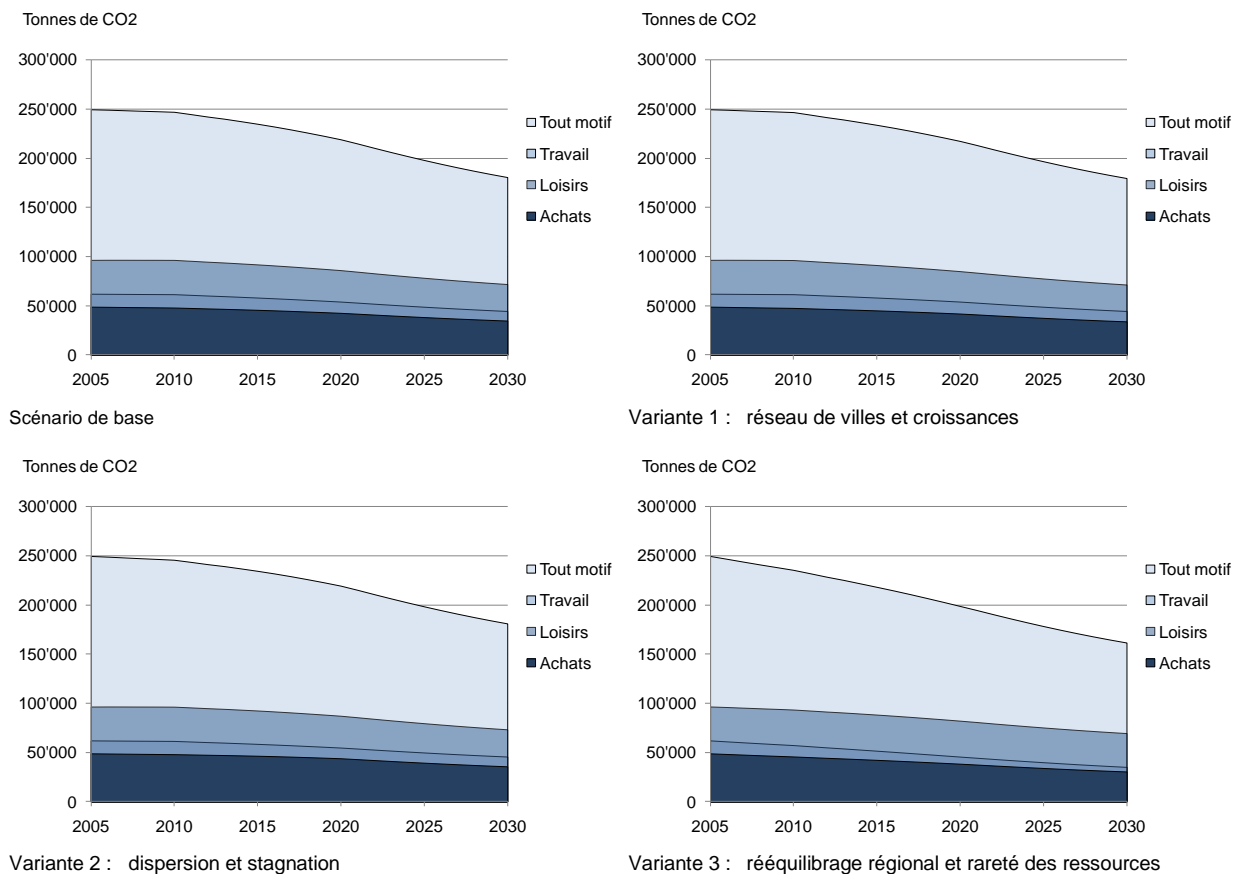


Dans le présent modèle, nous enregistrons une baisse des émissions de CO<sub>2</sub> d'environ 19 % en 2020, en globalité comme pour les motifs "travail" et "achats". Les émissions des déplacements de "loisirs" décroissent de 17 % (scénario de base). En 2030, la baisse globale des émissions est de 29 % (-26.93 % pour les loisirs). Ici encore, la baisse observée pour le motif "travail" est moins importante que pour les "achats", sauf dans la variante 3, en 2020 comme en 2030. Dans la variante 2, la baisse en 2020 est très légèrement supérieure pour le motif "travail". Cette tendance se retourne en 2030.

## 9. Modèle alternatif

Nous reprenons ici le même schéma de ventes que dans le modèle "encouragement politique marqué". A la différence près que dans le cas présent, ce sont les voitures hybrides qui envahissent le marché, jusqu'à représenter 30 % du parc en 2030, et non plus les voitures électriques.

Figure 25 : 30 % du parc automobile hybride en 2030, échec des voitures électriques



Ici, la réduction des émissions de CO<sub>2</sub> atteint, dans le scénario de base, 12.23 % des émissions totales en 2020 et 12.9 % des émissions des pendulaires (respectivement, 27.61 % et 28.29 % en 2030). En 2020, la baisse des émissions de CO<sub>2</sub> est supérieure pour les déplacements pendulaires par rapport au motif "achats", sauf dans la variante 1. En 2030, elle n'est supérieure que dans la variante 3. Dans ce modèle, les économies d'émissions en 2030 sont pratiquement deux fois moindres que dans le modèle "encouragement politique marqué". Il y a, toutefois, peu de chance que ce dernier modèle ne devienne réalité.

## 10. Récapitulation des résultats

Tableau 19 : évolution des émissions en 2020, en tonnes de CO<sub>2</sub>, en % par rapport à 2005, diminution supplémentaire par rapport à la tendance et tonnes de CO<sub>2</sub> économisées par rapport à la tendance, selon les modèles testés et les scénarii de l'ARE (Yves Steiner, 2009)

			Tendance			Renault			Encouragement politique marqué			Intermédiaire			Alternatif			
			Tonnes de CO <sub>2</sub> émises	Evolution depuis 2005, en %		Tonnes de CO <sub>2</sub> émises	Evolution depuis 2005, en %	Différence avec tendance, en %	Tonnes de CO <sub>2</sub> économisées	Tonnes de CO <sub>2</sub> émises	Evolution depuis 2005, en %	Différence avec tendance, en %	Tonnes de CO <sub>2</sub> économisées	Tonnes de CO <sub>2</sub> émises	Evolution depuis 2005, en %	Différence avec tendance, en %	Tonnes de CO <sub>2</sub> économisées	
Loisirs			Achats			Travail			Tout motif									
Variante 3	Variante 2	Scénario de base 1	Variante 3	Variante 2	Scénario de base 1	Variante 3	Variante 2	Scénario de base 1	Variante 3	Variante 2	Scénario de base 1	Variante 3	Variante 2	Scénario de base 1	Variante 3	Variante 2	Scénario de base 1	
84'310	89'497	87'325	88'400	87'325	88'400	39'328	44'980	42'925	43'661	46'576	55'951	55'226	55'226	55'226	204'242	225'448	223'402	225'108
-12.79	-7.43	-9.67	-8.56	-7.43	-9.67	-19.22	-7.62	-11.84	-10.33	-24.88	-9.76	-10.93	-10.93	-10.93	-18.18	-9.68	-10.50	-9.82
82'151	87'205	85'088	86'136	85'088	86'136	38'204	43'693	41'696	42'412	45'500	54'659	53'951	53'951	53'951	198'414	219'015	217'025	218'685
-15.03	-9.80	-11.99	-10.90	-9.80	-11.99	-21.53	-10.26	-14.36	-12.89	-26.61	-11.84	-12.98	-12.98	-12.98	-20.51	-12.26	-13.06	-12.39
-2.23	-2.37	-2.31	-2.34	-2.37	-2.31	-2.31	-2.64	-2.52	-2.56	-1.73	-2.08	-2.06	-2.06	-2.06	-2.33	-2.58	-2.55	-2.57
2'159	2'292	2'238	2'264	2'292	2'238	1'125	1'286	1'228	1'249	1'076	1'292	1'275	1'275	1'275	5'828	6'433	6'377	6'423
75'383	80'021	78'075	79'041	78'075	79'041	34'647	39'625	37'811	38'463	42'046	50'510	49'855	49'855	49'855	181'322	200'148	198'324	199'846
-22.03	-17.23	-19.24	-18.24	-17.23	-19.24	-28.84	-18.61	-22.34	-21.00	-32.18	-18.53	-19.59	-19.59	-19.59	-27.36	-19.82	-20.55	-19.94
-9.23	-9.80	-9.57	-9.68	-9.80	-9.57	-9.62	-11.00	-10.50	-10.67	-7.31	-8.78	-8.66	-8.66	-8.66	-9.18	-10.14	-10.05	-10.12
8'927	9'476	9'251	9'360	9'251	9'360	4'681	5'354	5'113	5'197	4'529	5'441	5'371	5'371	5'371	22'920	25'300	25'078	25'262
76'197	80'885	78'918	79'894	78'918	79'894	35'080	40'121	38'284	38'944	42'475	51'025	50'364	50'364	50'364	183'201	202'222	200'380	201'917
-21.18	-16.33	-18.37	-17.36	-16.33	-18.37	-27.95	-17.60	-21.37	-20.01	-31.49	-17.70	-18.77	-18.77	-18.77	-26.61	-18.99	-19.72	-19.11
-8.39	-8.91	-8.70	-8.80	-8.91	-8.70	-8.73	-9.98	-9.53	-9.69	-6.61	-7.95	-7.84	-7.84	-7.84	-8.43	-9.30	-9.22	-9.29
8'113	8'612	8'407	8'506	8'407	8'506	4'248	4'859	4'640	4'717	4'101	4'926	4'862	4'862	4'862	21'041	23'226	23'022	23'191
82'235	87'295	85'175	86'225	85'175	86'225	38'216	43'707	41'709	42'425	45'544	54'712	54'003	54'003	54'003	198'771	219'409	217'416	219'079
-14.94	-9.71	-11.90	-10.81	-9.71	-11.90	-21.51	-10.23	-14.33	-12.86	-26.54	-11.76	-12.90	-12.90	-12.90	-20.37	-12.10	-12.90	-12.23
-2.15	-2.28	-2.22	-2.25	-2.28	-2.22	-2.29	-2.61	-2.50	-2.54	-1.66	-2.00	-1.97	-1.97	-1.97	-2.19	-2.42	-2.40	-2.42
2'075	2'203	2'150	2'176	2'150	2'176	1'113	1'273	1'215	1'235	1'032	1'239	1'223	1'223	1'223	5'471	6'039	5'986	6'030

Tableau 20 : évolution des émissions en 2030, en tonnes de CO<sub>2</sub>, en % par rapport à 2005, diminution supplémentaire par rapport à la tendance et tonnes de CO<sub>2</sub> économisées par rapport à la tendance, selon les modèles testés et les scénarii de l'ARE (Yves Steiner, 2009)

			<b>Loisirs</b>			<b>Achats</b>			<b>Travail</b>			<b>Tout motif</b>			<b>Tendance</b>		<b>Renault</b>		<b>Encouragement politique marqué</b>		<b>Intermédiaire</b>		<b>Alternatif</b>	
															Tonnes de CO <sub>2</sub> émises	Evolution depuis 2005, en %	Tonnes de CO <sub>2</sub> émises	Evolution depuis 2005, en %	Différence avec tendance, en %	Tonnes de CO <sub>2</sub> économisées	Tonnes de CO <sub>2</sub> émises	Evolution depuis 2005, en %	Différence avec tendance, en %	Tonnes de CO <sub>2</sub> économisées
Variante 3	Variante 2	Scénario de base	Variante 3	Variante 2	Scénario de base	Variante 3	Variante 2	Scénario de base	Variante 3	Variante 2	Scénario de base	Variante 3	Variante 2	Scénario de base	Variante 3	Variante 2	Scénario de base	Variante 3	Variante 2	Scénario de base	Variante 3	Variante 2	Scénario de base	
76'070	80'309	78'195	78'756			33'656	39'436	37'498	38'390	48'014	48'014	48'014	48'014	178'199	199'624	198'138	199'227	178'199	199'624	198'138	199'227			
-21.32	-16.93	-19.12	-18.54			-30.87	-19.00	-22.98	-21.15	-22.56	-22.56	-22.56	-22.56	-28.61	-20.03	-20.62	-20.19	-28.61	-20.03	-20.62	-20.19			
69'059	72'907	70'987	71'497			30'187	35'371	33'630	34'433	44'104	44'104	44'104	44'104	160'259	179'527	178'187	179'170	160'259	179'527	178'187	179'170			
-28.57	-24.59	-26.57	-26.05			-38.00	-27.35	-30.93	-29.28	-28.87	-28.87	-28.87	-28.87	-35.80	-28.08	-28.61	-28.22	-35.80	-28.08	-28.61	-28.22			
-7.25	-7.66	-7.46	-7.51			-7.12	-8.35	-7.94	-8.13	-6.31	-6.31	-6.31	-6.31	-7.19	-8.05	-7.99	-8.04	-7.19	-8.05	-7.99	-8.04			
7'011	7'402	7'209	7'259			3'469	4'065	3'868	3'957	3'910	3'910	3'910	3'910	17'940	20'097	19'951	20'057	17'940	20'097	19'951	20'057			
47'647	50'302	48'971	49'329			19'403	22'734	21'605	22'131	31'562	31'562	31'562	31'562	112'121	125'601	124'653	125'351	112'121	125'601	124'653	125'351			
-50.72	-47.97	-49.35	-48.98			-60.15	-53.31	-55.63	-54.55	-49.09	-49.09	-49.09	-49.09	-55.08	-49.68	-50.06	-49.78	-55.08	-49.68	-50.06	-49.78			
-29.40	-31.04	-30.23	-30.44			-29.27	-34.30	-32.64	-33.39	-26.53	-26.53	-26.53	-26.53	-26.47	-29.66	-29.44	-29.60	-26.47	-29.66	-29.44	-29.60			
28'423	30'007	29'224	29'427			14'253	16'702	15'894	16'259	16'452	16'452	16'452	16'452	66'078	74'023	73'485	73'876	66'078	74'023	73'485	73'876			
68'234	72'036	70'140	70'644			29'774	34'887	33'172	33'962	43'615	43'615	43'615	43'615	158'403	177'448	176'126	177'095	158'403	177'448	176'126	177'095			
-29.42	-25.49	-27.45	-26.93			-38.85	-28.35	-31.87	-30.25	-29.66	-29.66	-29.66	-29.66	-36.54	-28.91	-29.44	-29.05	-36.54	-28.91	-29.44	-29.05			
-8.10	-8.56	-8.33	-8.39			-7.97	-9.34	-8.89	-9.09	-7.10	-7.10	-7.10	-7.10	-7.93	-8.88	-8.82	-8.87	-7.93	-8.88	-8.82	-8.87			
7'836	8'272	8'055	8'112			3'882	4'549	4'326	4'428	4'399	4'399	4'399	4'399	19'795	22'176	22'012	22'132	19'795	22'176	22'012	22'132			
69'589	73'466	71'531	72'046			30'342	35'553	33'803	34'609	44'461	44'461	44'461	44'461	161'621	181'052	179'701	180'693	161'621	181'052	179'701	180'693			
-28.02	-24.01	-26.01	-25.48			-37.68	-26.98	-30.57	-28.92	-28.29	-28.29	-28.29	-28.29	-35.25	-27.47	-28.01	-27.61	-35.25	-27.47	-28.01	-27.61			
-6.70	-7.08	-6.89	-6.94			-6.81	-7.98	-7.59	-7.76	-5.73	-5.73	-5.73	-5.73	-6.64	-7.44	-7.39	-7.43	-6.64	-7.44	-7.39	-7.43			
6'482	6'843	6'664	6'710			3'314	3'883	3'695	3'780	3'553	3'553	3'553	3'553	16'578	18'571	18'436	18'534	16'578	18'571	18'436	18'534			

## QUATRIÈME PARTIE : CONCLUSION

## CONCLUSION

Au moment de conclure ce travail nous pouvons tout d'abord constater que les voitures électriques représentent, sous réserve du respect d'un certain nombre de conditions préalables, un potentiel appréciable de réduction des émissions de CO<sub>2</sub> du transport individuel motorisé dans l'agglomération franco-valdo-genevoise. Chacun des modèles testés a, en effet, montré que l'électrification du parc a un impact réel à ce niveau.

**Notre première hypothèse est confirmée.** Elle prévoyait que le remplacement d'une part du parc automobile de l'agglomération franco-valdo-genevoise par des voitures électriques, malgré les progrès technologiques à venir des voitures à moteur à combustion interne, permettrait de réduire significativement les rejets de CO<sub>2</sub> du système régional de transport de personnes. Selon tous les modèles testés et selon tous les scénarii envisagés d'évolution des kilomètres parcourus les émissions de CO<sub>2</sub> sont moindres quand une part du parc automobile est électrifiée. De plus, l'amélioration est significative en comparaison de l'apport potentiel des voitures hybrides en la matière. En 2020 la réduction supplémentaire des émissions de CO<sub>2</sub> par rapport à la poursuite de la tendance actuelle (pas d'introduction de voitures électrique dans le parc automobile, réduction des émissions uniquement grâce aux progrès technologiques des moteurs à combustion interne) varie, dans le scénario de base, de 2.6 % de réduction supplémentaire dans le modèle le moins ambitieux (modèle Renault) à 10.1 % dans le modèle "encouragement politique marqué". Par rapport aux émissions de 1990, le modèle "Renault" correspondrait à une baisse des émissions de 2.2 % en 2020. Ce chiffre peut paraître faible, puisque le respect des engagements de la Suisse dans les accords de Kyoto aurait dû correspondre à une réduction de 8 % en 2010. Néanmoins, nous considérons cette réduction des émissions comme très significative. En effet, cet objectif de 8 % est un objectif global, il ne doit pas être mesuré uniquement dans le transport individuel de personnes. Or, jusqu'à présent, ce secteur est celui dans lequel les progrès sont les plus faibles (de fait, malgré tous les efforts entrepris et les sommes dépensées, les émissions du transport de personnes n'ont jamais cessé de croître). Ainsi, l'atteinte d'une telle réduction représenterait un progrès majeur en la matière. Dans le scénario "encouragement politique marqué", la baisse des émissions est de 10.7 % par rapport à 1990.

**Notre seconde hypothèse n'est pas confirmée.** Elle prévoyait que la réduction des émissions de CO<sub>2</sub> concernerait majoritairement, les trajets pendulaires. L'impact des voitures électriques sur les émissions de CO<sub>2</sub> n'est pas systématiquement plus grand en ce qui concerne les trajets pendulaires, contrairement à ce que nous supposions initialement. La baisse est significativement plus importante que pour les déplacements de loisirs, ce qui implique qu'elle est, en général, légèrement supérieure à la moyenne globale. En revanche, les résultats sont contrastés par rapport aux déplacements d'achats. De fait, tout dépend du scénario retenu. Dans la variante 3 (rééquilibrage régional et rareté des ressources), la réduction des émissions est systématiquement plus importante pour les déplacements pendulaires que pour les déplacements d'achats.

Dans les autres scénarii, la tendance n'est pas nette. Ces résultats nous font penser que la réduction des émissions de CO<sub>2</sub> dans les déplacements pendulaires est, avant tout, due à la contraction de la part de ce type de déplacements dans la mobilité globale, l'électrification du parc jouant un rôle secondaire. Ce qui explique que la baisse des émissions soit plus marquée dans la variante 3, les trajets pendulaires étant la cible privilégiée des politiques de report modal. Cependant, si la baisse des émissions de CO<sub>2</sub> dans les trajets pendulaires n'est pas plus grande que pour les autres types de déplacements, elle n'en demeure pas moins importante en valeur absolue.

Ainsi, les voitures électriques montrent un grand potentiel de réduction des émissions de CO<sub>2</sub>. Que ce potentiel se traduise dans les faits dépend cependant de plusieurs facteurs, notamment politiques. Pour que la voiture électrique s'impose sur le marché suisse, des mesures d'encouragement s'avèrent nécessaires. L'étude à grande échelle de Mendrisio a montré, notamment, que les contributions à l'achat des véhicules par les pouvoirs publics, les bornes de recharge publiques, la garantie des batteries sont indispensables à un stade précoce de commercialisation (Schwegler & Wegmann, 2001, p. 6). De plus l'encouragement à l'achat d'une voiture électrique par des mesures non financières serait très efficace. Notamment, la prolongation de la durée maximale de stationnement pour les voitures électriques et la réservation de places pour l'usage exclusif de ce type de véhicules. En revanche, l'augmentation des taxes sur les carburants aurait, à notre sens, un effet moins important, le coût d'un déplacement étant difficilement évaluable par un individu.

Il nous faut, maintenant, nuancer quelque peu les résultats obtenus dans ce travail. Les valeurs de réduction des émissions de CO<sub>2</sub> dépendent du mix électrique. Or, l'électricité produite en Suisse a la particularité d'être très peu émettrice de CO<sub>2</sub>, par rapport au mix européen. L'atteinte des résultats présentés dans ce travail implique, par conséquent, d'investir dans de nouvelles capacités de production non émettrices de CO<sub>2</sub> (hydraulique, nouvelles énergies renouvelables ou nucléaire) afin de préserver cet avantage comparatif du mix électrique suisse. Dans le cas contraire, la Suisse sera, à terme, condamnée à importer une part croissante de son électricité ou de la produire elle-même par des moyens plus émetteurs de CO<sub>2</sub>. En outre, l'impact des gaz à effet de serre sur le climat est à mesurer à l'échelle mondiale. Dès lors, en cas d'investissement dans de nouvelles capacités de production électrique, le choix se posera de réduire par ce biais les émissions dans les transports ou dans d'autres domaines. Il pourrait s'avérer tout aussi efficace, en termes de réduction des émissions gaz à effet de serre, d'utiliser l'électricité ainsi produite pour réduire la dépendance à l'électricité d'origine thermique non nucléaire, si les progrès des véhicules traditionnels en la matière sont plus rapides que ceux des centrales électriques. Cela permettrait, en outre, d'éviter les pertes de charge induites par l'utilisation de batteries. La production d'électricité est, en effet, une des principales sources d'émissions de gaz à effet de serre dans le monde. Au final, le bilan global des émissions de CO<sub>2</sub> pourrait s'en trouver amélioré, malgré une dégradation au niveau local.

Ce constat ne remet toutefois pas en cause, selon nous, l'intérêt des voitures électriques. D'autres arguments parlent, en effet, en faveur de leur promotion. A commencer par la contrainte de l'organisation du territoire, en grande partie basée sur



l'accessibilité par les moyens de locomotion individuels motorisés. La voiture restera, dès lors, indispensable au fonctionnement du système de transport. De plus, un moteur à combustion interne, même très peu gourmand, n'en continuera pas moins à polluer. Notamment dans les zones urbaines, là où la concentration de la population rend la bonne qualité de l'air encore plus essentielle. L'électrification du parc automobile serait également favorable, sous certaines conditions, en termes de lutte contre le bruit. Finalement, le sentiment individuel de participer à un effort global de réduction des émissions de gaz à effet de serre n'est certainement pas à négliger. L'achat d'une voiture électrique relève d'un choix qui pourrait constituer le premier pas d'une évolution vers un comportement plus éco-compatible en matière de transport. Pour les auteurs d'un tel choix, la grande visibilité de la responsabilisation de leur comportement serait certainement très valorisante. Ce changement pourrait, dès lors, rejaillir dans d'autres domaines de la vie quotidienne et poser les fondations d'une évolution globale des comportements vers une société durable.

## CINQUIÈME PARTIE : BIBLIOGRAPHIE ET ANNEXES

## BIBLIOGRAPHIE

- AFD. (2006). *Impôt sur les huiles minérales*. Consulté le 10 novembre 2009, sur Confédération Suisse, Administration fédérale des douanes (AFD) : [http://www.ezv.admin.ch/zollinfo\\_firmen/steuern\\_abgaben/00382/index.html?lang=fr](http://www.ezv.admin.ch/zollinfo_firmen/steuern_abgaben/00382/index.html?lang=fr)
- AIE. (2009). *CO<sub>2</sub> emissions from fuel combustion, highlights*. Paris : Agence internationale de l'énergie (AIE).
- AIE. (1994). *Véhicules électriques : technologie, performances et perspectives*. Paris : Agence internationale de l'énergie (AIE), Les éditions de l'OCDE.
- ALPIQ. (s.d.). Récupéré sur <http://www.alpiq.com/fr/index.jsp>
- ALPIQ. (s.d.). *Véhicules électriques : pénétration du marché suisse d'ici 2020*. Lausanne, Olten.
- ARE. (2008). *Coûts externes des transports en Suisse, mise à jour 2005 avec marges d'évaluation*. Berne : Confédération Suisse, Office fédéral du développement territorial (ARE).
- ARE. (2006). *Perspektiven des schweizerischen Personenverkehrs bis 2030*. Berne : Confédération Suisse, Office fédéral du développement territorial (ARE).
- Assemblée fédérale. (s.d.). *Loi fédérale sur la réduction des émissions de CO<sub>2</sub> (loi sur le CO<sub>2</sub>). (Projet)*.
- Assemblée fédérale. (8 octobre 1999). *Loi fédérale sur la réduction des émissions de CO<sub>2</sub> (loi sur le CO<sub>2</sub>). (RS 641.71)*.
- Auto-Suisse. (2009). Consulté le 21 décembre 2009, sur Association des importateurs suisses d'automobiles : [http://www.auto-schweiz.ch/cms/Voitures\\_de\\_tourisme\\_par\\_marque.html](http://www.auto-schweiz.ch/cms/Voitures_de_tourisme_par_marque.html)
- Bavoux, J.-J., & al. (2005). *Géographie des transports*. Paris : Armand Colin.
- Better place. (s.d.). Consulté le 20 octobre 2009, sur <http://france.betterplace.com/>
- Better place. (2009). *Communiqué de presse*. Récupéré sur Better place : <http://france.betterplace.com/renault-et-better-place-sengagent-a-commercialiser-100-000-fluence-ze-en-is>
- Bluecar. (s.d.). Consulté le 24 novembre 2009, sur Bolloré-Pininfarina : <http://www.bluecar.fr/telechargement/bluecar/pdf/297x210%20-%20Brochure%20FR.pdf>
- Bluecar. (s.d.). *Brochure Bluecar*. Consulté le 24 novembre 2009, sur Bluecar by Pininfarina : <http://www.bluecar.fr/telechargement/bluecar/pdf/297x210%20-%20Brochure%20FR.pdf>
- Boillat, P., & Pini, G. (2005). *De la mobilité à la mobilité durable : politiques de transport en milieu urbain*. Dans A. Da Cunha, & al, *Enjeux du développement urbain durable*,

*transformations urbaines, gestion des ressources et gouvernance* (pp. 77-102). Lausanne : Presses polytechniques et universitaires romandes.

*C dans l'air*. (2009a). Récupéré sur France 5 : [http://www.france5.fr/c-dans-l-air/index-fr.php?page=resume&id\\_rubrique=1104](http://www.france5.fr/c-dans-l-air/index-fr.php?page=resume&id_rubrique=1104)

*C dans l'air*. (2009b). Consulté le 1 décembre 2009, sur France 5 : [http://www.france5.fr/c-dans-l-air/index-fr.php?page=resume&id\\_rubrique=1254#](http://www.france5.fr/c-dans-l-air/index-fr.php?page=resume&id_rubrique=1254#)

*California air resources board*. (s.d.). Récupéré sur <http://www.arb.ca.gov/homepage.htm>

Canton de Vaud. (s.d.). *Cycle de vie des moyens de transport*. Récupéré sur Canton de Vaud, développement durable : <http://www.vd.ch/fr/themes/environnement/developpement-durable/developpement-durable-au-travail/fiches-cycles-de-vie/cycles-des-transports/>

CEMT. (2007). *Transports et émissions de CO<sub>2</sub> : quels progrès ?* Paris : Conférence européenne des ministres des transports (CEMT), Organisation de coopération et de développement économique (OCDE).

Chancellerie fédérale. (s.d.). *Initiative populaire fédérale "pour des véhicules plus respectueux des personnes"*. Récupéré sur Confédération Suisse, Chancellerie fédérale : <http://www.admin.ch/ch/f/pore/vi/vis351t.html>

Citroën. (s.d.). *Citroën C-ZERO*. Récupéré sur [http://www.c-zero.citroen.com/includes/pdf/c\\_zero\\_fr.pdf](http://www.c-zero.citroen.com/includes/pdf/c_zero_fr.pdf)

Conseil Fédéral. (15 décembre 1986). Ordonnance sur la protection contre le bruit (OPB). (RS 814.41).

Da Cunha, A. (2005). Développement durable, transformations urbaines et projet : enjeux et défis. Dans A. Da Cunha, & al, *Enjeux du développement urbain durable, transformations urbaines, gestion des ressources et gouvernance* (pp. 9-11). Lausanne : Presses polytechniques et universitaires romandes.

Department of energy. (2000). *Carbon dioxide emissions from the generation of electric power in the United States*. Washington DC : USA, Department of energy, Environmental protection agency.

Desley, J. (1997). Véhicules routiers : les évolutions actuelles sont-elles irréversibles ? *INRETS-Synthesis*, 59, pp. 25-36.

DETEC. (2009). *L'avenir des réseaux d'infrastructures nationales en Suisse*. Berne : Confédération Suisse, Département fédéral de l'environnement, des transports de l'énergie et de la communication (DETEC).

DETEC, OFEV. (2009a). *Emissions d'après la loi sur le CO<sub>2</sub> et d'après le protocole de Kyoto*. Berne : Confédération Suisse, Département fédéral de l'environnement, des transports, de l'énergie et de la communication (DETEC), Office fédéral de l'environnement (OFEV).

DETEC, OFEV. (26 août 2009b). *Révision partielle de la loi sur le CO<sub>2</sub> avant 2012*. Récupéré sur Confédération Suisse, Département fédéral de l'environnement, des

transports, de l'énergie et de la communication (DETEC), Office fédéral de l'environnement (OFEV) : <http://www.news-service.admin.ch/NSBSubscriber/message/attachments/16950.pdf>

DGM, OCSTAT, DGAT. (2008). *La mobilité des Genevois en 2005, analyse du suréchantillonnage du microrecensement transport 2005*. Genève : République et canton de Genève, Direction générale de la mobilité (DGM), Office cantonal de la statistique (OCSTAT), Direction générale de l'aménagement du territoire (DGAT).

*Econologie.com*. (s.d.). Récupéré sur <http://www.econologie.com/europe-emissions-de-co2-par-pays-et-par-kwh-electrique-articles-3722.html>

EDF. (s.d.). *Electricité de France*. Consulté le 8 décembre 2009 sur <http://energies.edf.com/edf-fr-accueil/la-production-d-electricite-edf/-nucleaire-120205.html>

E'mobile. (s.d.). *E'mobile / Association suisse des véhicules routiers électriques et efficaces*. Récupéré sur <http://www.e-mobile.ch/index.php?pid=fr,3,18>

Environnement Canada. (s.d.). *Rapport d'inventaire national 1990-2005 : sources et puits de gaz à effet de serre au Canada*. Consulté le 10 décembre 2009, sur Environnement Canada : [http://www.ec.gc.ca/pdb/ghg/inventory\\_report/2005\\_report/a12\\_fra.cfm#a12\\_1\\_4](http://www.ec.gc.ca/pdb/ghg/inventory_report/2005_report/a12_fra.cfm#a12_1_4)

Europa. (s.d.). *Europa, synthèse de la législation de l'UE*. Récupéré sur [http://europa.eu/legislation\\_summaries/internal\\_market/single\\_market\\_for\\_goods/motor\\_vehicles/interactions\\_industry\\_policies/l28186\\_fr.htm](http://europa.eu/legislation_summaries/internal_market/single_market_for_goods/motor_vehicles/interactions_industry_policies/l28186_fr.htm)

Flamm, M. (2004). *Comprendre le choix modal - les déterminants des pratiques modales et des représentations individuelles des moyens de transport* (Thèse no 2897). Lausanne : EPFL.

Gilbert, R., & Perl, A. (2008). *Transport revolutions, moving people and freight without oil*. London : Earthscan.

*GM – Chevrolet*. (s.d.). Récupéré sur <http://www.chevrolet.com/pages/open/default/future/volt.do>

*GM – Opel*. (s.d.). Récupéré sur <http://www.opel-ampere.com/francais/>

Gordon, P., & Richardson, H. W. (1997). Are compact cities a desirable planning goal. *Journal of the American planning association*, 63 (1), pp. 95-106.

Holden, E., & Norland, I. T. (2005). Three challenges for the compact city as a sustainable urban form : household consumption of energy and transport in eight residential areas in the greater Oslo region. *Urban Studies*, 42 (12), pp. 2145-2166.

Kaufmann, V. (2008). *Les paradoxes de la mobilité : bouger, s'enraciner*. Lausanne : Presses polytechniques et universitaires romandes.

Kaufmann, V. (2000). *Mobilité quotidienne et dynamiques urbaines : la question du report modal*. Lausanne : Presses polytechniques et universitaires romandes.

Kaufmann, V., & Stofer, S. (1995). Le report modal de l'automobile vers les transports publics, recherche comparative auprès des actifs motorisés des agglomérations

genevoise, lausannoise et bernoise, rapport de synthèse. *IREC* , *Rapport de recherche* 127.

L'Express. (2009). Tesla Motors, le succès de la Ferrari verte. *L'Express* .

L'Express. (2009). Voyage chez les start-up vertes de la Silicon Valley.

*Libération*. (1 juin 2009). Consulté le 13 décembre 2009, sur <http://www.liberation.fr/monde/0101570631-bolivie-sur-un-baril-de-lithium>

*Loremo*. (s.d.). Récupéré sur [http://www.loremo.com/englisch/02der02\\_varianten.htm](http://www.loremo.com/englisch/02der02_varianten.htm)

*Los Angeles Times*. (18 décembre 2009). Récupéré sur <http://www.latimes.com/business/la-fi-neil18-2009dec18,0,2974405,full.column>

Maat, K., Van Wee, B., & Stead, D. (2005). Land use and travel behavior : expected effects from the perspective of utility and activity-based theories. *Environnement and planning B* , 32, pp. 33-46.

Marcadon, J., & al. (1997). *Les transports, géographie de la circulation dans le monde d'aujourd'hui*. Paris : Armand Colin.

Martinelli, A., & Al. (2000). Indicateurs d'accès pour une mobilité durable. *Rapport du PNR 41 "Transport et environnement" , rapport A* (11).

Matheys, J., & al. (2006). Comparison of the environmental impact of 5 electric vehicle battery technologies using LCA. *Proceedings of th 13th CIRP international conference on life cycle engineering*, (pp. 97-102). Leuven.

METI, ECCJ. (2008). *Top Runner program, developping the world's best energy-efficient appliances*. Ministry of economy, trade and industry (METI), The energy conservation center (ECCJ), Japan.

*MINI*. (s.d.). Récupéré sur [http://www.mini.co.uk/MINI\\_E/?random=0.19937241426488306](http://www.mini.co.uk/MINI_E/?random=0.19937241426488306)

*Mitsubishi iMiEV*. (s.d.). Récupéré sur Mitsubishi Motors : <http://www.mitsubishi-motors.com/special/ev/whatis/index.html>

*Moteur nature*. (s.d.). Récupéré sur <http://www.moteurnature.com/actu/normes.php>

Newman, P., & Kenworthy, J. (1989b). Gasoline consumption and cities : a comparison of US cities with a global survey. *Journal of the American planning association* , 55 (1), pp. 24-37.

Newman, P., & Kenworthy, J. (1999). *Sustainability and cities, overcoming automobile dependence*. Washington D.C. : Island Press.

Newman, P., & Kenworthy, J. (1989a). *Cities and automobile dependance : an international source book*. Aldershot : Gower Publishing ltd.

NHTSA. (s.d.). *USA, National Highway Traffic Safety Administration*. Consulté le 2 novembre 2009, sur <http://www.nhtsa.dot.gov/CARS/rules/CAFE/overview.htm>

NHTSA. (2009). *USA, National Highway Traffic Safety Administration*. Récupéré sur <http://www.nhtsa.gov/portal/site/nhtsa/template.MAXIMIZE/menuitem.f2217bee37fb302f6>

d7c121046108a0c/?javax.portlet.tpst=1e51531b2220b0f8ea14201046108a0c\_ws\_MX&javax.portlet.prp\_1e51531b2220b0f8ea14201046108a0c\_viewID=detail\_view&itemID=70ba836076eb3210VgnVCM1000002fd17898RCRD&pressReleaseYearSelect=2009

*Nissan Zero Emission.* (s.d.). Récupéré sur Nissan: <http://www2.nissan-zeroemission.com/EN/LEAF/specs.html>

Noirjean, S., & Merle, T. (2007). Intégration des politiques de mobilité et de planification urbaine. *Urbia*, 1, pp. 91-109.

OCDE. (2004). *Voitures propres : stratégies pour des véhicules peu polluants*. Paris : Les éditions de l'OCDE.

OCSTAT. (2009). *Population résidente : état, mouvement et projections*. Récupéré sur République et Canton de Genève, Office cantonal de la statistique (OCSTAT) : [http://www.geneve.ch/statistique/population\\_residante/welcome.asp#1](http://www.geneve.ch/statistique/population_residante/welcome.asp#1)

OFEFP. (2004). Emissions polluantes du trafic routier de 1980 à 2030. *Cahiers de l'environnement n°355* (Air), Confédération Suisse, Office fédéral de l'environnement, des forêts et du paysage (OFEFP).

OFEFP. (2003). *Modification de l'ordonnance sur la protection contre le bruit, prolongation des délais d'assainissement pour les routes et modification des art. 36 ss*. Berne : Confédération Suisse, Office fédéral de l'environnement, des forêts et du paysage (OFEFP).

OFEN. (2007). *Centrale à cycle combiné au gaz naturel*. Récupéré sur Confédération Suisse, Office fédéral de l'énergie (OFEN) : <http://www.bfe.admin.ch/energiwissen/01252/01262/index.html?lang=fr>

OFEN. (2009). *Statistique suisse de l'électricité 2008*. Berne : Office fédéral de l'énergie, Confédération Suisse.

OFEV. (2009a). *Emissions de polluants atmosphériques et de gaz à effet de serre en Suisse de 1990 à 2007*. Récupéré sur Confédération Suisse, Office fédéral de l'environnement (OFEV) : <http://www.bafu.admin.ch/luft/00596/08399/index.html?lang=fr>

OFEV. (2009b). *Norme EURO 5 : une étape importante pour protéger la santé*. Récupéré sur Confédération Suisse, Office fédéral de l'environnement (OFEV) : <http://www.bafu.admin.ch/dokumentation/medieninformation/00962/index.html?lang=fr&msg-id=28796>

OFEV. (2009c). *Voitures de tourisme*. Récupéré sur Confédération Suisse, Office fédéral de l'environnement (OFEV) : <http://www.bafu.admin.ch/luft/00596/00597/04343/05294/index.html?lang=fr>

OFEV. (2006). *Facteurs de conversion et d'émission pour l'énergie et le CO<sub>2</sub>*. Récupéré sur Confédération Suisse, Office fédéral de l'environnement (OFEV) : <http://www.bafu.admin.ch/klima/09570/index.html?lang=fr>

OFEV. (2003). *La Suisse adhère au protocole de Kyoto*. Récupéré sur Confédération Suisse, Office fédéral de l'environnement (OFEV) : <http://www.bafu.admin.ch/dokumentation/medieninformation/00962/index.html?lang=fr&msg-id=1650>

- Office cantonal des automobiles et de la navigation. (2009). *Statistiques*. Consulté le 16 décembre 2009, sur République et canton de Genève, Office cantonal des automobiles et de la navigation : <http://www.ge.ch/san/statistiques/welcome.asp?titre=Statistiques>
- OFS. (2009a). *Indices des prix à la consommation - indicateurs*. Récupéré sur Confédération Suisse, Office fédéral de la statistique (OFS) : <http://www.bfs.admin.ch/bfs/portal/fr/index/themen/05/02/blank/key/durchschnittspreis.html>
- OFS. (2009b). *Véhicules routiers en Suisse. Mises en circulation de véhicules routiers neufs 2008*. Récupéré sur Confédération Suisse, Office fédéral de la statistique (OFS) : [http://www.bfs.admin.ch/bfs/portal/fr/index/themen/11/03/blank/key/fahrzeuge\\_strasse\\_in\\_verkehrsetzung.html#parsys\\_00371](http://www.bfs.admin.ch/bfs/portal/fr/index/themen/11/03/blank/key/fahrzeuge_strasse_in_verkehrsetzung.html#parsys_00371)
- OFS. (s.d.). *Superweb - La base de donnée statistique online*. Récupéré sur Confédération Suisse, Office fédéral de la statistique : [http://superweb-guest.bfs.admin.ch/superweb/loadDatabase.do;jsessionId=0C48A52BC077DB6B18DA5563DFE46465?db=Fahrzeug\\_FAZG1\\_fr](http://superweb-guest.bfs.admin.ch/superweb/loadDatabase.do;jsessionId=0C48A52BC077DB6B18DA5563DFE46465?db=Fahrzeug_FAZG1_fr)
- ONU. (1992). Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques. Organisation des Nations Unies (ONU).
- ONU. (1998). Protocole de Kyoto à la convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques. Organisation des Nations Unies (ONU).
- Pays-Bas. (2009). *Ministry of transport, public works and water management*. Récupéré sur <http://www.verkeerenwaterstaat.nl/english/topics/mobility%5Fand%5Faccessibility/roadpricing/>
- Peugeot. (s.d.). Récupéré sur <http://www.peugeot.ch/actualite-topic/actualite-topic/la-nouvelle-peugeot-electrique-i0n--zero-emission-/>
- Pouyane, G. (2005). L'interaction entre usage du sol et comportements de mobilité : méthodologie et application à l'aire urbaine de Bordeaux. *Revue d'économie régionale et urbaine*, 5, pp. 723-746.
- Prudente, D. (2007). Densité, urbanité, durabilité : consolidation et construction d'une forme urbaine compacte en marge des centralités. *Urbia*, 4, pp. 103-123.
- République et canton de Genève. (a). *Plan directeur cantonal-Projets et mesures : 5 Protection de l'environnement / 5.03 Protection contre le bruit (OPB)*. Récupéré sur République et canton de Genève : [http://www.geneve.ch/Plan-directeur/asp/fiche\\_plan\\_directeur.asp?fiche\\_no=420&what=ibase](http://www.geneve.ch/Plan-directeur/asp/fiche_plan_directeur.asp?fiche_no=420&what=ibase)
- République et canton de Genève. (b). *Pneumatiques et bruit routier*. Récupéré sur République et canton de Genève : [http://etat.geneve.ch/dt/bruit-rayons/pneumatiques\\_bruit\\_routier-272-3334.html](http://etat.geneve.ch/dt/bruit-rayons/pneumatiques_bruit_routier-272-3334.html)
- Rérat, P. (2007). Etalement, fragmentation, mobilité : analyse des tendances de l'urbanisation dans la région de Neuchâtel. *Urbia*, 1, pp. 41-55.
- Ruzicka-Rossier, M., & Kotchi, M.-J. (2002). *Densité et mixité, analyse d'une portion d'agglomération, l'ouest lausannois*. Lausanne : EPFL.
- Schuler, M., & Kaufmann, V. (2005). Les transports publics à l'épreuve des mutations de



la pendularité – comparaisons diachroniques sur la base des résultats des recensements fédéraux de 1970, 1980, 1990 et 2000. *DISP*, 161, pp. 40-50.

Schuler, M., & Kaufmann, V. (1996). Pendularité à longue distance : la vitesse des transports comme facteur structurant de l'urbain. *DISP*, 126, pp. 3-10.

Schwegler, U., & Wegmann, S. (2001). *Progetto veicoli elettrici leggeri : rapport de synthèse*. Office fédéral de l'énergie (OFEN), Suisse énergie.

Service des automobiles et de la navigation du canton de Vaud. (2009). *Véhicules à moteurs neufs mis en circulation par catégorie, 2004-2008*. Consulté le 22 décembre 2009, sur Etat de Vaud, Statistique Vaud : [http://www.san.vd.ch/documents/STA\\_SAN\\_vh30\\_09\\_080724.pdf](http://www.san.vd.ch/documents/STA_SAN_vh30_09_080724.pdf)

SFEN. (s.d.). Récupéré sur Société française d'énergie nucléaire (SFEN) : <http://www.sfen.org/fr/societe/developpement/edf.htm>

Shim, G.-E., & al. (2006). The relationship between the characteristics of transportation energy consumption and urban form. *The annals of regional science*, 40 (2), pp. 351-367.

Statistique Vaud. (2009). *Perspectives démographiques : population, ménages, logements : 2006-2030*. Récupéré sur Etat de Vaud, Statistique Vaud : <http://www.scris.vd.ch/main.asp?DomId=13>

TCS. (2009). *Catalogue consommation 2009 : liste de véhicules avec données de consommation*.

Turbo. (2008). Consulté le 24 novembre 2009, sur M6 : <http://www.turbo.fr/actualite-automobile/166974-mondial-paris-2008-bollore-b0-pininfarina/>

Turton, A., & Moura, F. (2007). Vehicle-to-grid systems for sustainable development : an integrated energy analysis. *Technological forecasting and social change*, 75 (2008), pp. 1091-1108.

Union Européenne. (2007). *Résultat du réexamen de la stratégie communautaire de réduction des émissions de CO<sub>2</sub> des voitures et véhicules commerciaux légers*. Bruxelles : Commission des communautés européennes.

Wiel, M. (2005). *Ville et mobilité : un couple infernal ?* La Tour d'Aigues : Editions de l'Aube.

*www.voitureelectrique.net*. (s.d.). Récupéré sur <http://www.voitureelectrique.net/histoire-de-la-voiture-electrique>







Annexe 4 : évolution des émissions de CO<sub>2</sub>, en % par rapport à 2005 et en tonnes de CO<sub>2</sub>,  
modèle intermédiaire : 10 % du parc électrifié en 2020 (Yves Steiner, 2009)

Evolution des émissions de CO <sub>2</sub> du parc de l'agglomération		Evolution des émissions de CO <sub>2</sub> du parc de l'agglomération, en tonnes de CO <sub>2</sub>																									
		2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030
Tout motif	Scénario de base	0,00%	-0,17%	-0,39%	-0,61%	-0,80%	-1,03%	-2,22%	-3,53%	-4,84%	-6,32%	-7,93%	-9,73%	-11,66%	-14,33%	-16,75%	-19,11%	-21,20%	-22,87%	-24,24%	-25,38%	-26,38%	-27,16%	-27,79%	-28,28%	-28,70%	-29,05%
	Variante 1	0,00%	-0,20%	-0,44%	-0,68%	-0,90%	-1,15%	-2,41%	-3,79%	-5,16%	-6,70%	-8,36%	-10,21%	-12,38%	-14,88%	-17,34%	-19,72%	-21,79%	-23,42%	-24,77%	-25,88%	-26,86%	-27,62%	-28,23%	-28,70%	-29,10%	-29,44%
	Variante 2	0,00%	-0,28%	-0,61%	-0,93%	-1,23%	-1,55%	-2,68%	-3,90%	-5,13%	-6,54%	-8,08%	-9,82%	-11,89%	-14,31%	-16,68%	-18,99%	-21,08%	-22,74%	-24,12%	-25,27%	-26,25%	-27,03%	-27,66%	-28,15%	-28,69%	-29,01%
	Variante 3	0,00%	-1,15%	-2,32%	-3,47%	-4,58%	-5,66%	-7,28%	-9,00%	-10,99%	-12,53%	-14,48%	-16,54%	-18,89%	-21,54%	-24,12%	-26,61%	-28,62%	-30,23%	-31,57%	-32,71%	-33,70%	-34,49%	-35,15%	-35,68%	-36,14%	-36,54%
Travail	Scénario de base	0,00%	-0,18%	-0,35%	-0,50%	-0,63%	-0,79%	-2,08%	-3,47%	-4,82%	-6,34%	-7,98%	-9,73%	-11,60%	-14,18%	-16,51%	-18,77%	-20,82%	-22,49%	-23,90%	-25,12%	-26,20%	-27,10%	-27,88%	-28,53%	-29,12%	-29,66%
	Variante 1	0,00%	-0,18%	-0,35%	-0,50%	-0,63%	-0,79%	-2,08%	-3,47%	-4,82%	-6,34%	-7,98%	-9,73%	-11,60%	-14,18%	-16,51%	-18,77%	-20,82%	-22,49%	-23,90%	-25,12%	-26,20%	-27,10%	-27,88%	-28,53%	-29,12%	-29,66%
	Variante 2	0,00%	-0,20%	-0,39%	-0,56%	-0,72%	-0,89%	-2,03%	-3,28%	-4,50%	-5,89%	-7,38%	-9,04%	-11,00%	-13,29%	-15,53%	-17,70%	-19,89%	-21,28%	-22,62%	-23,77%	-24,77%	-25,60%	-26,30%	-26,89%	-27,39%	-27,85%
	Variante 3	0,00%	-1,63%	-3,21%	-4,75%	-6,23%	-7,70%	-9,75%	-11,88%	-13,94%	-16,12%	-18,35%	-20,73%	-23,31%	-26,13%	-28,65%	-31,49%	-33,54%	-35,45%	-37,10%	-38,44%	-39,72%	-40,85%	-41,88%	-42,80%	-43,66%	-44,47%
Achats	Scénario de base	0,00%	-0,35%	-0,74%	-1,12%	-1,46%	-1,84%	-2,98%	-4,27%	-5,54%	-7,00%	-8,58%	-10,38%	-12,53%	-15,08%	-17,58%	-20,01%	-22,20%	-23,92%	-25,33%	-26,51%	-27,52%	-28,32%	-28,96%	-29,47%	-29,89%	-30,25%
	Variante 1	0,00%	-0,52%	-1,07%	-1,60%	-2,09%	-2,61%	-3,85%	-5,22%	-6,57%	-8,10%	-9,75%	-11,60%	-13,80%	-16,38%	-18,91%	-21,37%	-23,57%	-25,31%	-26,75%	-27,98%	-29,00%	-29,82%	-30,49%	-31,03%	-31,48%	-31,87%
	Variante 2	0,00%	-0,33%	-0,69%	-1,05%	-1,37%	-1,73%	-2,58%	-3,55%	-4,54%	-5,72%	-7,04%	-8,62%	-10,58%	-12,96%	-15,31%	-17,60%	-19,87%	-21,67%	-23,14%	-24,38%	-25,44%	-26,28%	-26,97%	-27,50%	-27,96%	-28,35%
	Variante 3	0,00%	-1,34%	-2,68%	-3,99%	-5,23%	-6,48%	-8,12%	-9,87%	-11,58%	-13,45%	-15,41%	-17,52%	-19,94%	-22,69%	-25,36%	-27,95%	-30,11%	-31,85%	-33,30%	-34,53%	-35,61%	-36,49%	-37,23%	-37,84%	-38,37%	-38,85%
Loisirs	Scénario de base	0,00%	0,09%	0,08%	0,05%	0,03%	-0,03%	-1,17%	-2,44%	-3,67%	-5,08%	-6,60%	-8,32%	-10,36%	-12,75%	-15,09%	-17,38%	-19,40%	-21,00%	-22,33%	-23,43%	-24,37%	-25,12%	-25,73%	-26,20%	-26,59%	-26,93%
	Variante 1	0,00%	0,05%	0,00%	-0,06%	-0,12%	-0,22%	-1,47%	-2,65%	-4,19%	-5,69%	-7,31%	-9,10%	-11,21%	-13,66%	-16,05%	-18,37%	-20,34%	-21,88%	-23,15%	-24,20%	-25,09%	-25,80%	-26,36%	-26,79%	-27,15%	-27,45%
	Variante 2	0,00%	0,07%	0,04%	-0,01%	-0,05%	-0,14%	-1,13%	-2,25%	-3,34%	-4,62%	-6,02%	-7,63%	-9,57%	-11,88%	-14,14%	-16,33%	-18,39%	-19,90%	-21,18%	-22,24%	-23,15%	-23,85%	-24,42%	-24,85%	-25,20%	-25,49%
	Variante 3	0,00%	-0,59%	-1,26%	-1,92%	-2,56%	-3,22%	-4,49%	-5,68%	-7,20%	-8,70%	-10,31%	-12,08%	-14,16%	-16,56%	-18,91%	-21,18%	-23,02%	-24,46%	-25,62%	-26,59%	-27,40%	-28,03%	-28,52%	-28,89%	-29,18%	-29,42%



Annexe 6 : évolution du parc de voitures électriques ou hybrides, par année, selon les modèles testés (Yves Steiner, 2009)

Renault : 10 % de ventes de voitures neuves électriques en 2020

Encouragement politique marqué : 30 % du parc électrifié en 2030

	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	
2009	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2010	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2011	0	0	0	206	206	206	205	201	196	189	181	171	159	146	131	116	101	87	73	60	48	37	28
2012	0	0	0	208	208	208	208	207	203	198	191	183	172	161	147	132	117	102	87	73	61	49	37
2013	0	0	0	411	411	411	410	409	401	391	378	362	340	318	291	261	231	202	172	145	120	96	61
2014	0	0	0	0	0	0	621	620	618	607	591	571	546	514	480	439	394	349	304	260	218	181	141
2015	0	0	0	0	0	0	835	834	834	830	815	794	767	734	691	644	589	529	468	408	349	293	233
2016	0	0	0	0	0	0	1034	1033	1032	1022	1009	983	949	909	855	797	729	655	579	505	431	359	289
2017	0	0	0	0	0	0	0	1249	1248	1248	1247	1242	1219	1187	1146	1097	1032	962	880	790	698	609	516
2018	0	0	0	0	0	0	0	0	1467	1465	1465	1464	1458	1431	1383	1345	1287	1211	1128	1032	926	818	706
2019	0	0	0	0	0	0	0	0	1587	1584	1584	1584	1576	1549	1502	1456	1409	1331	1236	1128	1012	895	778
2020	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2122	2120	2117	2108	2069	2014	1943	1859	1746	1628	1488	1328
2021	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2349	2346	2344	2333	2289	2228	2149	2055	1933	1800	1648	1488
2022	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2579	2576	2572	2560	2511	2444	2357	2254	2119	1948	1788
2023	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2812	2808	2803	2790	2736	2662	2567	2454	2304	2144
2024	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3047	3042	3037	3022	2963	2882	2779	2628	2468
2025	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3066	3061	3055	3039	2980	2898	2747	2587
2026	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3085	3079	3073	3057	2998	2847	2687
2027	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3326	3319	3313	3297	3238	3078
2028	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3347	3339	3331	3272	3112
2029	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3367	3359	3300	3140
2030	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Total parc électrique	0	0	206	414	825	1445	2774	3297	4523	5947	7565	9300	11773	14131	16642	19209	21839	24275	26802	29102	31406	33463	35420
% parc électrique	0%	0%	0%	0%	0%	1%	1%	1%	2%	2%	3%	3%	4%	5%	6%	6%	7%	8%	9%	9%	10%	11%	11%





Annexe 8 : consommation en milieu extra-urbain (Yves Steiner, 2009)

	Diesel (l/100 km)				Essence (l/100 km)				Autres (l/100 km)	Electriques (kWh/100 km)
	< 1.4 l.	1.4-2.0 l.	> 2.0 l.	Moyenne	< 1.4 l.	1.4-2.0 l.	> 2.0 l.	Moyenne		
Avant	6.922	8.694	10.997	8.871	8.813	10.625	13.445	10.961	6.798	17.000
1975	6.827	8.573	10.842	8.747	8.690	10.475	13.253	10.806	6.705	17.000
1976	6.734	8.454	10.689	8.626	8.569	10.328	13.065	10.654	6.613	17.000
1977	6.642	8.336	10.539	8.505	8.450	10.183	12.879	10.504	6.523	17.000
1978	6.551	8.220	10.390	8.387	8.332	10.039	12.696	10.356	6.434	17.000
1979	6.462	8.106	10.244	8.271	8.217	9.898	12.516	10.210	6.346	17.000
1980	6.373	7.994	10.100	8.156	8.103	9.760	12.338	10.067	6.260	17.000
1981	6.287	7.883	9.958	8.043	7.990	9.623	12.163	9.926	6.174	17.000
1982	6.201	7.774	9.818	7.931	7.880	9.488	11.991	9.786	6.091	17.000
1983	6.117	7.666	9.681	7.821	7.771	9.355	11.821	9.649	6.008	17.000
1984	6.034	7.560	9.545	7.713	7.663	9.224	11.654	9.514	5.927	17.000
1985	5.952	7.456	9.411	7.607	7.557	9.095	11.489	9.381	5.846	17.000
1986	5.871	7.353	9.280	7.501	7.453	8.968	11.327	9.249	5.767	17.000
1987	5.792	7.252	9.150	7.398	7.350	8.843	11.167	9.120	5.689	17.000
1988	5.714	7.152	9.022	7.296	7.249	8.720	11.009	8.993	5.613	17.000
1989	5.637	7.054	8.896	7.196	7.149	8.598	10.854	8.867	5.537	17.000
<b>1990</b>	<b>5.561</b>	<b>6.957</b>	<b>8.772</b>	<b>7.097</b>	<b>7.051</b>	<b>8.479</b>	<b>10.701</b>	<b>8.743</b>	<b>5.463</b>	<b>17.000</b>
1991	5.486	6.862	8.650	6.999	6.954	8.361	10.550	8.622	5.389	17.000
1992	5.412	6.768	8.529	6.903	6.859	8.245	10.402	8.502	5.317	17.000
1993	5.340	6.675	8.411	6.809	6.765	8.130	10.255	8.383	5.246	17.000
1994	5.268	6.584	8.294	6.715	6.672	8.017	10.111	8.267	5.176	17.000
1995	5.198	6.494	8.179	6.623	6.581	7.906	9.969	8.152	5.107	17.000
1996	5.128	6.405	8.065	6.533	6.491	7.797	9.829	8.039	5.039	17.000
1997	5.060	6.318	7.953	6.444	6.403	7.689	9.691	7.928	4.972	17.000
1998	4.993	6.232	7.843	6.356	6.315	7.583	9.555	7.818	4.906	17.000
1999	4.926	6.147	7.735	6.269	6.229	7.478	9.422	7.710	4.840	17.000
2000	4.861	6.064	7.628	6.184	6.145	7.375	9.290	7.603	4.776	17.000
2001	4.796	5.982	7.522	6.100	6.061	7.273	9.160	7.498	4.713	17.000
2002	4.733	5.901	7.419	6.017	5.979	7.173	9.032	7.395	4.651	17.000
2003	4.670	5.821	7.316	5.936	5.898	7.075	8.906	7.293	4.589	17.000
2004	4.609	5.742	7.216	5.856	5.818	6.977	8.782	7.192	4.529	17.000
2005	4.548	5.665	7.116	5.776	5.740	6.882	8.659	7.094	4.469	17.000
2006	4.488	5.588	7.019	5.698	5.662	6.787	8.539	6.996	4.411	17.000
2007	4.429	5.513	6.922	5.622	5.586	6.695	8.420	6.900	4.353	17.000
2008	4.371	5.439	6.827	<b>5.546</b>	5.511	6.603	8.303	6.806	4.296	17.000
<b>2009</b>	<b>4.314</b>	<b>5.366</b>	<b>6.734</b>	<b>5.471</b>	<b>5.437</b>	<b>6.513</b>	<b>8.187</b>	<b>6.712</b>	<b>4.240</b>	<b>17.000</b>
2010	4.238	5.269	6.609	<b>5.372</b>	5.338	6.393	8.034	<b>6.588</b>	4.165	17.000
2011	4.163	5.173	6.487	5.274	5.241	6.275	7.883	6.466	4.092	17.000
2012	4.090	5.080	6.367	5.179	5.147	6.159	7.735	6.347	4.020	17.000
2013	4.018	4.988	6.250	5.085	5.054	6.046	7.591	6.230	3.950	17.000
2014	3.948	4.899	6.135	4.994	4.963	5.935	7.449	6.115	3.881	17.000
2015	3.879	4.811	6.022	4.904	4.873	5.826	7.310	6.003	3.813	17.000
2016	3.811	4.724	5.912	4.816	4.786	5.720	7.174	5.893	3.747	17.000
2017	3.745	4.640	5.804	4.729	4.700	5.615	7.040	5.785	3.682	17.000
2018	3.680	4.557	5.697	4.645	4.616	5.513	6.909	5.680	3.618	17.000
2019	3.616	4.476	5.594	4.562	4.534	5.413	6.781	5.576	3.556	17.000
2020	3.554	4.396	5.492	4.481	4.453	5.315	6.656	5.474	3.495	17.000
2021	3.493	4.319	5.392	4.401	4.374	5.218	6.532	5.375	3.435	17.000
2022	3.433	4.242	5.294	4.323	4.297	5.124	6.412	5.277	3.376	17.000
2023	3.374	4.167	5.198	4.247	4.221	5.031	6.294	5.182	3.319	17.000
2024	3.317	4.094	5.104	4.172	4.146	4.941	6.178	5.088	3.262	17.000
2025	3.261	4.022	5.012	4.098	4.073	4.852	6.064	4.996	3.207	17.000

2026	3.205	3.952	4.922	4.026	4.002	4.765	5.953	4.907	3.153	17.000
2027	3.151	3.883	4.833	3.956	3.932	4.680	5.844	4.818	3.100	17.000
2028	3.098	3.815	4.747	3.887	3.863	4.596	5.737	4.732	3.048	17.000
2029	3.046	3.749	4.662	3.819	3.796	4.514	5.632	4.647	2.997	17.000
2030	2.995	3.684	4.579	3.753	3.730	4.434	5.530	4.564	2.947	17.000

Annexe 9 : consommation en milieu urbain (Yves Steiner, 2009)

	Diesel (l/100 km)				Essence (l/100 km)				Autres (l/100 km)	Electriques (kWh/100 km)
	< 1.4 l.	1.4-2.0 l.	> 2.0 l.	Moyenne	< 1.4 l.	1.4-2.0 l.	> 2.0 l.	Moyenne		
Avant 1975	10.369	13.431	17.227	13.676	13.920	17.836	24.255	18.670	10.187	17.000
1975	10.230	13.244	16.983	13.486	13.729	17.583	23.907	18.407	10.051	17.000
1976	10.094	13.059	16.743	13.299	13.541	17.334	23.565	18.147	9.918	17.000
1977	9.960	12.877	16.507	13.115	13.356	17.089	23.228	17.891	9.786	17.000
1978	9.827	12.698	16.274	12.933	13.173	16.848	22.896	17.639	9.656	17.000
1979	9.697	12.521	16.044	12.754	12.993	16.610	22.569	17.391	9.528	17.000
1980	9.568	12.347	15.818	12.578	12.816	16.376	22.246	17.146	9.402	17.000
1981	9.442	12.176	15.596	12.404	12.642	16.145	21.928	16.905	9.278	17.000
1982	9.317	12.007	15.376	12.233	12.469	15.917	21.615	16.667	9.156	17.000
1983	9.194	11.841	15.160	12.065	12.300	15.693	21.307	16.433	9.035	17.000
1984	9.073	11.677	14.947	11.899	12.133	15.472	21.003	16.203	8.916	17.000
1985	8.954	11.515	14.737	11.735	11.968	15.255	20.704	15.976	8.799	17.000
1986	8.836	11.356	14.531	11.574	11.806	15.040	20.409	15.752	8.684	17.000
1987	8.720	11.200	14.327	11.416	11.647	14.829	20.119	15.531	8.571	17.000
1988	8.606	11.045	14.126	11.259	11.489	14.621	19.832	15.314	8.459	17.000
1989	8.494	10.893	13.929	11.105	11.334	14.416	19.550	15.100	8.348	17.000
1990	8.383	10.743	13.734	10.953	11.182	14.214	19.273	14.889	8.240	17.000
1991	8.274	10.595	13.542	10.804	11.031	14.015	18.999	14.682	8.133	17.000
1992	8.166	10.450	13.353	10.656	10.883	13.819	18.729	14.477	8.027	17.000
1993	8.060	10.307	13.167	10.511	10.737	13.626	18.463	14.275	7.924	17.000
1994	7.956	10.165	12.983	10.368	10.593	13.436	18.202	14.077	7.821	17.000
1995	7.853	10.026	12.803	10.227	10.451	13.248	17.944	13.881	7.720	17.000
1996	7.752	9.889	12.624	10.089	10.311	13.063	17.690	13.688	7.621	17.000
1997	7.652	9.754	12.449	9.952	10.174	12.881	17.439	13.498	7.523	17.000
1998	7.554	9.621	12.276	9.817	10.038	12.702	17.193	13.311	7.427	17.000
1999	7.457	9.490	12.106	9.684	9.905	12.526	16.950	13.127	7.332	17.000
2000	7.362	9.361	11.938	9.553	9.773	12.352	16.710	12.945	7.238	17.000
2001	7.268	9.234	11.773	9.425	9.643	12.180	16.474	12.766	7.146	17.000
2002	7.175	9.108	11.610	9.298	9.516	12.011	16.242	12.590	7.055	17.000
2003	7.084	8.985	11.449	9.173	9.390	11.845	16.013	12.416	6.966	17.000
2004	6.994	8.863	11.291	9.049	9.266	11.681	15.787	12.245	6.878	17.000
2005	6.905	8.743	11.135	8.928	9.144	11.519	15.565	12.076	6.791	17.000
2006	6.818	8.625	10.982	8.808	9.023	11.360	15.346	11.910	6.705	17.000
2007	6.732	8.509	10.831	8.690	8.905	11.203	15.131	11.746	6.621	17.000
2008	6.647	8.394	10.682	<b>8.574</b>	8.788	11.049	14.918	11.585	6.538	17.000
<b>2009</b>	<b>6.564</b>	<b>8.281</b>	<b>10.535</b>	<b>8.460</b>	<b>8.673</b>	<b>10.897</b>	<b>14.709</b>	<b>11.426</b>	<b>6.456</b>	<b>17.000</b>
2010	6.453	8.130	10.339	<b>8.307</b>	8.519	10.694	14.430	<b>11.214</b>	6.347	17.000
2011	6.344	7.983	10.147	8.158	8.369	10.495	14.156	11.007	6.240	17.000
2012	6.237	7.838	9.959	8.011	8.222	10.300	13.888	10.803	6.135	17.000
2013	6.132	7.696	9.775	7.868	8.077	10.109	13.625	10.604	6.032	17.000
2014	6.029	7.557	9.595	7.727	7.936	9.922	13.368	10.408	5.932	17.000
2015	5.929	7.421	9.418	7.589	7.797	9.738	13.115	10.217	5.833	17.000
2016	5.830	7.288	9.244	7.454	7.661	9.559	12.868	10.029	5.736	17.000
2017	5.734	7.157	9.075	7.322	7.528	9.382	12.626	9.845	5.642	17.000

2018	5.639	7.029	8.908	7.192	7.397	9.210	12.388	9.665	5.549	17.000
2019	5.546	6.903	8.745	7.065	7.269	9.041	12.155	9.488	5.458	17.000
2020	5.455	6.780	8.585	6.940	7.144	8.875	11.927	9.315	5.369	17.000
2021	5.366	6.660	8.428	6.818	7.021	8.712	11.704	9.146	5.281	17.000
2022	5.279	6.541	8.275	6.698	6.901	8.553	11.485	8.979	5.196	17.000
2023	5.193	6.426	8.124	6.581	6.783	8.397	11.270	8.816	5.112	17.000
2024	5.109	6.312	7.977	6.466	6.667	8.244	11.059	8.657	5.030	17.000
2025	5.027	6.201	7.832	6.353	6.554	8.094	10.853	8.500	4.949	17.000
2026	4.947	6.092	7.691	6.243	6.443	7.947	10.651	8.347	4.870	17.000
2027	4.868	5.985	7.552	6.135	6.334	7.803	10.453	8.197	4.793	17.000
2028	4.790	5.880	7.416	6.029	6.227	7.662	10.259	8.049	4.717	17.000
2029	4.714	5.778	7.282	5.925	6.123	7.524	10.069	7.905	4.642	17.000
2030	4.640	5.677	7.152	5.823	6.020	7.388	9.883	7.764	4.570	17.000