



L'électrification du transport routier canadien :
Analyses politique et technologique selon des approches de
simulation (TVSim) et d'optimisation (TIMES)

Par

Mathilde Marcy

Mémoire présenté en vue de l'obtention
du grade de maîtrise ès sciences
(M.Sc.)
Option Méthodes analytiques de gestion

Août 2013

©Mathilde Marcy, 2013

Résumé :

Nous utilisons deux modèles complémentaires récemment développés (TVSim et TIMES-Canada), afin de mener une analyse technologique, économique et politique du processus d'électrification des transports routiers au Canada. Le modèle de simulation de véhicules électriques TVSim a été conçu dans le but de générer rapidement les valeurs prospectives des paramètres descriptifs des véhicules électriques (efficacité, coûts, etc.) requis par les modèles de planification énergétique bottom-up TIMES. Nous utilisons le modèle TIMES-Canada, développé à partir du générateur de modèles TIMES, pour tester et comparer les effets à long terme (d'ici 2050) de politiques climatique et énergétique, selon différents scénarios d'évolution des véhicules électriques (générés par TVSim). La politique climatique impose les cibles de réduction d'émissions de gaz à effet de serre recommandées par l'Accord de Copenhague, à chaque province et territoire canadien. La politique énergétique impose un taux minimum de pénétration de véhicules électriques (tout-électrique et hybride rechargeable) à chaque province et territoire également. Notre étude montre que les véhicules électriques pénètrent le marché canadien du transport de passagers, même en l'absence de politique incitative, à partir de 2040 ; mais que la politique énergétique accélère ce déploiement (à partir de 2030). De plus, l'électrification des transports de passagers jouera un rôle important dans le processus de réduction des GES imposé par la politique climatique. Enfin, une évolution plus rapide des technologies de batterie électrique accélérerait et accentuerait le déploiement des véhicules électriques, dans nos trois scénarios (base, politique climatique et politique énergétique).

Mots clés :

Véhicules électriques ; Électrification des transports ; Planification énergétique ; Analyse politique ; Analyse technologique ; Transport canadien ; Simulation de véhicules.

Abstract :

We use two complementary models recently developed (TVSim and TIMES-Canada) in order to conduct a technological, economic and political analysis of the electrification of road transport processes in Canada. The simulation model of electric vehicles TVSim was designed to quickly generate the prospective values of parameters describing electric vehicles (effectiveness, cost, etc.) required by TIMES' bottom-up models of energy planning. We use the model TIMES-Canada, developed with the model generator TIMES, to test and compare the long-term (up until 2050) climate and energy policies, according to different scenarios for electric vehicles (generated by TVSim). The Climate policy imposes reduction targets for greenhouse gas emissions recommended by the Copenhagen Agreement, to every Canadian province and territory. The Energy policy imposes a (all-electric and plug-in hybrid) minimum penetration of electric vehicles in each province and territory as well. Our study shows that electric vehicles enter the Canadian passenger market even in the absence of incentive policy, starting in 2040 ; but that the energy policy accelerates the deployment to start in 2030. In addition, the electrification of passenger transport will play an important role in the GHG reduction imposed by the climate policy. Finally, a faster evolution of electric battery technology would accelerate and accentuate the deployment of electric vehicles in our three scenarios (base, climate policy and energy policy).

Key words :

Electric vehicles ; Electrification of transportation sector ; Energy planning ; Policy analysis ; Technology analysis ; Canadian transportation ; Vehicles simulation.

Table des matières

1	Introduction	1
1.1	Contexte énergétique et environnemental	2
1.2	L'importance du secteur du transport routier	3
1.3	De nouvelles technologies pour le transport routier	3
1.4	Le rôle des politiques gouvernementales	4
1.5	Question de recherche	6
1.6	Plan du mémoire	7
1.7	Références	8
2	Revue de littérature	9
2.1	Modèles de simulation des caractéristiques des véhicules	9
2.1.1	Modèles de détermination des caractéristiques du GMP	10
2.1.2	Modèles de détermination de la consommation	13
2.1.3	Modèles de détermination des coûts	18
2.2	Études sur le déploiement des véhicules alternatifs	21
2.2.1	Approches de simulation	21
2.2.2	Approches d'optimisation	24
2.3	Approches de modélisation choisies	29
2.4	Références	30

3	Modèle TVSim	33
3.1	Aperçu du modèle TVSim	34
3.2	Véhicules représentés	37
3.2.1	Architecture des véhicules	37
3.2.2	Performances et cycles de conduite	39
3.2.3	Caractéristiques additionnelles	40
3.3	Modèle de détermination des caractéristiques du véhicule	44
3.3.1	Simulation des performances	44
3.3.2	Modèle de détermination de la masse du GMP et du véhicule	47
3.4	Modèle de détermination de la consommation	50
3.5	Modèle de détermination des coûts	51
3.5.1	Coût d'investissement	52
3.5.2	Coûts d'opération et de maintenance	54
3.6	Validation de TVSim	57
3.7	Mise en oeuvre dans un contexte canadien	59
3.7.1	Adaptation au contexte canadien	60
3.7.2	Illustration pour un véhicule	61
3.8	Synthèse des caractéristiques de TVSim	65
3.9	Références	66
4	Electrification of the Canadian road transportation sector : A 2050 outlook with TIMES-Canada	67
4.1	Introduction	68
4.2	Modelling approach	69
4.2.1	Overview of TIMES	69
4.2.2	Overview of TIMES-Canada	70
4.2.3	Modelling of the Canadian road transport sector	70

4.3	Scenarios characterization	71
4.3.1	Baseline scenario	71
4.3.2	Climate policy scenario	72
4.3.3	Energy policy scenario	72
4.4	Scenario analysis	72
4.4.1	Primary energy supply	73
4.4.2	Final energy consumption	73
4.4.3	GHG emissions	74
4.4.4	Road transportation sector	74
4.4.5	Electricity sector	75
4.5	Sensitivity analysis on EVS	76
4.6	Comparison to previous studies	77
4.7	Conclusion	77
4.8	Appendix	78
4.9	References	81
5	Conclusion	82
6	Annexes	84
6.1	Explication du processus de <i>mass-compounding</i>	84
6.2	Formules de calcul de puissance requise pour la traction d'un véhicule	85
6.3	Exemple de <i>performance map</i> d'un moteur à combustion interne	87
6.4	Formule de calcul du RPE de Lindgren	87
6.5	Groupes de composants communs aux véhicules ICVs et EVs	88
6.6	Paramètres techno-économiques des véhicules électriques dans les modèles suivant l'approche TIMES	89
6.7	Liste des paramètres et résultats de TVSim	90

6.8	Architectures de véhicules électriques représentées dans TVSim	97
6.9	Composants représentés dans TVSim	98
6.10	Cycles de conduite représentés dans TVSim	98
6.11	Calcul des tailles et masses des composants et du véhicule	99
6.12	Détermination des paramètres P^{k*} et EL_k	107
6.13	Détermination de la consommation des véhicules	109
6.14	Paramètres utilisés pour la validation de TVSim	120

Liste des tableaux

3.1	Stratégie de contrôle représentée dans TVSim	44
3.2	Résultats de la modélisation et simulation d'un petit véhicule BEV par TVSim, et comparaison aux données constructeur	63
3.3	Valeurs moyennes mensuelles de la masse volumique de l'air et de la consom- mation des accessoires d'un petit véhicule, à Montréal	64
4.1	List of the different EVs considered in TIMES-Canada for road transportation. .	80
4.2	List of the different charging stations considered in TIMES-Canada.	80
4.3	GHG emission reduction targets per province and territory, together with the reference year.	80
6.1	Listes des composants communs aux IVCs et EVs	88
6.2	Liste des paramètres techno-économiques des véhicules électriques requis par les modèles TIMES	89
6.3	Liste des composants représentés dans le modèle TVSim	98
6.4	Cycles de conduite représentés dans TVSim	98
6.5	Paramètres utilisés pour la validation de TVSim provenant de l'ANL (2011) . .	120
6.6	Paramètres utilisés pour la validation de TVSim provenant de Simpson (2005) .	121

Liste des figures

3.1	Schématisation du fonctionnement du modèle TVSim	34
3.2	Illustration du processus itératif de <i>mass-compounding</i> mis en place dans TVSim	49
3.3	Résultats de simulation des modèles Autonomie et TVSim	58
3.4	Énergie moyenne consommée par les accessoires et pour la traction d'un petit véhicule à Montréal, selon le mois de l'année (modélisé avec TVSim)	64
4.1	Simplified representation of the RES of each province and territory.	70
4.2	The RES of the transportation sector.	71
4.3	(a) Demands for passenger transportation per category, 2007-2050. (b) Demands for freight transportation per category, 2007-2050.	72
4.4	Primary energy supply by fuel in the baseline scenario, 2007-2050.	72
4.5	Primary energy supply by energy source in the baseline (BAU), climate policy (CLIM) and energy policy (EVP) scenarios, 2007-2050.	73
4.6	Final energy consumption by fuel in the baseline scenario, 2007-2050.	73
4.7	Final energy consumption by fuel in the baseline (BAU), climate policy (CLIM) and energy policy (EVP) scenarios, 2007-2050.	73
4.8	Final energy consumption by fuel in the transport sector, for the baseline scenario, 2007-2050.	73

4.9	Final energy consumption by fuel in the transport sector in the baseline (BAU), climate policy (CLIM) and energy policy (EVP) scenarios, 2007-2050.	74
4.10	Canadian GHG emissions in the baseline (BAU), climate policy (CLIM) and energy policy (EVP) scenarios, 2007-2050.	74
4.11	Penetration of passenger vehicles in the baseline scenario, 2007-2050.	74
4.12	Penetration of passenger vehicles in the energy policy scenario, 2007-2050. . .	75
4.13	Penetration of passenger vehicles in the climate policy scenario, 2007-2050. . .	75
4.14	Electricity generation by fuel in the baseline scenario, 2007-2050.	76
4.15	Electricity generation by fuel in the baseline (BAU), climate policy (CLIM) and energy policy (EVP) scenarios ; 2007-2050.	76
4.16	(a)Penetration of passenger vehicles in the climate policy scenario. (b) Penetration of freight vehicles in the climate policy scenario.	76
4.17	2050 investment costs ratio of alternative vehicles over the ones of conventional vehicles.	77
4.18	RES for passenger transportation by small cars. Part 1.	78
4.19	RES for passenger transportation by small cars. Part 2.	79
6.1	Schématisation du processus de <i>mass-compounding</i>	85
6.2	Exemple de <i>performance map</i> d'un moteur à combustion interne	87
6.3	Architectures de véhicules électriques représentées dans TVSim	97

Liste des abréviations

ADVISOR :	ADvanced VehIcle SimulatOR
AIE :	Agence Internationale de l'Énergie
ANL :	Argonne National Laboratory
BEV :	Battery Electric Vehicle
CanESS :	Canadian Energy System Simulator
COV :	Composé Organique Volatile
CO ₂ :	Dioxyde de carbone
E2G :	Énergie et Environnement au GERAD
EDGE-CA :	Electricity Dispatch model for Greenhouse gas Emissions in CALifornia
EPA :	Environmental Protection Agency
EPPA :	Emissions Prediction and Policy Analysis
ETSAP :	Energy Technology system Analysis Program
FCEV :	Fuel Cell Plug-in Hybrid Electric Vehicle
FCV :	Fuel Cell Vehicle
GCAM :	Global Change Assessment Model
GES :	Gas à Effet de Serre
GIEC :	Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat
GMP :	Groupe Moto-Propulseur
REET :	Greenhouse gases Regulated Emissions and Energy Use in Transportation Model
HEV :	Hybrid Electric Vehicle
HFCV :	Hybrid Fuel Cell Vehicle
ICV :	Internal Combustion Vehicle
Li-Ion :	Lithium-Ion

LP :	Lumped Parameter
MARKAL :	MARKet ALocation model
MIT :	Massachussets Institute of Technology
MtCO ₂ :	Million de tonnes de CO ₂
N :	Newton
NREL :	National Renewable Energy Laboratory
NiMH :	Nickel Metal Hydride
NO _x :	Oxyde d'azote
OCDE :	Organisation de Coopération et de Développement Économique
OMEGA :	Optimization Model for reducing Emissions of Greenhouse gas for Automobile
OTA :	Office of Technology Assessment
PAMVEC :	Parametric Analytical Model of Vehicle Energy Consumption
PIB :	Produit Interieur Brut
PHEV :	Plug-in Hybrid Electric Vehicle
Pkm :	Passagers-kilomètre
PNNL :	Pacific Northwest National Laboratory
RPE :	Retail Price Equivalent
Tkm :	Tonnes-kilomètre
TIMES :	The Integrated MARKAL-EFOM System
TVSim :	TIMES Vehicle Simulation
UKTCM :	United Kingdom Transport Carbon Model

Remerciements

J'adresse tout d'abord mes remerciements à mes deux directeurs de mémoire : Prof. Olivier Bahn et Prof. Jean-Philippe Waaub, pour leurs conseils et soutien tout au long de la rédaction de mon mémoire. Je tiens également à remercier l'ensemble du personnel administratif du GERAD (Francine Benoit, Carole Dufour, Pierre Girard, Marilyne Lavoie, Valérie Leblanc et Marie Perrault), qui font de ce centre un environnement agréable et propice à la recherche et à l'apprentissage, ainsi que les membres de l'équipe E2G, et spécialement ma collègue Camille Fertel pour sa disponibilité et ses conseils. Enfin, je tiens à remercier particulièrement mes parents : Jean-Henry et Annie Marcy, qui nous ont transmis leur amour de la connaissance et nous ont toujours encouragés et donnés les moyens de faire des études supérieures.

Je dédie ce mémoire à

mes parents Annie et Jean-Henry Marcy,

mes frères Boris Mercier et Philippe-Henry Marcy,

ma belle-soeur Céline Lambert,

mes neveux Yannis et Johan Mercier,

aux membres de l'équipe E2G,

à tous les membres de mon association AfrikaWaly, puisqu'ensemble nous travaillons pour garantir le droit d'accès à l'éducation à des communautés qui en sont actuellement privées.

Note aux lecteurs

Le chapitre 4 de ce mémoire est un article co-écrit avec d'une part mes deux co-directeurs, Prof. Olivier Bahn (GERAD-E2G et MQG, HEC Montréal) et Prof. Jean-Philippe Waaub (GERAD - E2G et Département de Géographie, UQAM), et d'autre part Kathleen Vaillancourt (Professionnelle de recherche au GERAD - E2G).

J'ai contribué au développement du modèle TIMES-Canada en modélisant les secteurs de la génération d'électricité et des transports électriques. Pour ce dernier secteur, j'ai développé un modèle de simulation de véhicules, TVSim (TIMES Vehicle Simulation), afin de produire les bases de données de véhicules électriques qu'utilisent les modèles suivant l'approche TIMES, et particulièrement TIMES-Canada. Les bases de données de TIMES-Canada étant continuellement mises à jour, nous avons choisi de présenter dans ce mémoire la dernière version (juin 2013) du modèle TVSim. Il faut noter cependant que la base de données de véhicules électriques utilisée pour notre article correspond à une version précédente de TVSim. De plus, faute de place, TVSim n'est pas présenté dans l'article, mais fait l'objet d'une présentation détaillée dans le chapitre 3 de ce mémoire.

Dans l'article, les sections 1 (Introduction), 2.3 (Modelling of the Canadian road transport sector), 5 (Sensitivity analysis on EVs), 6 (Comparison to previous studies) et 7 (Conclusion) ont été rédigées par Olivier Bahn et moi-même. Les sections 3 (Scenarios characterization) et 4 (Scenario analysis) sont le fruit d'un travail conjoint des quatre co-auteurs. La première rédaction des sections 2.1 (Overview of TIMES) et 2.2 (Overview of TIMES-Canada) est l'oeuvre de Kathleen Vaillancourt. Finalement, la révision de l'article dans son intégralité a été réalisée conjointement par les quatre auteurs.

L'article (Electrification of the Canadian Road Transportation Sector : A 2050 Outlook with TIMES-Canada) va paraître dans la revue Energy Policy en version papier (disponible en ligne depuis le 14 août 2013).

Chapitre 1

Introduction

Dans un contexte de lutte contre les changements climatiques, la nécessité de réduire les émissions de GES constitue un défi majeur pour les gouvernements et institutions intergouvernementales. De par sa forte dépendance aux combustibles fossiles, le secteur des transports canadiens est l'un des plus gros émetteurs de gaz à effet de serre (GES) du pays (Environnement Canada, 2012), et offre en conséquent l'un des plus forts potentiels de réduction de ces émissions. L'exploitation de ce potentiel passe en partie, par l'utilisation de sources d'énergie alternatives peu ou non émettrices de GES. Cependant, dans la mesure où la contribution du secteur énergétique à la croissance économique canadienne est relativement importante, la conciliation des intérêts économiques, politiques et environnementaux se révèle être un véritable défi pour les institutions. L'enjeu est de proposer des solutions efficaces sur le plan environnemental (lutte contre les changements climatiques) et viables sur les plans économique et politique. La planification énergétique est ainsi appelée à jouer un rôle primordial dans la définition des stratégies énergétiques gouvernementales

1.1 Contexte énergétique et environnemental

Les conditions actuelles de gestion des ressources énergétiques peuvent avoir des conséquences potentiellement irréversibles sur l'environnement, et devraient donc être prises en compte au moins au même titre que les autres enjeux. D'après les experts du GIEC¹, la température moyenne terrestre a augmenté de près de 0,6°C depuis 1976 (GIEC, 2007). Cependant, les manifestations du réchauffement climatique ne sont pas homogènes. Certaines zones géographiques et pays sont plus exposés aux variations de températures et à leurs conséquences. Le Canada fait partie des pays les plus touchés par ce phénomène : la température canadienne moyenne a augmenté de 1,4°C entre 1948 et 2009 (Statistiques Canada, 2011). En effet, cette tendance est exacerbée dans les régions nordiques canadiennes : dans le Grand Nord, le Yukon et les montagnes du Nord de la Colombie Britannique, le réchauffement climatique a atteint 2,2°C durant la même période (Statistiques Canada, 2011).

Les émissions de gaz à effet de serre sont les premières responsables du réchauffement climatique. Toujours selon les experts du GIEC, si la demande mondiale en énergie poursuit son évolution actuelle selon les tendances démographiques et la croissance économique, alors l'augmentation des températures devrait être de l'ordre de 6,4°C d'ici la fin du siècle. Or, éviter des changements climatiques trop drastiques nécessiterait de limiter la hausse des températures à 2°C d'ici la fin du siècle, en réduisant les émissions de GES d'au moins 50% d'ici 2050, par rapport à leur niveau de 1990 (GIEC, 2007).

Il est donc nécessaire de réduire les émissions de GES provenant du secteur de l'énergie, afin de limiter le réchauffement climatique. De nombreux pays, dont le Canada, ont déjà pris des mesures permettant de s'engager dans un tel processus de décarbonisation du secteur énergétique.

1. Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat

1.2 L'importance du secteur du transport routier

Au niveau mondial, le secteur du transport contribue fortement au réchauffement climatique. En 2010, il émettait près de 21% des émissions globales de CO₂ issues de la combustion de carburants fossiles (soit 6 755,81 MtCO₂ ; AIE, 2012a) et consommait plus de 62% de la demande de produits pétroliers (AIE, 2012b). Cette tendance est plus marquée au Canada, où ce secteur était responsable de plus de 31% des émissions de CO₂ issues de la combustion de carburants fossiles à l'échelle du pays, dont 82% étaient attribuables au transport routier (AIE, 2012a). Ce secteur est caractérisé par sa très forte dépendance aux produits pétroliers : ils représentaient près de 98% des carburants utilisés pour alimenter les véhicules routiers canadiens en 2010 (contre 96% pour l'ensemble des pays de l'OCDE, et 95% à l'échelle mondiale, AIE, 2012b).

Le secteur du transport routier devra donc jouer un rôle décisif dans la transition vers un secteur énergétique moins émetteur. Cette transition peut s'opérer d'une part par une réduction de la demande de transport (principalement en termes de passagers-km, ou tonnes-km). Dans cette perspective, certaines actions ont déjà été entreprises au Canada, telles qu'encourager le télétravail, le covoiturage, ou favoriser l'utilisation des transports en communs (Transport Canada, 2010). Par ailleurs, une transition vers des technologies plus propres permettrait de réduire la consommation de produits pétroliers de ce secteur.

1.3 De nouvelles technologies pour le transport routier

De nouvelles technologies et procédés sont développés pour réduire la consommation et les émissions de GES des véhicules conventionnels (ICV²) alimentés aux carburants fossiles. Ainsi, à titre d'exemple, nous pouvons mentionner l'utilisation de matériaux plus légers dans la fabrication des carrosseries qui permet de réduire la masse totale du véhicule, et par conséquent

2. De l'anglais : Internal Combustion Vehicle, fait référence aux véhicules équipés de moteur à combustion interne

sa consommation. Le système stop & start permettrait également de réduire la consommation et les émissions de GES des véhicules conventionnels de 15% en conditions de conduite urbaine (Centre d'Analyse Stratégique, 2011). Dans la même optique, les constructeurs cherchent en permanence à améliorer l'efficacité des différents composants, ou à en développer de nouveaux, afin de limiter les pertes d'énergie.

Parallèlement, une grande partie de la recherche et développement est consacrée à la mise au point de nouvelles technologies de véhicules utilisant des carburants dits non conventionnels ou alternatifs, plus propres que les carburants fossiles (électricité, biocarburants, hydrogène). Grâce à d'abondantes ressources renouvelables, le Canada pourrait produire ce type de carburants. Le déploiement de ces technologies alternatives sur le marché canadien permettrait d'une part de réduire la consommation de pétrole, et par la même occasion de diminuer les émissions de GES. Notre étude se concentre essentiellement sur les véhicules électriques : tout électrique (BEV) et hybride électrique rechargeable (PHEV), ces véhicules sont présentés en détails dans la section 3.2. Nous considérons également d'autres types de véhicules alternatifs : des hybrides conventionnels (HEV), des véhicules conventionnels (ICV) alimentés par des biocarburants ou de l'hydrogène sous forme liquide, ainsi que des véhicules équipés de piles à combustible alimentés par de l'hydrogène sous forme gazeuse.

1.4 Le rôle des politiques gouvernementales

Bien que ces technologies représentent d'excellentes alternatives aux véhicules conventionnels alimentés par des carburants fossiles pour réduire les émissions de GES, leur coût d'investissement élevé représente souvent un frein à leur adoption. Le choix des consommateurs étant principalement orienté par le retour sur investissement à court terme, il ne tient pas compte des externalités sociales et environnementales liées à l'achat de différentes technologies de vé-

hicules. Les gouvernements doivent compenser les imperfections du marché en instaurant des politiques et mesures favorisant l'atteinte d'objectifs énergétiques et climatiques plus larges. Par exemple, le gouvernement fédéral canadien, ainsi que plusieurs gouvernements provinciaux se sont fixés des objectifs de réduction d'émissions de gaz à effet de serre, d'ici 2020, suivant les recommandations de l'accord de Copenhague (les détails de ces politiques climatiques sont présentés dans la section 4.8.4). D'autres types de politiques spécifiques ont également été adoptés par les différents gouvernements provinciaux dans le but d'atteindre leurs objectifs, dont des mesures concernant le secteur du transport. Le gouvernement québécois s'est fixé pour objectif d'obtenir un parc automobile constitué de 5% de véhicules électriques d'ici 2020.

Les gouvernements disposent d'une vaste gamme d'instruments pour favoriser l'atteinte de ces objectifs. Certains sont légaux et réglementaires, éducationnels, économiques ou technologiques, etc. Les mesures les plus drastiques sont généralement imposées aux constructeurs sous la forme de normes et standards technologiques (par exemple, la réduction de la masse des véhicules, et la généralisation des véhicules équipés de filtres à particules dans l'Union Européenne [Centre d'Analyse Stratégique, 2011]). Des mesures existent aussi pour orienter le choix du consommateur vers des technologies plus propres, en jouant sur le facteur économique avec des incitatifs à l'achat (par exemple, le Québec offre un rabais allant de 4 500\$ à 8 000\$ à l'achat de certains véhicules électriques) ou des taxes supplémentaires sur les véhicules fortement émetteurs (comme la taxe sur les émissions de CO₂ - malus automobile - appliquée à la vente de véhicules en France), etc.

La responsabilité d'encadrer et de favoriser le processus de décarbonisation du secteur du transport routier, incombe donc aux gouvernements par l'imposition de mesures adaptées. Il est primordial pour les institutions gouvernementales d'identifier quelles mesures et technologies favoriseraient le mieux l'atteinte de leurs objectifs énergétiques et climatiques. Un grand nombre d'outils d'aide à la décision ont été développés pour conduire des analyses politiques ou technologiques, à l'échelle d'un pays (ou région), du secteur énergétique ou plus spéci-

quement d'un sous-secteur de ce dernier (transport, électricité, etc.). Par exemple, le modèle TIMES-Canada (voir section 4.2 [Kanudia et al., 2005]) représente le système énergétique canadien dans son intégralité, et a été développé afin de permettre un vaste éventail d'analyses politiques, technologiques, etc. de ce secteur.

1.5 Question de recherche

L'objectif de notre travail est d'analyser et de comparer, à l'aide du modèle TIMES-Canada, les effets à long terme d'une politique climatique et d'une politique énergétique, en considérant en particulier différents scénarios d'évolution des véhicules électriques et leur déploiement potentiel sur le marché canadien.

La qualité de ces analyses repose en grande partie sur la qualité et la précision des données techno-économiques qu'utilise TIMES-Canada (principalement les données sur les véhicules électriques). La construction de bases de données prospectives est une tâche délicate, particulièrement lorsqu'il s'agit de technologies encore en développement telles que les véhicules électriques. En effet, les données disponibles dans la littérature ne couvrent que partiellement les besoins des modèles suivant l'approche TIMES, et sont déterminées en fonction d'un ensemble d'hypothèses sur l'évolution des différents éléments clefs (comme les batteries électriques), hypothèses qui varient d'une source à l'autre. Il existe des modèles de simulation pour prévoir l'évolution des caractéristiques techno-économiques des véhicules ; mais jusqu'à présent aucun n'avait été développé pour prévoir spécifiquement l'évolution des paramètres nécessaires aux modèles TIMES. Nous avons conçu TVSim, un modèle simple de simulation de véhicules électriques, afin qu'il soit utilisé comme outil unique pour fournir les données relatives aux technologies de véhicules représentées selon l'approche TIMES (consommation, coût d'investissement, coût d'opération et de maintenance, etc.). La présentation du modèle TVSim et son adaptation au contexte canadien font l'objet d'un chapitre de ce mémoire.

Les bases de données de véhicules électriques utilisées dans notre article³ pour l'analyse de politiques climatique et énergétique canadiennes, ont été générées à l'aide de TVSim. La politique climatique consiste à respecter les cibles de réduction d'émissions de GES fixées par les différents gouvernements fédéral et provinciaux canadiens, alors que la politique énergétique impose le taux de pénétration minimal de véhicules électriques, que s'est fixé le Québec comme objectif, à chaque province et territoire canadien. Plus précisément, nous évaluons quelles seraient les transformations requises au sein du secteur énergétique canadien pour atteindre les cibles de réduction d'émissions de GES, en analysant plus particulièrement la contribution des véhicules électriques à l'atteinte de ces objectifs. Ces résultats sont ensuite comparés avec les effets de la politique énergétique, et en particulier les effets sur les émissions de GES. Nous examinons également l'impact de l'évolution technologique des véhicules électriques sur leur déploiement possible, en testant différents scénarios d'évolution.

1.6 Plan du mémoire

Le chapitre 2 de ce mémoire est consacré à une revue de littérature sur les modèles de simulation des caractéristiques de véhicules existants, et sur les études précédentes sur le déploiement des véhicules alternatifs. Notre modèle TVSim est présenté au chapitre 3, suivi au chapitre 4 de l'article intitulé "Electrification of the Canadian Road Transportation Sector : A 2050 Outlook with TIMES-Canada". Enfin, le chapitre 5 présente la conclusion ce mémoire.

3. "Electrification of the Canadian Road Transportation Sector : A 2050 Outlook with TIMES-Canada" présenté au chapitre 4

1.7 Références

AIE (2012a). “CO2 emissions by product and flow”. IEA CO2 Emissions From Fuel Combustion Statistics (database). International Energy Agency. Doi : 10.1787/data-00430-en.

AIE (2012b). “World Energy Balances”. International Energy Agency. IEA World Energy Statistics and Balances (database). Doi : 10.1787/data-00512-en.

Centre d'Analyse Stratégique (2011). “La voiture de demain : carburants et électricité”. Documentation Française, Ref : 9782110087386.

Environnement Canada (2012). “Tendances en matière d'émissions au Canada 2012”. Catalogue No. En84-83/2012F-PDF.

GIEC (2007). “Bilan 2007 des changements climatiques”. Contribution des Groupes de travail I, II et III au quatrième Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat.

Kanudia, A., Labriet M., Loulou R., Vaillancourt K., Waaub J.-P. (2005). “The World - Markal Model and its application to cost-effectiveness, permit sharing and cost-benefit analyses”. Publié dans 'Energy and environment', Loulou, Waaub, Zaccour (Éd.). Springer Science, New-York, USA.

Statistiques Canada (2011). “EnviroStats, Tendances de la température au Canada”. Catalogue No. 16-002-X. Vol 5 n°1.

Transport Canada (2010). “écoMOBILITÉ : Rapport annuel 2008 - 2010”. Catalogue No. T40-2/2010F-PDF.

Chapitre 2

Revue de littérature

En planification énergétique, la précision et la qualité des résultats obtenus sont principalement déterminées par le choix du modèle et des données techno-économiques utilisés. Ce choix est généralement guidé par un compromis entre complexité et niveau de détail souhaité.

Dans ce chapitre, nous présenterons un certain nombre d’approches de modélisation des caractéristiques de véhicules individuels, puis nous passerons en revue les catégories de modèles de planification énergétique représentant différentes technologies de véhicules à l’échelle du parc automobile de la région modélisée, afin de situer les modèles TVSim et TIMES-Canada. Différentes études réalisées à travers le monde sur le déploiement des véhicules alternatifs et utilisant ces outils d’analyse seront également présentés.

2.1 Modèles de simulation des caractéristiques des véhicules

Il existe un grand nombre d’alternatives technologiques pour les véhicules routiers. Parmi elles, les véhicules conventionnels (ICV) alimentés au diesel, à l’essence ou au biocarburants, les véhicules électriques (BEV, PHEV), etc. Il est essentiel de pouvoir comparer ces alternatives technologiques entre elles, afin d’identifier celles qui permettront au secteur du transport

roumier de relever les défis auxquels il est confronté. L'analyse technologique est généralement construite sur des critères d'ordre technique (efficacité, consommation, durée de vie, etc.), et économiques (coût d'investissement, coûts d'opération et de maintenance, etc.).

Bien que les informations sur les technologies de véhicules matures (comme les ICVs) abondent dans la littérature, de telles informations sont plus rares et disparates en ce qui concerne les véhicules alternatifs. Le recours aux seules données disponibles dans la littérature introduirait un biais dans l'analyse technologique, car elles sont souvent estimées selon des hypothèses (particulièrement lorsqu'elles sont prospectives) qui varient d'une source à l'autre. Pour contourner ce problème, des modèles de simulation des caractéristiques des véhicules ont été développés afin de fournir des données cohérentes et comparables sur différents types de véhicules. Ils sont caractérisés par leur niveau de précision, la flexibilité laissée à l'utilisateur, leur complexité, et essentiellement par les différentes approches de modélisation qu'ils suivent. Le choix d'un outil est orienté par les besoins d'analyses (un modèle détaillé sera préférable pour une analyse technologique, alors qu'un modèle moins complexe sera choisi pour une analyse économique).

Nous présenterons dans cette section les approches de modélisation du groupe motopropulseur¹ (GMP) des véhicules (dites 'explicite' et 'implicite'), de détermination de la consommation (approche par modélisation dynamique, approche paramétrique), puis les approches de détermination des coûts.

2.1.1 Modèles de détermination des caractéristiques du GMP

La composition du GMP (modèles et tailles de composants) du véhicule et ses performances (accélération, vitesse maximale, autonomie, etc.) influencent fortement sa consommation ainsi que ses coûts. Il existe deux approches de modélisation de la composition du GMP et des performances d'un véhicule : l'approche implicite qui détermine les caractéristiques des composants

1. En anglais *powertrain*, ensemble des éléments permettant la traction d'un véhicule ; comme typiquement pour un véhicule BEV : la transmission, le moteur électrique, l'électronique de puissance et la batterie électrique

en fonction des performances souhaitées, et l'approche explicite qui détermine les performances du véhicule selon la composition du GMP du véhicule. La détermination de la composition du GMP d'un véhicule est souvent guidée par un compromis entre ses performances et sa consommation. Ces deux éléments sont fortement liés entre eux par la masse totale du véhicule (qui est égale à la somme des masses des éléments qui la composent). La masse d'un composant est généralement proportionnelle à ses performances (puissance, capacité, etc.), dont dépendent les performances du véhicule. La consommation d'un véhicule étant proportionnelle à sa masse, elle est donc fortement influencée par ses performances et sa composition. Les deux approches de modélisation de véhicules sont présentées ci-dessous.

Approche implicite

Les modèles suivant l'approche implicite sont généralement utilisés pour des analyses économiques, politiques ou technologiques à grande échelle. Les performances désirées sont définies par l'utilisateur, et les tailles des composants sont calculées de manière à satisfaire ces performances. Ces modèles fournissent une configuration 'idéale' de la composition d'un véhicule, qui permettrait d'atteindre des performances cibles. Cependant, cette configuration est une simplification de la réalité. Les modèles suivant une approche implicite utilisent un processus récursif pour déterminer la taille des différents composants, communément appelé '*mass-compounding*' (ce processus est présenté plus en détails à l'annexe 6.1).

Par exemple, le modèle PAMVEC (Simpson, 2005), suit l'approche implicite de modélisation de véhicules. L'utilisateur fournit au modèle les valeurs des performances du véhicule qu'il souhaite simuler : accélération, vitesse de pointe, pente, autonomie (ces performances sont définies dans la section 3.2.2) ; PAMVEC calcule ensuite les puissances et/ou capacités des différents composants du véhicule. L'architecture de chaque type de véhicule représenté (ICV, PHEV-série, PHEV-parallèle, BEV, FCV, HFCV) est prédéfinie dans le modèle. L'utilisateur n'a donc pas la flexibilité de choisir le type ou le nombre des éléments composant le GMP du véhicule,

ni leur disposition. Le modèle PAMVEC est implémenté dans un fichier Excel, et est très facile à utiliser.

Ces modèles sont relativement simples à utiliser et ne requièrent pas de grandes connaissances techniques. Cependant, le niveau de précision qu'ils offrent est limité par l'utilisation de "technologies génériques" pour les composants. Ceux dont les tailles sont déterminées, ne coïncident bien souvent pas avec des modèles de composants réels, ayant des tailles bien définies. Ainsi, les modèles suivant l'approche implicite sont des outils particulièrement adaptés à toute sorte d'analyses générales (économique, politique, etc), mais inadaptés aux études technologiques précises (sur un composant ou le fonctionnement d'un type de véhicule particulier, par exemple).

Approche explicite

Cette approche est généralement adoptée dans les outils de design de véhicules utilisés par des professionnels du secteur automobile, pour prévoir les performances de véhicules en développement ou des prototypes. Les tailles des composants sont définies par l'utilisateur (souvent choisis dans une base de données de composants existants), et les performances du véhicule sont simulées et déterminées en fonction de ces composants. Cette approche nécessite une représentation détaillée des différents composants, et donc un grand nombre de paramètres.

Par exemple, le modèle développé par Delucchi (2002) et les modèles ADVISOR (Wipke et al., 1999 ; Markel et al., 2002) et Autonomie (Argonne National Laboratory, 2011a & 2011b) suivent l'approche explicite de définition des composants. Ces deux derniers modèles ont été développés en MATLAB/Simulink par le Laboratoire National d'Énergie Renouvelables (NREL) et le Laboratoire National d'Argonne (ANL), respectivement. Ils permettent aux utilisateurs de créer virtuellement l'architecture de véhicule de leur choix, en utilisant des technologies de composants représentées dans leurs propres bases de données, ou en spécifiant de nouveaux composants ; puis de tester les performances de ces véhicules virtuels. Par exemple, Gao (2005) utilise ADVISOR pour modéliser l'architecture de quatre différents véhicules hybrides, puis tes-

ter et comparer entre autres leurs performances.

Cependant, certains modèles suivant l'approche explicite, comme ADVISOR et Autonomie, offrent également la possibilité de prévoir la taille des composants, grâce à un module "*d'auto-sizing*". Ainsi, Graham (2001) a utilisé ADVISOR pour déterminer les tailles de différents composants (moteur à combustion, moteur électrique, batterie électrique, etc.) de plusieurs véhicules hybrides. Moawad et al. (2012) étudient l'évolution des tailles des composants dont sont équipés plusieurs types de véhicules conventionnels et alternatifs, jusqu'en 2045, grâce au modèle Autonomie.

Les modèles suivant l'approche de modélisation explicite fournissent des estimations précises et détaillées des performances ou de la composition d'un véhicule. Ils sont néanmoins relativement complexes, et nécessitent de bonnes connaissances mécaniques pour déterminer correctement quels composants choisir et leurs tailles, et ainsi être utilisés efficacement. Ce sont des outils peu adaptés à l'analyse économique ou politique, qui ne nécessitent pas une représentation très détaillée des véhicules.

2.1.2 Modèles de détermination de la consommation

Une fois la composition du GMP et les performances du véhicule déterminées, en suivant une approche implicite ou explicite, sa consommation est calculée à partir d'une simulation de conduite. L'énergie requise par le véhicule pour fournir la puissance nécessaire à sa traction durant la conduite et alimenter ses accessoires est calculée en suivant les formules physiques de base (ces formules sont présentées en annexe 6.2). Il existe deux approches de simulation de la consommation : l'approche dynamique qui simule le fonctionnement d'un véhicule dans son intégralité seconde après seconde en suivant un cycle de conduite, et l'approche paramétrique qui calcule la consommation moyenne en utilisant des données empiriques sur la mécanique du véhicule.

Approche de simulation dynamique

L'approche par simulation dynamique consiste à simuler la conduite d'un véhicule de façon dynamique selon un cycle de conduite, en calculant pour chaque unité temporelle les flux (de puissance et d'énergie), ainsi que les pertes d'énergie, à travers l'ensemble de la mécanique du véhicule (GMP plus accessoires). Les outils suivant cette approche représentent l'architecture d'un véhicule avec un grand niveau de détails.

Cette approche permet de modéliser les synergies entre les différents composants, ainsi que les effets dynamiques, comme par exemple la détermination de l'efficacité d'un moteur à combustion interne tout au long de la simulation de conduite. La plupart des modèles suivant l'approche de simulation dynamique comprennent des sous-modèles permettant de simuler et parfois d'optimiser le fonctionnement de chaque composant, utilisent des "*performances maps*" pour déterminer de façon dynamique les valeurs de certains paramètres (un exemple de "*performance map*" indiquant l'efficacité d'un moteur à combustion interne, selon la vitesse et le couple du moteur est présenté à l'annexe 6.3). Les effets dynamiques sont particulièrement importants dans la détermination de la consommation des véhicules hybrides, car les possibilités de flux d'énergie y sont bien plus importantes que dans les véhicules n'utilisant qu'une seule source d'énergie. Ces flux d'énergie, ainsi que l'opération des différents composants des véhicules hybrides sont régulés par des algorithmes que l'on appelle "stratégies de contrôle". L'approche dynamique permet de modéliser ces stratégies de contrôle et ainsi de contrôler l'utilisation des différentes sources d'énergie, à travers un modèle de simulation de véhicules.

L'approche par simulation dynamique est la plus utilisée dans les modèles de simulation de véhicules, elle est employée dans le modèle ADVISOR (Wipke et al., 1999 ; Markel et al., 2002), le modèle Autonomie (Argonne National Laboratory, 2011a & 2011b), le modèle de Delucchi (2000), etc. Les outils utilisant cette approche produisent les estimations les plus précises et les plus détaillées. De part leur précision, ils peuvent être utilisés dans une très vaste gamme d'études, comme par exemple :

- l’optimisation du design de composants au sein d’un véhicule (Freyermuth et al., 2008),
- l’estimation de l’impact d’une ou plusieurs technologies de composant sur la consommation d’un véhicule (Moawad et al., 2012),
- l’optimisation de stratégies de contrôle des composants (Kim et Rousseau, 2011),
- l’étude des interactions et synergies entre les différents composants (Burke et Zhao, 2010),
- l’étude d’attraction des différents types de véhicules (Graham, 2001).

Nous présentons plus en détail le modèle Autonomie, dont la structure a influencé la conception du modèle TVSim. Autonomie est certainement le modèle de simulation de véhicule le plus précis actuellement sur le marché. Il a été conçu dans le but d’être utilisé comme outil unique à travers l’ensemble du processus de développement : du processus de design à l’analyse technologique, en passant par les procédures de test et contrôle. Il est l’un des rares à offrir non seulement la possibilité de simuler la conduite d’un véhicule en conditions climatiques extrêmes, mais également de déterminer les différents coûts des véhicules (coût d’investissement, coûts d’opération et de maintenance, etc.) et en prévoir l’évolution jusqu’en 2045. Le modèle Autonomie est utilisé dans les études menées pour le département de l’Énergie du gouvernement américain. Il a par exemple été utilisé dans une vaste étude sur l’évolution des véhicules aux États-Unis, afin de déterminer quelles alternatives technologiques permettront de réduire la consommation de carburants, et offriront les meilleurs rapports coûts / consommation d’énergie à court, moyen et long termes (ANL, 2011b ; Moawad et al., 2012).

Les modèles suivant l’approche de simulation dynamique offrent des estimations d’une très grande précision et sont fidèles à la réalité. Cependant, le nombre de calculs et de paramètres requis est également très élevé (par exemple, ADVISOR comprend plus de 300 paramètres). Leur précision en font des outils particulièrement adaptés à l’analyse technologique. Mais, leur structure complexe les rendent inadaptés à l’analyse économique, politique ou de planification du secteur énergétique, qui requiert des données moins précises. D’autres méthodes ont été

développées afin de simplifier ces calculs. L'approche paramétrique² offre un compromis entre le niveau de complexité des calculs, la représentation des différents éléments et la précision des résultats obtenus.

Approche paramétrique

L'approche paramétrique est une approche analytique qui s'appuie sur des relations empiriques et d'équilibre d'énergie, et utilise des données disponibles dans la littérature relative aux différents composants. Les modèles suivant l'approche paramétrique représentent de manière simplifiée l'architecture et le fonctionnement des véhicules. Les différents composants y sont représentés de manière statique, leur fonctionnement n'est pas modélisé et simulé ; pas plus que les flux (d'énergie et de puissance), ou les stratégies de contrôle. Par exemple, un modèle paramétrique utilisera une valeur moyenne pour l'efficacité d'un moteur à combustion, tout au long du processus de simulation de conduite, et ne prendra pas en compte l'impact d'autres éléments sur cette efficacité (comme la vitesse du moteur et le couple moteur). Ainsi, les modèles paramétriques ne capturent ni les effets dynamiques, ni la dynamique des flux au sein d'un véhicule. Ces limites en font des outils peu adaptés à l'étude détaillée du fonctionnement des véhicules, ou au processus de design d'un véhicule. Cependant, l'utilisation de relations empiriques, parfois très détaillées, pour modéliser les pertes d'énergies (au niveau des composants, du freinage, etc.), en font des outils plutôt adaptés à l'analyse technologique à grande échelle (par exemple, pour l'étude de la composition d'un parc automobile). Parmi les modèles suivant cette approche, nous pouvons citer le modèle PAMVEC et le modèle LP.

Simpson (2005) a opté pour une approche paramétrique pour son modèle PAMVEC, qui utilise pour chaque cycle de conduite représenté, les paramètres descriptifs suivants : la vitesse moyenne, le rapport de vélocité, la racine moyenne cubique de la vitesse et l'accélération ca-

2. Le terme 'approche paramétrique' est employé dans ce mémoire comme traduction du terme anglais *lumped parameter approach*

ractéristique. Le modèle PAMVEC a été développé dans le but de fournir un outil de prévision précis mais moins complexe que les modèles de simulation dynamique. Il est développé dans un fichier Excel, et est accessible à tous, mais n'offre pas la possibilité de prévoir la consommation des véhicules dans le futur. Une technologie générique est utilisée pour chaque type de composant représenté (moteur-contrôleur électrique, batterie électrique, moteur à combustion ou pile à combustible, transmission, réservoir de carburant). Chacun de ces composants est défini par plusieurs caractéristiques (efficacité, puissance spécifique, etc.), dont il est possible de modifier les valeurs pour représenter différents modèles (les batteries lithium-ion et NiMH n'ont pas la même efficacité par exemple).

D'autres modèles paramétriques ont été développés afin de faciliter la réalisation d'études technologiques et économiques. Par exemple, l'OTA a utilisé un modèle paramétrique pour son étude des différentes options de véhicules (familiaux) en termes de réductions de la consommation et des émissions de GES (OTA, 1995). L'Agence de Protection de l'Environnement américaine (EPA) a également conçu un modèle paramétrique, le modèle LP (EPA, 2012), afin de produire les données sur les différentes technologies de véhicules représentées dans leur modèle OMEGA, utilisé pour identifier quels ensembles de technologies permettraient d'atteindre des cibles de réduction d'émissions de GES, et à quels coûts.

Les modèles paramétriques sont caractérisés par leur simplicité et leur rapidité de développement et d'exécution. Néanmoins, ils s'éloignent de la représentation réaliste de la consommation d'un véhicule, en ne représentant pas la dynamique d'influence qui existe entre la conduite, et les paramètres du véhicule. Bien qu'il n'existe aucune étude quantifiant le taux d'erreur de ces modèles, il serait de l'ordre de 10 à 20% selon Simpson (2005), alors que celui des modèles de simulation dynamique serait plutôt inférieur à 10%. Toutefois, le modèle PAMVEC semble offrir des résultats acceptables, puisque les marges d'erreur observées lors de sa comparaison au modèle ADVISOR étaient de moins de 5% pour les tailles et masses des composants et de moins de 10% pour la consommation.

2.1.3 Modèles de détermination des coûts

Les coûts des véhicules représentent également un paramètre important et souvent pris en compte dans les différentes analyses. Cependant, il existe peu de modèles de simulation de véhicules offrant la possibilité de déterminer leurs coûts. La plupart des auteurs utilisent des approches indépendantes. Les principales sont décrites dans cette section.

Les coûts auxquels nous nous intéressons ici (coût d'investissement d'un véhicule et coût périodique d'opération et de maintenance), sont fortement influencés par l'architecture et les performances du véhicule ainsi que les coûts des composants utilisés. Il existe plusieurs méthodes de détermination de ces coûts. L'une des plus utilisées est l'approche économétrique, qui se base sur des observations et tendances historiques. Elle a notamment été employée par Mohammadian et Miller (2001). Cependant, bien que cette méthode fournisse des estimations de bonne qualité, elle est difficilement envisageable pour prévoir les coûts de nouvelles technologies.

Une alternative efficace, qui ne se heurte pas au problème de rareté des données concernant les nouvelles technologies est la décomposition des coûts par catégories (composants, main d'oeuvre, marge de profits, etc.). Cette méthode permet de déterminer les coûts des véhicules en développement ou fictifs, comme s'ils étaient disponibles sur le marché, ainsi que leur évolution, en fonction de celle de leurs différents éléments et en s'appuyant sur les tailles des composants pour calculer leurs coûts. Nous présentons une première application importante de cette méthode (Lindgren, 1977), puis une seconde (Cuenca et al., 1999) qui correspond à une évolution de la première et dont TVSim est inspiré³.

Lindgren (1977) a développé une méthode permettant de déterminer l'impact qu'aurait sur le prix des véhicules, l'installation de différents systèmes permettant de réduire les émissions de GES. L'approche basée sur la décomposition des coûts, prend en compte les coûts fixes et variables de production, ainsi que les coûts généraux et les marges de profits des différents acteurs

3. Les caractéristiques économiques des technologies représentées dans les modèles suivant l'approche TIMES sont évaluées au coût du marché ; ainsi, les marges de profits sont prises en compte dans TVSim

de la chaîne de production. Cette méthode calcule le RPE⁴ d'un véhicule, soit un équivalent à son prix de vente. Elle est largement utilisée par les organismes de réglementation et par l'industrie. Le RPE correspond à un coût agrégé de tous les systèmes et composants d'un véhicule. Les mêmes taux (de profits, de coûts généraux, etc.) sont utilisés dans les calculs des coûts de tous les composants, afin de ne pas différencier ceux fabriqués à l'interne de ceux vendus par des sous-traitants. Les détails de la méthodologie suivie par Lindgren (1977) sont présentés en annexes 6.4. L'OTA (1995) a adapté la méthode de Lindgren (1977), et développé un outil de détermination de coûts applicable à un grand nombre de véhicules, sur le marché ou en développement, en prenant également en compte les marges de profits.

Cuenca et al. (1999) ont développé une approche de détermination des coûts de production et d'opération des véhicules électriques, s'appuyant également sur celle de Lingren (1977). Cependant, les coûts des véhicules électriques sont calculés à partir des coûts des véhicules conventionnels. Selon les auteurs, les éléments communs entre un véhicule conventionnel et un véhicule électrique similaire, représentent 70 à 80% des coûts de ce dernier (ceux des composants communs aux deux types de véhicules). Puisque les véhicules conventionnels représentent une technologie mature et produite en masse, et que les données sur cette technologie sont abondantes dans la littérature, il est bien plus facile pour les auteurs d'estimer ces coûts communs à partir d'observations de véhicules conventionnels. Les coûts supplémentaires sont ceux de certains composants dont les véhicules conventionnels ne sont pas équipés. La liste détaillée des coûts communs et divergents pris en compte dans leur modèle est présentée en annexe 6.5. Cuenca et al. (1999) considèrent que les composants sont achetés d'un sous-traitant externe. Les coûts d'opération des véhicules électriques sont divisés en deux catégories : les coûts de maintenance et d'énergie, et les coûts de remplacement de la batterie électrique. Comme pour le coût d'investissement, le coût de maintenance est estimé à partir du coût de maintenance des véhicules conventionnels. La méthode développée par Cuenca et al. (1999), a notamment été

4. Acronyme anglais de *Retail Price Equivalent*

utilisée par Graham (2001), afin de fournir une borne inférieure pour le coûts de différents véhicules HEV (la borne supérieure étant calculée en adaptant la méthode de Lindgren, 1977). Graham utilise le modèle ADVISOR pour déterminer les valeurs des tailles des composants qui sont utilisées dans les calculs de coûts.

La méthode de décomposition des coûts fournit des estimations précises et réalistes, même pour des technologies de véhicules encore en développement ou fictives, à partir de leur composition potentielle. Cependant, les valeurs des tailles de composants, qui sont la base des calculs de coûts sont souvent tirées de la littérature ou déterminées à l'aide de modèles indépendants. En effet, très peu de modèles combinent des approches de modélisation de la composition des véhicules et de détermination des coûts. Le modèle Autonomie regroupe, entre autres, ces deux éléments sous une même structure. Il est également l'un des rares modèles à offrir la possibilité de prévoir l'évolution à la fois des composants et des coûts des véhicules. Mais l'approche adoptée par ce dernier n'étant pas publique, elle n'a pas pu être prise en compte dans cette étude. Il existe différentes alternatives pour la prévision de l'évolution des coûts. Par exemple, Kim et al. (1998) utilisent des courbes d'apprentissage pour déterminer l'évolution des différents composants (batterie électrique, moteurs, etc.). Une méthode serait de recalculer les coûts pour chaque année d'étude, en tenant compte de l'évolution des différents composants et des coûts.

L'approche suivie par Cuenca et al. (1999) est très intéressante, car le regroupement de plusieurs coûts en un ensemble fixe propre à chaque catégorie de véhicules simplifie grandement les calculs. Néanmoins, cette approche peut être améliorée, car l'utilisation d'observations de véhicules conventionnels (une technologie mature et produite en masse) introduit un biais dans le calcul des coûts des véhicules électriques, qui est encore une technologie nouvelle et produite à petite échelle. L'approche de modélisation des coûts de notre modèle TVSim est inspirée par celle de Cuenca et al. (1999), mais utilise des observations de véhicules électriques mis en marché pour estimer les coûts fixes.

2.2 Études sur le déploiement des véhicules alternatifs

De nombreuses études ont pour objet le déploiement des véhicules routiers alternatifs dans un marché spécifique et ses effets sur le secteur énergétique de la région étudiée. Nous ne prenons en compte que des études utilisant des modèles E3 (Énergie - Économie - Environnement), et avons choisi de les catégoriser selon l'approche de modélisation utilisée (simulation vs optimisation [Bahn et al., 2005]). Cette section se retrouve sous forme abrégée dans la section 4.1.

2.2.1 Approches de simulation

Les modèles de simulation se basent sur des données et tendances historiques pour prévoir les conséquences des scénarios testés sur le secteur de l'énergie. En analyse et planification énergétique, les approches de simulation sont principalement utilisées pour prévoir les conséquences du déploiement de différents véhicules alternatifs dans les parcs automobiles, ou de l'imposition de mesures spécifiques, au transport sur le secteur énergétique (demande d'énergie, etc.) et sur l'environnement (émission de GES, pollution de l'air, etc.).

Par exemple, le modèle de simulation CanESS (Canadian Energy System Simulator) représente les 13 provinces et territoires canadiens et vise à satisfaire des demandes de services énergétiques exprimées en unités physiques. Steenhof et McInnis (2008) l'ont utilisé pour comparer les bénéfices en termes de réduction d'émissions de GES, de la pénétration individuelle et progressive (introduction en 2010, jusqu'à la couverture complète du marché en 2050) de trois types de véhicules alternatifs (BEVs, FCVs et ICVs alimentés au biofuels), sur le marché canadien. Le modèle GREET (Greenhouse Gases, Regulated Emissions and Energy Use in Transportation Model) a été utilisé dans des études sensiblement similaires. Développé par le laboratoire national Argonne, il permet d'évaluer la consommation d'énergie et les émissions de polluants de plusieurs types de véhicules, en prenant en compte le cycle de vie complet du

carburant et de la technologie de véhicule.

Kantor et al. (2010) ont utilisé le modèle GREET, pour étudier les réductions d'émissions de GES et autres polluants (NO_x, VOC, etc.) liées au déploiement de trois types de véhicules alternatifs (PHEVs, FCVs, FCPHEVs) dans la province de l'Ontario, et plus spécifiquement dans la région urbaine de Toronto d'ici 2025.

Thomas (2009) teste plusieurs scénarios de déploiement de véhicules alternatifs (BEVs, FCVs, PHEVs alimentés à l'essence ou à l'éthanol, etc.) sur le marché américain à l'horizon de 2100. Il utilise le modèle GREET combiné à un modèle déterminant le taux de pénétration des véhicules et un autre, déterminant le mix de génération marginale d'électricité, afin d'étudier la demande en produits pétroliers, les émissions de GES et d'autres polluants, ainsi que leur sensibilité au déploiement des véhicules propres et à la valeur de l'empreinte carbone du secteur électrique.

D'autres modèles de simulation sont développés pour représenter plus en détails une branche spécifique du secteur énergétique d'une zone géographique particulière. C'est le cas du modèle EDGE-CA qui représente en détails le système californien de production-distribution d'électricité, sur une base horaire. Grâce à ce modèle, McCarthy et Yang (2010) ont pu analyser en détail la réponse du secteur électrique californien à court terme (1 an) à l'électrification de 1% du parc automobile de véhicules légers de l'état. Les types de véhicules considérés sont les BEVs, PHEVs et FCVs. Leur objet d'étude était les variations de la demande d'électricité (par heure, selon les périodes de pointe ou de creux), des énergies utilisées, et des émissions de GES.

Ces 4 études anticipent les conséquences sur l'environnement, la demande d'énergie, etc. de certains scénarios statiques d'électrification du parc automobile de la zone géographique concernée, avec un bon niveau de précision. Cependant, en utilisant des scénarios exogènes imposant un taux de pénétration de véhicules alternatifs, il est impossible de capturer la compétition pouvant exister entre ces différentes technologies. Ce type d'analyse est en général réservé aux modèles d'optimisation qui permettent de comparer les différentes technologies représentées sur une base économique et/ou technologique. Mais, certaines approches de simulation ont été

développées en utilisant des méthodes permettant de combler ce manque. C'est le cas du modèle UKTCM (UK Transport Carbon Model), développé par le centre de recherche en énergie du Royaume Uni (UKERC), dans le but de tester certaines mesures spécifiques au secteur du transport. Incluant une base de données de technologies de véhicules très détaillée, ce modèle tend à analyser l'impact qu'auraient différentes mesures politiques sur leur déploiement. Le choix du modèle parmi les technologies de véhicules représentées est orienté par des probabilités d'adoption qui ont été attribuées à chaque technologie de véhicule (en prenant en compte différents facteurs économiques, comme le coût de possession, et les préférences des consommateurs). Brand et al. (2012) utilisent ce modèle pour étudier l'impact de mesures visant à diminuer la consommation de carburants fossiles dans le secteur du transport, sur l'évolution de la pénétration de différents véhicules (ICVs alimentés à l'essence ou au diesel, les HEVs, PHEVs, BEVs, etc.) sur le marché anglais, la demande de carburants fossiles et d'électricité, ainsi que les émissions de CO₂. Les mesures prises en compte sont : l'augmentation des prix des carburants fossiles, une vitesse maximale autorisée, la promotion de technologies de véhicules électriques, etc.

Tel que mentionné précédemment, les modèles de simulation sont calibrés sur les tendances observées par le passé. Ils permettent de dresser un portrait probable du secteur énergétique et de l'allocation des ressources dans le futur, qui s'alignerait sur les tendances historiques. De ce fait, les résultats (émissions de GES ou demandes d'énergie par source, etc.) sont généralement calculés à partir de données statiques. Par exemple, les auteurs des 5 articles cités ci-dessus utilisent des données statiques pour la composition du secteur électrique, qui s'appuient sur les proportions observées dans le passé.

Ainsi, les modèles de simulation ne permettent pas d'analyser les changements systémiques au sein du secteur énergétique qui permettraient d'atteindre un objectif donné, comme par exemple une cible de réduction des émissions de GES. Il n'est donc pas approprié de tester certaines politiques, notamment climatiques, avec des modèles de simulation. Avec cette approche, certains auteurs se contentent de comparer les résultats obtenus grâce à un agencement prédéfini du

secteur énergétique avec la cible à atteindre. C'est ainsi que Steenhof et McInnis (2008) peuvent affirmer que ni la pénétration totale des BEVs d'ici 2050, ni celle des FCVs, et encore moins celle des ICVs alimentés aux biocarburants, permettrait (seule) au Canada d'atteindre la cible de réduction d'émissions de GES imposée par le protocole de Kyoto. Thomas (2009) compare également les réductions d'émissions de GES obtenues selon les scénarios de pénétration de véhicules alternatifs, avec la cible de réduction imposée aux États-Unis par le protocole de Kyoto. Contrairement aux approches de simulation, les approches d'optimisation fournissent des outils plus adaptés à l'analyse de certaines mesures politiques - particulièrement celles imposant des objectifs à atteindre, et à l'étude du déploiement des différentes technologies représentées.

2.2.2 Approches d'optimisation

Les modèles E3 d'optimisation sont de puissants outils de planification. Également appelés "modèles d'équilibre économique calculable", ils fournissent une configuration optimale du secteur de l'énergie ainsi qu'un plan d'allocation optimale des ressources énergétiques. Les modèles d'optimisation se caractérisent également selon leur niveau d'agrégation et le type d'équilibre économique calculé. Les modèles utilisant des variables économiques agrégées sont appelés modèles top-down, alors que les modèles bottom-up sont désagrégés. Des modèles hybrides ont été développés de manière à capturer les avantages des deux approches. Certains modèles d'optimisation calculent un équilibre économique général qui fera en sorte que l'équilibre entre l'offre et la demande soit satisfait dans tous les secteurs de l'économie au complet. Ce type de modèle appartient en général à la catégorie des modèles top-down. Les modèles d'équilibre économique partiel calculable, calculent l'équilibre entre l'offre et la demande dans le seul secteur de l'énergie. Ces modèles peuvent être des modèles top-down ou bottom-up.

Modèles top-down

Les modèles top-down se basent sur les grands principes macro économiques et offrent une représentation globale de l'économie, permettant ainsi de capturer les relations qui existent entre le secteur de l'énergie et les autres.

Le modèle GCAM (Global Change Assessment Model) en est un bon exemple. Développé par le Joint Global Change Research Institute (PNNL) (Pacific Northwest National Laboratory), il suit une approche de résolution récursive dynamique (dynamic recursive). GCAM est un modèle d'équilibre économique partiel dans lequel sont représentés en détails les aspects de l'économie qui sont directement liés au secteur énergie. Le lien entre l'activité économique (mesurée par le PIB) et le secteur de l'énergie est principalement modélisé grâce à des courbes d'élasticité au prix de la demande d'énergie. Enfin, le modèle est désagrégé en 14 régions géopolitiques à travers le monde et représente les relations de commerce de produits et de permis d'émissions, etc., qui les lient entre elles.

Kyle et Kim (2011) ont utilisé le modèle GCAM pour réaliser une étude similaire à celles précédemment citées. Ils étudient l'impact du déploiement de véhicules alternatifs (selon des taux de pénétration imposés), sur les émissions de GES ainsi que les sources d'énergies primaires utilisées, dans plusieurs régions du monde, et selon le niveau de développement du pays et l'imposition ou non de politiques climatiques (taxe sur le carbone). L'utilisation d'un outil d'optimisation leur permet de déterminer un mix optimal de sources d'énergies et de technologies de transformation, notamment en ce qui concerne la production d'électricité. Cependant, les auteurs ont fait le choix de ne faire pénétrer qu'un type de véhicule alternatif à la fois, et selon un taux de pénétration prédéterminé, ce qui ne permet pas d'analyser la compétition entre les différentes technologies.

Wise et al. (2010) ont utilisé le modèle MiniCAM (la version antérieure à GCAM). Mais, contrairement aux auteurs de l'article précédent, ils prennent en compte la compétition économique entre les différents véhicules représentés (ICVS et PHEVs), afin de déterminer lesquels

seront les plus économiquement attrayants sous différents scénarios de taxe sur le carbone. Leur étude se limite au marché américain et prend également en compte le *mix* de sources d'énergies primaires, l'évolution de la demande d'électricité et des émissions de CO₂ qui résulteront des taux de pénétration des véhicules.

Les modèles d'optimisation top-down sont de très bon outils pour l'analyse de politiques énergétiques ou climatiques, essentiellement car ils en mesurent les conséquences sur le reste de l'économie. Cependant, ils ne permettent pas de prendre en compte toutes les différences techniques et économiques, ni la compétition existante entre les différentes technologies. Les modèles bottom-up sont de meilleurs outils pour capturer ces effets.

Modèles bottom-up

Les modèles bottom-up sont des modèles désagrégés qui suivent une approche technico-économique et représentent en général le secteur énergétique avec un niveau de détail élevé (technologies représentées, flux d'énergie, etc.). La flexibilité et la précision avec lesquelles sont modélisées les différentes technologies (actuelles ou futures) en font des modèles très appréciés pour l'analyse technologique.

MARKAL (MARKet ALocation model) a été et demeure, encore aujourd'hui, l'un des chefs de file en matière de modélisation bottom-up du secteur énergétique. Développé dans le cadre de l'Energy Technology Systems Analysis Program (ETSAP) de l'Agence Internationale d'Énergie à partir des années 1980, c'est un modèle de planification énergétique suivant une philosophie économique qui vise à détailler tous les aspects (techniques et économiques) du système énergétique d'une région donnée, de l'exploitation des ressources d'énergies à la demande finale. L'objectif du modèle MARKAL est de satisfaire toutes les demandes d'énergies de manière à minimiser le coût total au cours de la période de modélisation, tout en permettant d'évaluer la compétition entre les différentes technologies représentées sur une base économique. Le modèle

MARKAL a été utilisé à plusieurs reprises pour étudier spécifiquement l'impact du contexte énergétique (politiques climatiques, etc.) sur le déploiement de véhicules alternatifs. Rosenberg et al. (2010) ont testé l'impact d'une cible de réduction d'émissions de GES en Norvège, et Endo (2007) celui d'une taxe sur le carbone au Japon sur la pénétration des véhicules alimentés à l'hydrogène.

Endo (2007) utilise le modèle MARKAL pour comparer le taux de pénétration des véhicules alimentés à l'hydrogène (FCVs et ICVs) sur le marché japonais à ceux des autres véhicules représentés (ICVs alimentés à l'essence, au diesel, au gaz de pétrole liquéfié, ou au méthanol ; des HEVs alimentés à l'essence), ainsi que les émissions de GES, pour chaque niveau de taxe testé. Yeh et al. (2008) ont utilisé le modèle MARKAL pour déterminer par quels moyens la Californie pourrait atteindre différentes cibles de réduction d'émissions de GES, notamment dans le secteur des transports. Ils testent également la contribution d'une politique sur les biocarburants à la réduction des émissions de GES. Dans cet article, l'analyse est axée sur l'évolution de la consommation de différents carburants dans le secteur du transport routier et du déploiement des véhicules alternatifs.

Rosenberg et al. (2010) ont combiné le modèle MARKAL au modèle d'optimisation norvégien H2INVEST qui modélise l'évolution des infrastructures d'offre d'hydrogène (H2 supply infrastructure) et permet une représentation plus détaillée de la géographie et de l'économie du pays - en différenciant notamment les zones urbaines et rurales. Dans cette étude, les FCVs et ICVs alimentés à l'hydrogène sont en compétition avec les ICVs (alimentés au diesel, à l'essence ou au gaz naturel), des PHEVs ainsi que des BEVs. Leur étude détermine le *mix* optimal de sources d'énergies et de technologies pour la production de différents types de carburants, selon la région.

TIMES (The Integrated MARKAL-EFOM System [Loulou et al., 2005]), le successeur MARKAL, est un générateur de modèles bottom-up. L'une des améliorations principales de TIMES est que les demandes sont élastiques et peuvent donc s'ajuster aux changements économiques

liés aux différents scénarios testés. Les modèles suivant l'approche TIMES sont des modèles de programmation linéaire dynamique et d'équilibre économique partiel calculable, qui maximisent le surplus net total en minimisant le coût net total du système énergétique (prenant en compte tous les coûts liés à l'investissement, l'opération et la maintenance des systèmes, les importations et exportations, etc.). Ils fournissent une allocation optimale des investissements, ressources et technologies à chaque période temporelle incluse dans l'horizon d'analyse.

McCollum et al. (2012) ont choisi CA-TIMES, la version californienne de TIMES, pour tester les effets d'une politique climatique sévère (retrouver d'ici 2020 le niveau d'émission de GES de 1990 et atteindre une réduction de 80% d'ici 2050). Leur étude présente, entre autres, l'évolution des demandes de carburants notamment dans le secteur du transport et les parts de marché occupées par les différents types de véhicules qui permettraient de satisfaire cet objectif de réduction d'émissions de GES pour l'état de Californie.

Modèles hybrides

Les modèles hybrides regroupent des éléments des approches de modélisation top-down et bottom-up, sous un seul modèle. Schaffer et Jacoby (2006) utilisent un modèle hybride intégrant (1) le modèle d'équilibre général calculable EPPA (Emissions Prediction and Policy Analysis) développé par le MIT qui permet la représentation de 9 secteurs de l'économie, (2) le modèle MARKAL d'équilibre partiel calculable qui permet une représentation détaillée des technologies énergétiques, et (3) une modélisation des changements modaux pour le transport de passagers et de marchandises. Ils testent ainsi grâce à leur modèle hybride les conséquences de politiques climatiques (cibles de réductions d'émissions de GES) aux États-Unis, notamment celle imposée par le protocole de Kyoto, en particulier sur les demandes d'énergie par source et la demande pour chaque mode de transport représenté. En revanche, ils ne prennent pas en compte les technologies de véhicules électriques dans leur étude mais des technologies conventionnelles ayant une efficacité énergétique améliorée.

Il existe d'autres approches de modélisation en planification énergétique. Girod et al. utilisent par exemple le modèle TRAVEL qui représente avec un haut niveau de détail le secteur du transport, en s'appuyant sur une approche de régression multinomiale logit pour calculer la majorité des paramètres. Ce modèle leur permet d'identifier quelle allocation des ressources énergétiques permettrait de réduire suffisamment les émissions de CO₂ dans 26 régions du monde, afin de limiter la hausse des températures à 2°C.

2.3 Approches de modélisation choisies

Dans cette section, nous présentons brièvement les deux modèles que nous avons récemment développés et utilisés dans notre étude sur l'électrification des transports au Canada : TVSim et TIMES-Canada. Le chapitre 3 de ce mémoire fait l'objet d'une présentation complète du modèle TVSim, et le modèle TIMES-Canada est présenté plus en détail dans la section 4.2.2.

TVSim a été développé dans le but d'être utilisé comme outil unique afin de fournir rapidement les paramètres techno-économiques sur les véhicules électriques requis par les modèles de planification énergétique suivant l'approche TIMES. Ces paramètres sont les coûts de ces véhicules (d'investissement, et d'opération et de maintenance), ainsi que leur efficacité (consommation). TVSim a été pensé comme un outil simple et rapide à utiliser, ne nécessitant pas de grandes connaissances mécaniques ou automobiles de la part de l'utilisateur, mais pouvant fournir des données précises afin de réaliser des analyses technologiques fiables à l'échelle du parc automobile d'un pays, ou d'une région. Il a été conçu en s'inspirant du modèle d'Autonomie. Il permet à la fois de déterminer et prévoir l'évolution de la composition de plusieurs types de véhicules électriques, de leur consommation et de leurs coûts (d'investissement, et d'opération et de maintenance), en simulant les technologies de véhicules individuellement. TVSim est un modèle hybride, ayant une structure similaire à celle du modèle paramétrique PAMVEC, mais il incorpore également plusieurs attributs des modèles de simulation dynamique et suit une ap-

proche implicite de modélisation de véhicules, ainsi qu'une approche par décomposition des coûts.

Nous avons choisi la structure du générateur de modèles TIMES pour notre modèle de planification du secteur énergétique canadien, car elle permet de représenter en détail le secteur énergétique d'une région (ou d'un pays) dans son intégralité et est particulièrement adaptée à l'évaluation de politiques climatiques et/ou énergétiques, ainsi qu'à l'analyse technologique. De plus, la représentation très détaillée du parc automobile canadien dans le modèle TIMES-Canada en a fait l'outil idéal pour notre étude (présentée dans le chapitre 4 de ce mémoire).

2.4 Références

Argonne National Laboratory (2011a). Site web du modèle Autonomie. Disponible en ligne à l'adresse : <http://www.autonomie.net> (Dernière consultation : juillet 2013).

Argonne National Laboratory (2011b). "Light-Duty Vehicle Fuel Consumption Displacement Potential up to 2045". ANL/ESD/11-4.

Bahn, O., Haurie, A., Zachary, D. (2005). "Mathematical modeling and simulation methods in energy system", publié dans 'Mathematical Models' de 'Encyclopaedia of Life Support Systems' (EOLSS), Développé sous les auspices de l'UNESCO.

Brand C., Tran M., et Anable J. (2012). "The UK transport carbon model : An integrated life cycle approach to explore low carbon future". *Energy Policy* 41, p.107-124.

Burke A. et Zhao H. (2010). "Simulation of plug-in hybrid vehicles using advanced lithium batteries and ultracapacitors on various driving cycles". Report no. UCD-ITS-RR-10-02, Institute of Transportation Studies, University of California, Davis.

Cuenca R., Gaines L., Vyas A. (1999). "Evaluation of Electric Vehicle Production and Operating Costs". ANL/ESD/41.

Delucchi M. (2000) "Electric and Gasoline Vehicle Lifecycle Cost and Energy-Use Model". Report no. UCD-ITS-RR-99-4, Institute of Transportation Studies, University of California, Davis.

- Endo, E. (2007). "Market penetration analysis of fuel cell vehicles in Japan by using the energy system model MARKAL." *International Journal of Hydrogen Energy* 32, 1347-1354.
- EPA (2012). "Final Rulemaking for 2017-2015 Light Duty Vehicle Greenhouse Gas Emission Standards and Corporate Average Fuel Economy Standards". EPA-420-R-12-016.
- Freyermuth V., Fallas E., et Rousseau A. (2008). "Comparison of Powertrain Configuration for Plug-in HEVs from a Fuel Economy Perspective". SAE-2008-01-0461.
- Gao W. (2005). "Performance Comparison of a Fuel Cell-Battery Hybrid Powertrain and a Fuel Cell-Ultracapacitor Hybrid Powertrain". *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, Vol. 54, no. 3, p.846-855.
- Graham R. (2001). "Comparing the Benefits and Impacts of Hybrid Electric Vehicle Options". EPRI, No. ref : 1000349.
- Kantor, I., Fowler M., Hajimiragha A., et Elkamel A. (2010). "Air quality and environmental impacts of alternative vehicle technologies in Ontario, Canada." *International Journal of Hydrogen Energy* 35, p.5145-5153.
- Kim P., Kim Y., Kwon S., et Yoon S. (2008). "Relative Cost Modeling of Electric Vehicle in Korea". *IEEE* No. 0-7803-4879/6/98, p.780-785.
- Kim N., et Rousseau A. (2011). "Comparison between ruled-based and instantaneous optimization for single-mode, power-split HEV". SAE-2011-01-0873.
- Kyle P. et Kim S. (2011). "Long-term implications of alternative light-duty vehicle technologies for global greenhouse gas emissions and primary energy demands." *Energy Policy* 39, p.3012-3024.
- Lindgren L. (1977). "Cost estimations for Emission Control Related Components/Systems and Cost Methodology Description". Rath & Strong, Inc., Report No. EPA460/3-78-002.
- Loulou R., Remme U., Kanudia A., Lehtila A., Goldstein G.(2005). "Documentation for the TIMES Model, Energy Technology Systems Analysis Program". Disponible en ligne à l'adresse : <http://www.iea-etsap.org/web/Documentation.asp> (Dernière consultation : janvier 2013).
- Markel T., Brooker A., Hendricks T., Johnson V., Kelly K., Kramer. ; O'Keefe M., Sprik S., et Wipke K. (2002). "ADVISOR : A system analysis tool for advanced vehicle modeling", *J. Power Sources*, vol. 110, no. 2, p.255-266.
- McCarthy R. et Yang C. (2010). "Determining marginal electricity for near-term plug-in and fuel cell vehicle demands in California : Impacts on vehicle greenhouse gas emissions." *Journal of Power Sources*

195, p.2099-2109.

McCollum D., Yang C., Yeh S., et Ogden J. (2012). "Deep greenhouse gas reduction scenarios for California : Strategic implications from the CA-Times energy-economic systems model". *Energy Strategy Reviews* 1, p.19-32.

Moawad A., Kim N., Rousseau A. (2012). "Impact of Technology on Electric Drive Fuel Consumption and Cost". Society of Automotive Engineers. SAE 2012-01-1011.

OTA (1995). "Advanced Automotive Technology : Visions of a Super-Efficient Family Car". U.S. Congress, OTA Report OTA-ETT-638.

Rosenberg E., Fidje A., Espegren K., Stiller C., Svensson a. et Moller-Holst S. (2010). "Market penetration analysis of hydrogen vehicles in Norwegian passenger transport towards 2050." *International Journal of Hydrogen Energy* 35, p.7267-7279.

Schafer A. et Jacoby H. (2006). "Vehicle technology under CO2 constraint : A general equilibrium analysis." *Energy Policy* 34, p.975-985.

Simpson A. (2005). "Parametric Modelling of Energy Consumption in Road Vehicles" (thèse de doctorat, University of Queensland).

Steenhof P. et McInnis B. (2008). "A comparison of alternative technologies to de-carbonize Canada's passenger transportation sector." *Technological Forecasting & Social Change* 75, p.1260-1278.

Thomas C. (2009). "Transportation options in a carbon-constrained world : Hybrids, plug-in hybrids, biofuels, fuel cell electric vehicles, and battery electric vehicles." *International Journal of Hydrogen Energy* 34, p.9279-9296.

Wipke K., Cuddly M., et Burch S. (1999). "ADVISOR 2.1 : A user-friendly advanced powertrain simulation using a combined backward/forward approach". *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol 48, no. 6, p.1751-1761.

Wise M., Kyle G., Dooley J., et Kim S. (2010). "The impact of electric passenger transport technology under an economy-wide climate policy in the United-States : Carbon dioxide emissions, coal use, and carbon dioxide capture and storage." *International Journal of Greenhouse Gas Control* 4, p.301-308.

Yeh S., Farrell A., Plevin R., Sanstad A., et Weyant J. (2008). "Optimizing U.S. mitigation strategies for the light-duty transportation sector : What we learn from a bottom-up model." *Environmental Science & Technology* 42, p.8202-8210.

Chapitre 3

Modèle TVSim

L'objectif de ce chapitre est de présenter TVSim, un nouveau modèle de simulation développé afin de fournir des données techno-économiques précises et fiables, relatives aux technologies de véhicules électriques modélisées selon une approche TIMES.

TVSim combine trois sous-modèles (détermination des caractéristiques du groupe motopropulseur (GMP), détermination de la consommation et détermination des coûts) qui permettent ensemble de déterminer et prévoir l'évolution des paramètres descriptifs des véhicules électriques requis par les modèles suivant l'approche TIMES, en particulier leurs coûts d'investissement, et d'opération et de maintenance, ainsi que leur efficacité (consommation). La liste complète des paramètres utilisés pour modéliser les véhicules électriques dans un modèle suivant l'approche TIMES, ainsi que leur description, est présentée à l'annexe 6.6.

Les deux premières parties de ce chapitre consistent en un aperçu du modèle TVSim et de ses fonctionnalités, ainsi que des types de véhicules représentés. Ensuite, les trois sous-modèles seront expliqués dans les parties 3.3, 3.4 et 3.5, puis la validation et la mise en oeuvre de TVSim dans un contexte canadien sont présentées à la fin de ce chapitre (sections 3.6 et 3.7). Enfin, une synthèse des caractéristiques de TVSim est présentée dans la section 3.8.

3.1 Aperçu du modèle TVSim

TVSim a été conçu pour être un outil flexible en termes d'architecture de véhicule, et d'évolution de composants, afin de faciliter la réalisation d'analyses technologiques et d'analyses de sensibilité à l'aide d'un modèle suivant l'approche TIMES. C'est un modèle de simulation hybride, regroupant sous une même structure des éléments caractéristiques des modèles de simulation dynamique et des modèles paramétriques. La figure 3.1 présente le fonctionnement de TVSim, en différenciant les décisions de l'utilisateur (entrées du modèle), les résultats intermédiaires et finaux, ainsi que les différents sous-modèles. Les éléments de la figure sont expliqués dans la suite du texte.

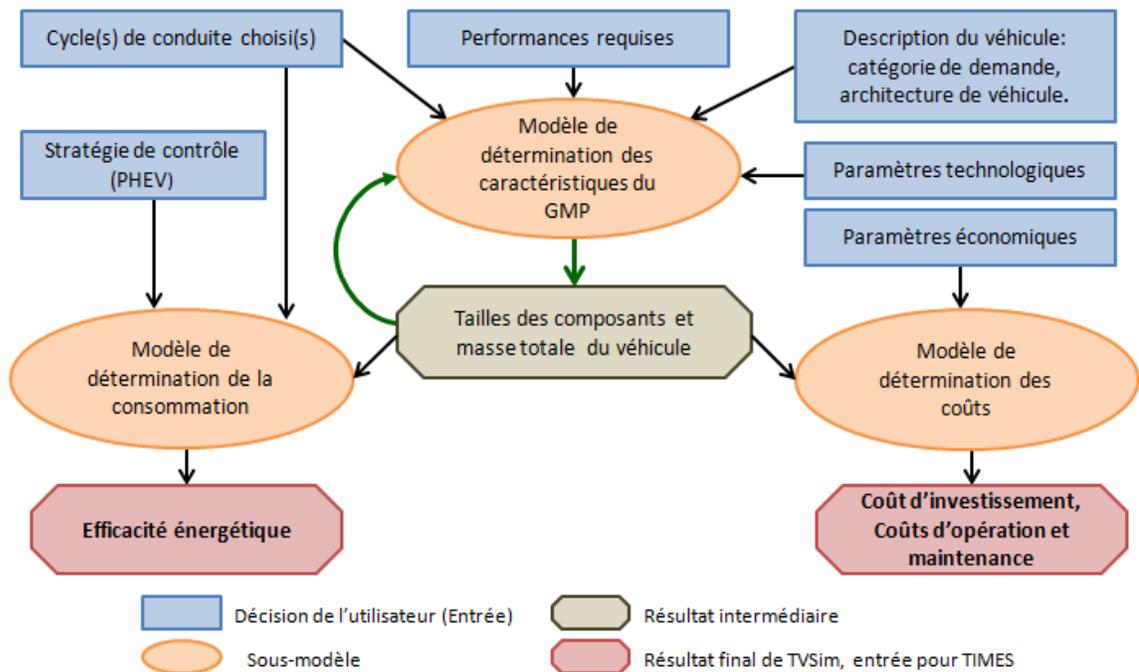


FIGURE 3.1 – Schématisation du fonctionnement du modèle TVSim

– **Décisions de l'utilisateur (Entrées)**

L'utilisateur de TVSim spécifie les performances pour le véhicule simulé (la vitesse maximale, l'accélération, la pente, l'autonomie électrique et la tenue d'un cycle de conduite spécifique), ainsi que le(s) cycle(s) de conduite à partir duquel (desquels) il veut simuler la conduite du véhicule et certaines performances. L'intégration des performances et cycle de conduite sous TVSim est détaillée dans la section 3.2.2.

La description du véhicule comprend la catégorie de demande finale à laquelle appartient le véhicule électrique simulé ainsi que son type d'architecture (tout-électrique, hybride rechargeable, etc.). Le modèle TVSim permet de simuler des véhicules appartenant aux 12 catégories de demandes finales représentées dans les modèles TIMES (transport de passagers et de marchandises). Les types d'architectures et les catégories de demandes de véhicules disponibles dans TVSim sont présentés dans les sections 3.2.1 et 4.2.3 de ce mémoire.

La stratégie de contrôle modélisée dans TVSim pour les véhicules hybrides rechargeables est expliquée dans la section 3.2.3.

Les paramètres technologiques et économiques font principalement référence aux caractéristiques des composants dont est équipé le véhicule simulé. Ces derniers jouent un rôle primordial sur la détermination des coûts et de la consommation des véhicules. En effet, certaines caractéristiques des composants (par exemple leur efficacité, leur puissance spécifique, ou leur coûts spécifiques) interviennent directement dans les calculs de consommation et de coûts, ainsi que dans la détermination de la masse d'un véhicule.

– **Modèle de détermination des caractéristiques du véhicule**

Ce sous-modèle calcule la taille (puissance et/ou capacité) des différents éléments du véhicule simulé, en suivant l'approche implicite. Ainsi, les tailles des composants sont déterminées dans TVSim à partir des performances désirées par l'utilisateur et d'une simple simulation de conduite. La masse finale est ensuite déterminée par rapport à celle des dif-

férents composants, en suivant un processus itératif de *mass-compounding*. Cette étape est très importante car la masse finale influence la détermination de la consommation et les tailles des composants interviennent dans la détermination des coûts du véhicule. Le processus de détermination des caractéristiques des véhicules est présenté en détail dans la section 3.3.

– **Modèle de détermination de la consommation du véhicule**

Une fois l'ensemble des caractéristiques techniques du véhicule déterminé, sa consommation est calculée à partir d'une simulation de conduite dynamique, en suivant un cycle de conduite (parmi plusieurs représentés dans TVSim). Le fonctionnement des composants est modélisé selon l'approche paramétrique (de manière statique en utilisant des données disponibles dans la littérature), alors que la modélisation des flux se rapproche plus de la simulation dynamique, en fonction de stratégies de contrôle dans le cas des véhicules hybrides. Le processus de détermination de la consommation est présenté en détail dans la section 3.4.

– **Modèle de détermination des coûts**

Ce sous-modèle suit une approche par décomposition des coûts et utilise les tailles des composants précédemment déterminées. L'approche suivie ici s'inspire beaucoup de celle développée par Cuenca et al. (1999) pour l'ANL. Seuls les coûts de quelques composants (batterie électrique, moteur électrique, etc.) sont calculés individuellement pour chaque véhicule simulé. Les autres coûts sont agrégés et estimés à partir d'une base de données de technologies de véhicules électriques actuellement ou bientôt sur le marché. Le processus de détermination des coûts est présenté dans la section 3.5.

Une liste récapitulative de tous les paramètres et résultats de TVSim est présentée à l'annexe 6.7.

L'évolution des caractéristiques techno-économiques des différentes technologies est modélisée dans les modèles suivant l'approche TIMES. L'horizon temporel de ces modèles étant découpé en plusieurs périodes, ils requièrent des données relatives aux technologies représentées pour chacune de ces périodes. TVSim détermine l'efficacité et les coûts des véhicules pour différentes années, qui correspondent aux médianes des périodes temporelles du modèle suivant l'approche TIMES pour lequel il est utilisé.

3.2 Véhicules représentés

Les autres éléments caractéristiques des véhicules modélisés sont présentés dans cette section : l'architecture, les performances, ainsi que des caractéristiques additionnelles telles que les pertes d'énergie et la stratégie de contrôle modélisée.

3.2.1 Architecture des véhicules

L'architecture d'un véhicule est caractérisée par le type et le nombre d'éléments qui la composent, ainsi que par leur disposition. Parmi la grande variété d'options d'architecture de véhicules électriques, il existe quatre catégories principales : les véhicules tout-électrique, les hybrides rechargeables série, les hybrides rechargeables parallèles et les hybrides rechargeable *power-split*. Ces différentes catégories sont décrites plus bas et illustrées à l'annexe 6.8. Bien que les différences au niveau de l'architecture des véhicules hybrides ne soient pas explicitement représentées dans un modèle TIMES standard, nous avons choisi de modéliser ces quatre types de véhicules dans TVSim, à des fins d'analyse technologique. Ceci permet, par exemple, d'identifier quelle configuration serait la plus appropriée pour réduire les émissions de GES à l'échelle d'un parc automobile national ou régional.

- **Les véhicules tout-électriques (BEV).** La seule source d'énergie dans un BEV est l'électricité. L'intégralité de la puissance fournie aux roues provient du moteur électrique, qui est uniquement alimenté par la batterie électrique.
- **Les véhicules hybrides rechargeable-série (PHEV-série).** La puissance fournie aux roues provient également uniquement du moteur électrique mais, contrairement aux BEVs, les PHEVs-série sont équipés d'un moteur à combustion. Ce dernier est utilisé pour fournir de l'énergie au moteur électrique, énergie qui peut être destinée soit à alimenter la transmission, soit à recharger la batterie électrique.
- **Les véhicules hybrides rechargeable-parallèle (PHEV-parallèle).** Dans un véhicule PHEV-parallèle, le moteur à combustion, tout comme le moteur électrique, n'est relié qu'à la transmission. Ainsi les deux moteurs peuvent fournir de la puissance aux roues, mais le moteur à combustion ne peut être utilisé pour recharger la batterie électrique.
- **Les véhicules hybrides rechargeable-power-split (PHEV-power-split).** Les véhicules PHEV-power-split combinent les avantages des PHEV-série et des PHEV-parallèle. Le moteur à combustion est relié à la transmission et au moteur électrique. Les deux moteurs peuvent alimenter la transmission, et le moteur à combustion peut également être utilisé pour recharger la batterie électrique.

Les architectures des véhicules sont prédéfinies et non modifiables dans TVSim. Elles sont identiques à celles des véhicules représentés dans l'étude de l'ANL (2011) et également très similaires à celles modélisées dans le modèle PAMVEC (à l'exception de l'électronique de puissance qui n'y est pas représentée, au contraire de TVSim).

La représentation des composants dans le modèle TVSim est donc très similaire à celle adoptée par PAMVEC. Ils sont modélisés de manière statique en prenant en compte des données moyennes pour leurs caractéristiques. Toutefois, contrairement au modèle PAMVEC, TVSim prend en compte l'évolution des caractéristiques des technologies de composants, afin de pré-

voir l'évolution de la consommation et des coûts des véhicules, et permet de suivre l'évolution de la charge de la batterie électrique, grâce à sa modélisation dynamique des flux d'énergie tout au long de la simulation de conduite.

L'utilisateur de TVSim choisit les valeurs des paramètres descriptifs des composants. Cette flexibilité permet notamment de tester l'impact de technologies actuellement en développement, ou fictives. La liste complète des composants représentés, ainsi que leur caractéristiques descriptives est présentée à l'annexe 6.9.

3.2.2 Performances et cycles de conduite

Toutes les données requises par le générateur de modèle TIMES sont déterminées par TVSim en fonction des performances du véhicule simulé, ainsi que du cycle de conduite choisi pour le tester.

Performances

TVSim prend en compte les mêmes performances que les modèles PAMVEC, ADVISOR, Autonomie, etc., c'est-à-dire :

- la vitesse maximale (en km.h^{-1});
- l'accélération (en seconde pour passer de 0 à 100 km.h^{-1});
- la pente maximale (en %) que le véhicule peut monter (à une vitesse de $x \text{ km.h}^{-1}$);
- l'autonomie électrique (en km);
- la puissance maximale requise pour assurer la tenue d'un cycle de conduite (en kW).

Ces performances sont déterminées par l'utilisateur de TVSim. Dans le but de faciliter son travail, trois catégories de performances ont été établies pour chaque catégorie de demande finale : faible, moyenne et haute. Chacune de ces catégories comprend des valeurs prédéfinies pour la vitesse maximale, l'accélération et la pente, qui ont été estimées selon les données dis-

ponibles dans la littérature. L'utilisateur doit néanmoins définir une valeur pour l'autonomie électrique de chaque véhicule considéré.

Cycles de conduite

Six cycles de conduite (présentés à l'annexe 6.10) sont disponibles dans le modèle TVSim. Chaque cycle de conduite donne les éléments suivants, pour chaque seconde t du cycle : $v(t)$ la vitesse (en m.s^{-1}), $a(t)$ l'accélération (en m.s^{-2}) et $\alpha(t)$ la pente à monter (en%). La conduite y est simulée sur un cycle répété plusieurs fois (ou une combinaison de différents cycles), afin de considérer une distance de simulation équivalente à celle parcourue quotidiennement, car aucun de ces cycles ne s'étend sur une distance assez longue pour capturer, en une seule répétition, la dynamique des flux d'énergie. Le choix du (des) cycle(s) de conduite est laissé à l'utilisateur, bien que certains soient suggérés en fonction de la catégorie à laquelle appartient le véhicule simulé.

L'utilisation seule de cycles de conduite dans le processus de simulation de la conduite d'un véhicule peut introduire un biais dans la détermination de sa consommation. En effet, comme ils sont actuellement définis, les cycles de conduite ne tiennent pas compte de l'impact des conditions climatiques, qui peuvent beaucoup influencer la consommation d'un véhicule (Centre d'Analyse Stratégique, 2011), notamment en termes de consommation des accessoires et particulièrement dans un pays, comme le Canada, exposés à des conditions climatiques extrêmes (Transport Canada, 2012). TVSim a été conçu de manière à prendre compte des conditions climatiques dans le processus de détermination de la consommation, et spécifiquement adapté au contexte canadien (voir la section 3.7 sur la mise en oeuvre dans un contexte canadien).

3.2.3 Caractéristiques additionnelles

D'autres facteurs entrent en compte dans la détermination de la consommation des véhicules électriques, notamment les pertes d'énergie, et les stratégies de contrôle pour les PHEVs.

Pertes d'énergie

Dans un véhicule conventionnel, il y a deux principales sources de perte d'énergie : l'énergie dissipée durant le freinage et les pertes liées à la résistance des composants. Dans un véhicule électrique (ou hybride conventionnel), une partie de l'énergie dissipée au freinage peut être récupérée grâce au moteur électrique qui fonctionne également comme générateur. L'énergie récupérable par un véhicule i à l'instant t de la conduite ($\lambda_i^F(t)$) provient de la force d'accélération négative (inertie) du véhicule i à l'instant t ($F_i^A(t)$, voir l'annexe 6.2), et est déterminée comme suit :

$$\lambda_i^F(t) = \begin{cases} -F_i^A(t).v(t).\sigma & \text{si } F_i^A(t) < 0 \\ 0 & \text{sinon.} \end{cases} \quad (3.1)$$

où $v(t)$ est la vitesse à l'instant t et σ est le facteur de conversion de Newton (N) à kWh. Cependant, toutes les pertes d'énergie sont calculées dans TVSim comme des fonctions de l'efficacité des composants. Ainsi, la proportion d'énergie considérée comme "irré récupérable" au freinage est considérée dans TVSim comme la perte d'énergie liée à la résistance du système de freinage. L'énergie récupérée au freinage par la batterie est calculée comme suit :

$$\varphi_i^F(t) = \lambda_i^F(t) \cdot \eta_i^{frein} \cdot \eta_i^{trans} \cdot \eta_i^{mot} \cdot \eta_i^{elec} \cdot \eta_i^{batt} \quad (3.2)$$

où les paramètres η_i^{frein} , η_i^{trans} , η_i^{mot} , η_i^{elec} et η_i^{batt} correspondent aux efficacités (1 - taux de pertes) du système de freinage, du moteur électrique, de l'électronique de puissance et de la batterie électrique.

Stratégie de contrôle pour les PHEVs

Les stratégies de contrôle sont des algorithmes assurant la régulation des flux d'énergie et des opérations des différents moteurs des véhicules hybrides. Le choix d'une stratégie de contrôle a un impact significatif sur la consommation et les émissions de GES d'un véhicule, ainsi que sur

la détermination de la taille de certains composants, et donc sur leurs coûts.

La stratégie que nous avons choisie de représenter dans TVSim est très similaire à celle utilisée par Graham (voir la section 3.3.1.6 de Graham, 2001). Elle consiste principalement en la combinaison et l’alternance des modes de conduite et d’alimentation des accessoires décrits ci-dessous :

1. Mode de consommation de la charge

Durant ce mode, le véhicule utilise essentiellement l’énergie de la batterie électrique pour se propulser. La charge de la batterie du véhicule i (ϖ_i) diminue au fur et à mesure de la conduite jusqu’à ce qu’elle atteigne un seuil limite prédéfini : ϖ_i^S . Une fois ce seuil atteint, le véhicule passe en mode maintien de la charge.

2. Mode maintien de la charge

Lorsqu’un véhicule est en mode maintien de charge, il utilise essentiellement du carburant fossile pour fournir l’énergie nécessaire à sa traction, à travers le moteur à combustion, ce qui permet à la batterie électrique de maintenir un niveau de charge minimal.

3. Mode de régénération de la charge

Le moteur à combustion est utilisé pour recharger la batterie électrique durant le mode maintien de la charge. Ce mode est uniquement applicable aux véhicules PHEV-série et *power-split*. TV-Sim suit la même approche que Simpson (2005) pour déterminer l’énergie fournie par le moteur à combustion pour recharger la batterie électrique à l’instant t ($\varphi_i^C(t)$) :

$$\varphi_i^C(t) = \begin{cases} z \cdot (\varpi_i^R - \varpi_i(t-1)) & \text{si } \varpi_i(t-1) < \varpi_i^R \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \quad (3.3)$$

où z est un facteur proportionnel à la capacité totale de la batterie électrique, $\varpi_i(t)$, l’état de charge de la batterie du véhicule i à l’instant t , et $\varpi_i^R(y)$ le seuil indiquant le début de du processus de recharge de la batterie du véhicule PHEV (série ou *power-split*) i par son moteur à combustion. La batterie électrique est également rechargée par le freinage régénératif tout au

long de la conduite (voir partie sur les pertes d'énergie).

4. Mode d'assistance au moteur électrique

Le moteur à combustion est utilisé pour compléter l'apport d'énergie du moteur électrique lorsque ce dernier ne peut satisfaire les demandes pour la traction durant le mode de consommation de la charge. Ce mode est applicable aux véhicules PHEV-parallèle et *power-split*, pour lesquels le moteur à combustion est plus puissant que le moteur électrique (voir section 3.4 sur la détermination des caractéristiques des véhicules). Dans TVSim, la puissance fournie par le moteur électrique du véhicule PHEV-parallèle ou *power-split* i ne peut dépasser le seuil : Π_i^B .

5. Mode d'assistance au moteur à combustion

Le moteur électrique est utilisé pour compléter l'apport d'énergie du moteur à combustion lorsque ce dernier ne peut satisfaire les demandes pour la traction durant le mode de maintien de la charge. Ce mode est applicable aux véhicules PHEV-série, pour lesquels le moteur électrique est plus puissant que le moteur à combustion (voir la section 3.4). Dans TVSim, la puissance fournie par le moteur à combustion du véhicule PHEV-série i ne peut dépasser le seuil : Π_i^C .

6. Alimentation des accessoires

Durant le mode de maintien de la charge, les accessoires sont alimentés à la fois par la batterie électrique et le moteur à combustion, selon la règle :

$$\Omega_i(t) = b_i \cdot \omega_i^C(t) + (1 - b_i) \cdot \omega_i^B(t) \quad (3.4)$$

où b_i est la proportion d'énergie fournie aux accessoires du véhicule i provenant de la combustion de carburants fossiles, et $\omega_i^C(t)$, $\omega_i^B(t)$ et $\Omega_i(t)$ sont respectivement l'énergie fournie aux accessoires par le moteur à combustion et la batterie électrique, et l'énergie totale requise pour le fonctionnement des accessoires du véhicule i à l'instant t .

Le tableau 3.1 résume la stratégie de contrôle mise en place dans TVSim pour chaque catégorie de PHEV.

Véhicule	Consommation de la charge	Maintien de la charge
PHEV-série	-	Régénération de la charge, assistance au moteur à combustion, alimentation des accessoires
PHEV-parallèle	Assistance au moteur électrique	Alimentation des accessoires
PHEV- <i>power-split</i>	Assistance au moteur électrique	Régénération de la charge, alimentation des accessoires

Tableau 3.1 – Stratégie de contrôle représentée dans TVSim

Bien que la structure (les contraintes) de cette stratégie de contrôle soit statique dans TVSim, les paramètres suivants sont modifiables, afin de laisser une certaine flexibilité à l'utilisateur : ϖ_i^S , ϖ_i^R , Π_i^B , Π_i^C , b_i .

3.3 Modèle de détermination des caractéristiques du véhicule

Le modèle TVSim suit l'approche implicite de détermination de la taille des composants (leur puissance et énergie). Dans cette partie sont expliqués comment sont simulés les performances désirées, le processus itératif de *mass-compounding*, ainsi que l'approche de calcul de la masse totale d'un véhicule, utilisés par le modèle. Les algorithmes utilisés par TVSim pour déterminer les tailles et masses des composants et la masse des véhicules sont présentés à l'annexe 6.11 (algorithmes 2 à 5).

3.3.1 Simulation des performances

L'utilisateur doit donc définir les performances du véhicule qu'il souhaite modéliser (la vitesse maximale, la pente, l'accélération, l'autonomie électrique et la tenue d'un cycle de conduite). La taille des composants dépend de la puissance requise pour assurer les performances du véhicule

et de la consommation de ce dernier. Les calculs de ces puissances et de la consommation sont dérivés de la formule de calcul de la force nécessaire à la traction d'un véhicule (voir l'annexe 6.2). L'approche utilisée dans TVSim pour simuler la vitesse maximale, la pente et la tenue d'un cycle de conduite est identique à celle utilisée dans le modèle PAMVEC. L'approche utilisée pour calculer la puissance nécessaire pour satisfaire la performance d'accélération est tirée de Delucchi (2000).

Vitesse maximale

Soit $P_i^{v^*}$ la puissance requise par le véhicule i pour satisfaire la performance de vitesse maximale désirée : v^* km.h⁻¹. La vitesse maximale correspond à une vitesse continue (sans accélération) sur un terrain plat (i.e. les forces de montée et d'accélération sont nulles) :

$$P_i^{v^*} = m_i \cdot g \cdot C_i^R \cdot v^* + \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot C_i^D \cdot A_i^F \cdot (v^*)^3 \quad (3.5)$$

où m_i , C_i^R , C_i^D et A_i^F sont respectivement la masse, le coefficient de résistance au roulement, le coefficient de traînée aérodynamique et la surface frontale du véhicule i . g est le paramètre d'accélération gravitationnelle ($g = 9.81 m \cdot s^{-1}$), et ρ la densité de l'air.

Montée

Soit $P_i^{m^*}$, la puissance requise par le véhicule i pour satisfaire la performance de montée d'une côte de α^* % à une vitesse continue de v^m km.h⁻¹.

$$P_i^{m^*} = \left(m_i \cdot g \cdot C_i^R + \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot C_i^D \cdot A_i^F \cdot (v^m)^2 + m_i \cdot \sin \alpha^* \right) \cdot v^m \quad (3.6)$$

Accélération

Soit P^{a*} , la puissance requise par un véhicule pour satisfaire la performance d'accélération désirée (passer de 0 à 100 km.h⁻¹ en t^{a*} secondes) :

$$P_i^{a*} = \frac{\left(m_i \cdot \left(\frac{v^a}{t^{a*}} \right) m_i \cdot g \cdot C_i^R + \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot C_i^D \cdot A_i^F \times (v^a)^2 \right) \cdot v^m}{E_3 \cdot x^a} \quad (3.7)$$

Avec :

$$x^a = \text{Min} \left(\frac{v^a}{2 \cdot E_1}; 1 \right)^{E_2} \quad (3.8)$$

où $v^a = 100 \text{ km.h}^{-1} = \frac{100}{3.6} \text{ m.s}$.

Delucchi utilise les valeurs $E_1 = 20$, $E_2 = 0.2$ et $E_3 = 2$ pour les véhicules électriques.

Autonomie électrique

L'autonomie électrique désirée d'un véhicule électrique (en km) est utilisée pour déterminer la capacité de la batterie électrique (en kWh), en fonction de la consommation électrique de ce véhicule (en kWh.km⁻¹).

Tenue d'un cycle de conduite

Soit P^{k*} la puissance maximale requise pour la traction du véhicule durant la conduite sur le cycle de conduite k :

$$P^{k*} = \max[P^k(t)], \forall t \in T^k \quad (3.9)$$

où T^k est l'ensemble des instants t composant le cycle de conduite k et $P^k(t)$ la puissance requise pour la traction du véhicule à l'instant t du cycle de conduite k .

La consommation utilisée pour déterminer la capacité de la batterie, ainsi que la puissance maximale requise pour la tenue d'un cycle de conduite, sont calculées par une simulation simplifiée

sur un seul cycle de conduite (sans considérer l'apport énergétique de la combustion de carburants fossiles dans le cas des véhicules hybrides.) L'algorithme utilisé pour cette simulation est présenté dans l'annexe 6.12 (algorithme 6).

3.3.2 Modèle de détermination de la masse du GMP et du véhicule

TVSim suit la méthode utilisée dans l'étude de l'ANL (2011) pour déterminer les tailles des composants des PHEV-parallèles et power-split. Le moteur à combustion doit pouvoir fournir la puissance requise pour assurer toutes les performances, et le moteur électrique doit pouvoir assurer la tenue de conduite sur un cycle prédéfini. La méthode de détermination de la taille des composants d'un PHEV-série suivie par TVSim est une version adaptée de celle suivie par le modèle PAMVEC. Le moteur électrique doit être en mesure de fournir la puissance nécessaire à chacune des performances désirées, et le moteur à combustion doit fournir la puissance nécessaire à la tenue d'un cycle de conduite, alors que PAMVEC considère que ce dernier devrait pouvoir fournir la puissance nécessaire aux performances de montée et de vitesse maximale. Comme mentionné à la section 2.1.1 (approche implicite) et expliqué dans l'annexe 1, tout modèle suivant l'approche implicite de détermination des caractéristiques d'un véhicule s'appuie sur un processus itératif pour déterminer à la fois les tailles des composants du véhicule simulé, ainsi que sa masse totale (suivant le processus de *mass-compounding*). Le processus itératif utilisé pour déterminer les tailles et masses de composants et du véhicule est présenté ci-dessous.

Processus itératif de TVSim

La figure 3.2 illustre le processus itératif mis en place dans TVSim. La masse du véhicule utilisée à l'étape initiale (M_c) correspond à une masse moyenne déterminée selon la catégorie c choisie. Le processus itératif prend fin en fonction du seuil de tolérance choisi par l'utilisateur ε (typiquement 0.01). Ce processus itératif est mis en oeuvre dans les algorithmes 2 à 5 (annexe 6.11).

Calcul de la masse totale du véhicule

Le modèle TVSim suit une approche similaire à celle utilisée par le modèle PAMVEC et le modèle développé par Delucchi (2000) en ce qui concerne le calcul de la masse totale du véhicule. TVSim calcule la masse du véhicule (ainsi que les tailles et les masses de ces éléments) pour différentes années, en s'appuyant sur l'évolution des différentes caractéristiques du véhicule et de ses composants. Ainsi, la masse du véhicule i durant l'année y , $m_i^{tot}(y)$, est calculée comme suit :

$$m_i^{tot}(y) = m_{c_i}^{fix}(y) + u_{struct} \times m_i^{meca}(y) \quad (3.10)$$

où, $m_i^{meca}(y)$ correspond à la masse du GMP du véhicule i dont les tailles sont déterminées par TVSim, durant l'année y . Le paramètre u_{struct} permet de prendre en compte la masse additionnelle requise au niveau de la structure du véhicule (habitacle, etc.) pour supporter la masse additionnelle du système mécanique. Delucchi (2000) utilise une valeur de 110% pour u_{struct} . Le paramètre m_i^{fix} correspond à la masse de la carrosserie, des accessoires, de la charge, etc., du véhicule i . Cette masse fixe offre un potentiel d'évolution relativement stable dans le temps et est calculée comme suit pour l'année y :

$$m_{c_i}^{fix}(y) = m_{c_i}^{fix}(\chi_i) \times (\mu_{c_i})^{y-\chi_i} \quad (3.11)$$

où χ_i est l'année d'entrée sur le marché de la technologie de véhicule i et μ_{c_i} est le facteur d'évolution annuelle de la masse totale fixe des véhicules de la catégorie c_i .

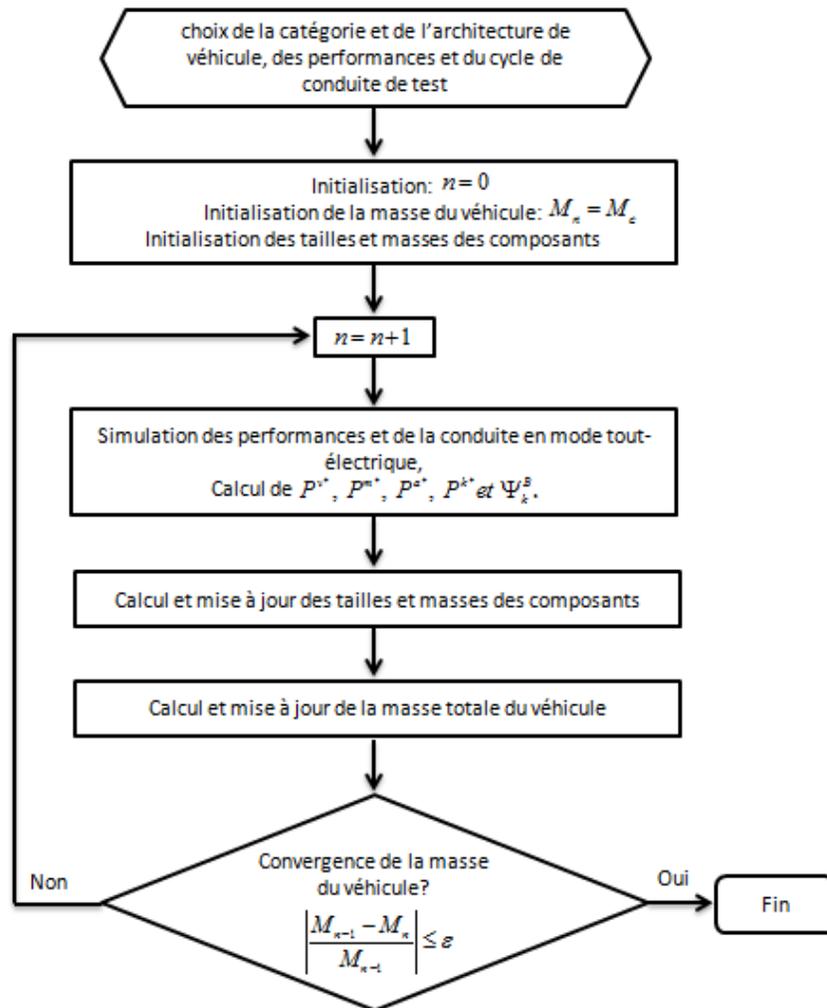


FIGURE 3.2 – Illustration du processus itératif de *mass-compounding* mis en place dans TVSim

Dans l’optique d’adapter TVSim au contexte canadien, une masse fixe moyenne a été déterminée pour chaque catégorie de véhicule représentée dans TIMES-Canada, à partir d’observations de véhicules disponibles ou bientôt disponibles sur le marché canadien (voir la section 3.7 sur la mise en oeuvre de TVSim dans un contexte canadien).

3.4 Modèle de détermination de la consommation

La consommation des véhicules est représentée par le paramètre efficacité (mesurée en Mkm/PJ) dans les modèles suivant l'approche TIMES. Dans TVSim, la consommation des véhicules est calculée grâce à une simulation de conduite. La simulation de conduite des véhicules PHEV est réalisée en répétant un cycle de conduite plusieurs fois, ou en utilisant une combinaison de cycles de conduite, afin de capturer la complémentarité des deux carburants (électricité et carburant fossile) sur un trajet quotidien moyen. La consommation des BEVs étant relativement constante, la simulation d'un seul cycle de conduite est généralement suffisante pour ces véhicules. Les algorithmes utilisés par TVSim pour calculer la consommation des différents types de véhicules sont présentés en annexe 6.13 (algorithmes 7 à 10). Voici comment sont finalement calculées les différentes efficacités des véhicules

BEV

L'efficacité électrique (E_i^B) d'un véhicule BEV i (en Mkm.PJ⁻¹) est calculée comme suit :

$$E_i^B = \frac{\Psi_i^B(T)}{d(T)} \cdot \delta \quad (3.12)$$

où T est la durée totale de la simulation (en s), $d(T)$ la distance totale parcourue (en km), $\Psi_i^B(T)$ est l'énergie électrique totale fournie par la batterie lors de la simulation (en kWh) et δ est la facteur de conversion de kWh.km⁻¹ à Mkm.PJ⁻¹.

PHEV

L'efficacité électrique d'un véhicule PHEV i (en Mkm.PJ⁻¹) est calculée comme suit :

$$E_i^B = \frac{\Psi_i^B(T)}{d^B(T)} \cdot \delta \quad (3.13)$$

où $d^B(T)$ la distance totale parcourue (en km) en utilisant l'énergie électrique.

L'efficacité fossile d'un véhicule PHEV i (en Mkm.PJ^{-1}) est calculée comme suit :

$$E_i^C = \frac{\Psi_i^C(T)}{d^C(T)} \cdot \delta \quad (3.14)$$

où $d^C(T)$ est la distance totale parcourue (en km) en utilisant l'énergie provenant de la combustion de carburant fossile, $\Psi_i^C(T)$ la totalité de l'énergie provenant de la combustion de carburant fossile consommée lors de la simulation.

Facteur d'utilité

Nous avons choisi de laisser de la flexibilité aux modèles TIMES concernant le choix des proportions de carburants utilisées par les véhicules PHEV. Cependant, pour respecter les limites imposées par l'autonomie électrique des véhicules, nous avons introduit un facteur d'utilité (UF_i), correspondant à la proportion maximale d'électricité utilisée par le véhicule i pour chaque km parcouru, et calculé comme suit :

$$UF_i = \frac{d_i^{el}(T)}{d(T)} \quad (3.15)$$

Les paramètres E_i^C , E_i^C et UF_i sont également calculés pour différentes années, afin de permettre aux modèles suivant l'approche TIMES de modéliser l'évolution des technologies de véhicules électriques.

3.5 Modèle de détermination des coûts

L'approche de détermination des coûts (coût d'investissement et coûts d'opération et de maintenance) adoptée par TVSim est adaptée de l'approche par décomposition des coûts utilisée par Cuenca et al. (1999), et décrite dans cette section.

3.5.1 Coût d'investissement

Le coût d'investissement d'une technologie est évalué, dans les modèles suivant l'approche TIMES, selon le coût du marché, et prend ainsi en compte les différentes marges de profits. Le coût d'investissement d'un véhicule peut être divisé en deux catégories : le coût fixe d'investissement et le coût variable. La première catégorie comprend le coût agrégé de tous les composants communs à une catégorie et un type de véhicule (l'équipement, les accessoires, les roues, les freins, etc.), ainsi que les autres frais (administratifs, profits, etc.). Afin d'adapter le modèle TVSim au contexte canadien, nous avons déterminé un coût agrégé moyen pour chaque combinaison catégorie/type de véhicule, à partir d'observations de véhicules disponibles ou bientôt disponibles sur le marché canadien (voir la section 3.7 sur la mise en oeuvre de TVSim dans un contexte canadien). La seconde catégorie comprend le coût de la mécanique du véhicule (soit la somme des coûts des composants dont les tailles ont été déterminées précédemment par le modèle TVSim). TVSim calcule les différents coûts des véhicules pour plusieurs années, afin de fournir les données permettant aux modèles suivant l'approche TIMES de représenter l'évolution des différentes technologies de véhicules.

Le coût d'investissement d'un véhicule i durant l'année y ($CI_i(y)$) est calculé comme suit :

$$CI_i(y) = CF_i(y) + CP_i(y) \quad (3.16)$$

où $CF_i(y)$ est le coût fixe et $CP_i(y)$ le coût variable associé à la mécanique du véhicule i , durant l'année y .

Le **coût du GMP** d'un véhicule dépend des composants dont il est équipé (et donc du type de véhicule), de leurs tailles et de leurs coûts respectifs. Les équations suivantes donnent les calculs du coût du GMP pour chaque type de véhicule représenté dans TVSim, en fonction de l'année.

BEV

$$CP_i(y) = C_i^{batt}(y) + C_i^{elec}(y) + C_i^{mot}(y) + C_i^{trans}(y) \quad (3.17)$$

PHEV-série & power-split

$$CP_i(y) = C_i^{batt}(y) + C_i^{elec}(y) + C_i^{mot}(y) + C_i^{comb}(y) + C_i^{gen}(y) + C_i^{trans}(y) \quad (3.18)$$

PHEV-parallèle

$$CP_i(y) = C_i^{batt}(y) + C_i^{elec}(y) + C_i^{mot}(y) + C_i^{comb}(y) + C_i^{trans}(y) \quad (3.19)$$

où $C_i^{batt}(y)$, $C_i^{elec}(y)$, $C_i^{bmot}(y)$, $C_i^{trans}(y)$, $C_i^{bcomb}(y)$ et $C_i^{gen}(y)$ sont respectivement les coûts de la batterie électrique, du système électronique de puissance, du moteur électrique, de la transmission, du moteur à combustion et du générateur dont est équipé le véhicule i , durant l'année y . Les coûts de ces composants sont calculés en fonction de leurs tailles, de l'année, et selon les formules :

$$C_i^{composant}(y) = \beta_i^{composant}(y) \cdot P_i^{composant} + \gamma_i^{composant}(y) \quad (3.20)$$

pour le moteur à combustion, la transmission, l'électronique de puissance, le moteur électrique et le générateur, et

$$C_i^{batt}(y) = \beta_i^{batt}(y) \cdot cap_i + \gamma_i^{batt}(y) \quad (3.21)$$

pour la batterie électrique.

De manière générale, les coûts d'une technologie nouvelle n'évoluent pas à un rythme constant. Ils diminuent beaucoup plus rapidement durant les premières années suivant l'introduction de la technologie sur le marché. Cette évolution variable est partiellement capturée par l'évolu-

tion des coûts des composants du GMP. L'autre partie provient de l'évolution des coûts fixes d'investissement, que TVSim calcule également en suivant cette tendance :

$$CF_{c_i}(y) = CF_{c_i}(\chi_i) \cdot (y - \chi_i)^{-\phi_{c_i}} \quad (3.22)$$

où $CF_{c_i}(y)$ est le coût d'investissement fixe d'un véhicule appartenant à la catégorie de véhicules c_i durant l'année y , χ_i est l'année de mise en marché de la technologie de véhicule i , et ϕ_{c_i} est le paramètre d'évolution annuelle du coût fixe d'investissement du véhicule i ($0 \leq \phi_{c_i} \leq 1$).

3.5.2 Coûts d'opération et de maintenance

Les coûts annuels d'opération et de maintenance du véhicule i , durant l'année y peuvent également être divisés en deux catégories de coûts : les coûts de remplacement de la batterie (cra_i) et les autres coûts d'opération et de maintenance ($cma_{c_i}(y)$) - communs à la catégorie de véhicules c_i pour l'année y . Le coût annuel d'opération et maintenance d'un véhicule i pour l'année y ($CM_i(y)$) est alors calculé comme suit :

$$CM_i(y) = cra_i + cma_{c_i}(y) \quad (3.23)$$

Le détail de ces différents coûts est expliqué ci-dessous.

Le **coût annuel de remplacement de batterie électrique** du véhicule i (cra_i) pris en compte dans TVSim correspond à la moyenne du coût total de remplacement de la batterie électrique (cr_i) sur la durée de vie (l_i) de ce véhicule, et est calculé comme suit :

$$cra_i = \frac{cr_i}{l_i} \quad (3.24)$$

Le coût total de remplacement de la batterie électrique (cr_i) du véhicule i dépend de la fréquence de remplacement de la batterie et de l'évolution des coûts des batteries électriques. La fréquence de remplacement dépend directement de la durée de vie de chaque batterie qui est calculée en fonction de son cycle de vie (nombre maximal de cycles décharge/recharge) et de sa durée de vie maximale (en années). Ces deux paramètres devraient évoluer avec l'amélioration des batteries électriques.

Le coût total de remplacement de la batterie électrique du véhicule i (cr_i) est calculé par l'algorithme suivant :

Constantes de l'algorithme 1 :

- $\kappa_i(y)$ Valeur du paramètre du cycle de vie du type de batterie installée sur le véhicule i durant l'année y ;
- l_i Durée de vie du véhicule i ;
- $\iota_i(y)$ Valeur du paramètre de la durée de vie du type de batterie installée sur le véhicule i durant l'année y ;
- χ_i Année de sortie du véhicule i sur le marché ;
- n_i Nombre de fois que la batterie du véhicule i est rechargée annuellement (calculé selon l'équation 3.25 pour les BEVs, et 3.26 pour les PHEVs, en considérant qu'ils ne sont pas rechargés plus d'une fois par jour) ;
- cap_i Capacité de la batterie dont est équipé le véhicule i ;
- $c_i^{batt}(y)$ Coût du type de batterie dont est équipé le véhicule i durant l'année y (exprimé en \$.kWh⁻¹).

Variables de l'algorithme 1 :

- τ_i Durée de vie de la batterie installée sur le véhicule i ;
- y Année durant laquelle la batterie du véhicule i est installée ;
- cr_i Coût total de remplacement de la batterie tout au long de la vie du véhicule i .

Algorithm 1 Calcul du coût total de remplacement de la batterie électrique

Initialization

$$y \leftarrow \chi_i; \tau_i \leftarrow \min \left(\frac{\kappa_i(\chi_i)}{n_i}; l_i(\chi_i) \right)$$

while $y + \tau_i \leq l_i + \chi_i$ **do**

$$y \leftarrow y + \tau_i$$

$$cr_i \leftarrow cr_i + cap_i \cdot c_i^{batt}(y)$$

$$\tau_i \leftarrow \min \left(\frac{\kappa_i(y)}{n_i}; l_i(y) \right)$$

end while

Avec

$$n_i^{batt} = \frac{AF_{c_i}}{r_i} \quad (3.25)$$

$$n_i^{batt} = \min \left(\frac{AF_{c_i}}{r_i}; 365 \right) \quad (3.26)$$

où AF_{c_i} est la distance annuelle parcourue (en km) par un véhicule de la catégorie c_i (paramètre de TIMES).

Les **autres coûts de maintenance** correspondent à un coût agrégé (comprenant les frais de changement de composants, les vérifications par un professionnel, etc.) et sont exprimés en $\$.km^{-1}$ parcouru. Soit $cm_{c_i}(y)$ le coût de maintenance lié à la conduite d'un km du véhicule i durant l'année y :

$$cma_{c_i}(y) = cm_{c_i}(y) \cdot AF_{c_i}(y) \quad (3.27)$$

3.6 Validation de TVSim

Le modèle TVSim a été implémenté en MATLAB. Nous avons comparé les résultats obtenus par TVSim pour la modélisation et simulation d'un véhicule BEV compact, avec ceux obtenus par Autonomie et présentés dans l'étude d'ANL (2011). Tous les résultats sont déterminés pour les années : 2010, 2015, 2030 et 2045.

Nous avons modélisé le véhicule de manière à ce qu'il satisfasse les mêmes performances et ait les mêmes spécificités que celui modélisé dans l'étude de l'ANL. Les performances sont les suivantes :

- une vitesse de pointe de 160 km.h^{-1} ;
- accélérer de 0 à 100 km.h^{-1} en 9 secondes ;
- monter une pente de 6% à 105 km.h^{-1} .

Nous avons repris pour notre simulation, l'intégralité des valeurs des paramètres qui étaient présentées dans le rapport de l'ANL. Ces valeurs sont présentées dans le tableau 6.5 (à l'annexe 6.17). Cependant, certains des paramètres requis par TVSim pour fonctionner n'étaient pas spécifiés dans cette étude. Nous avons donc utilisé les valeurs présentées dans la thèse de doctorat de Simpson (2005) pour l'efficacité du système de freinage et de la transmission, et les données présentées par l'USABC (2011) en ce qui concerne l'efficacité, la puissance et l'énergie spécifique des batteries Lithium-Ion. Les valeurs de ces paramètres sont présentées dans le tableau 6.6 (à l'annexe 6.14). La valeur du paramètre u^{struct} de TVSim est nulle pour cette simulation, puisqu'il n'est pas pris en compte dans l'étude de l'ANL.

Les résultats obtenus à l'aide du modèle TVSim sont présentés et comparés avec les résultats du modèle Autonomie dans la figure 3.3.

Dans cette simulation, TVSim tend à sous-estimer la taille (puissance et capacité) de la batterie électrique et celle du moteur électrique pour les deux dernières années de la simulation, comparativement aux résultats obtenus avec le modèle Autonomie.

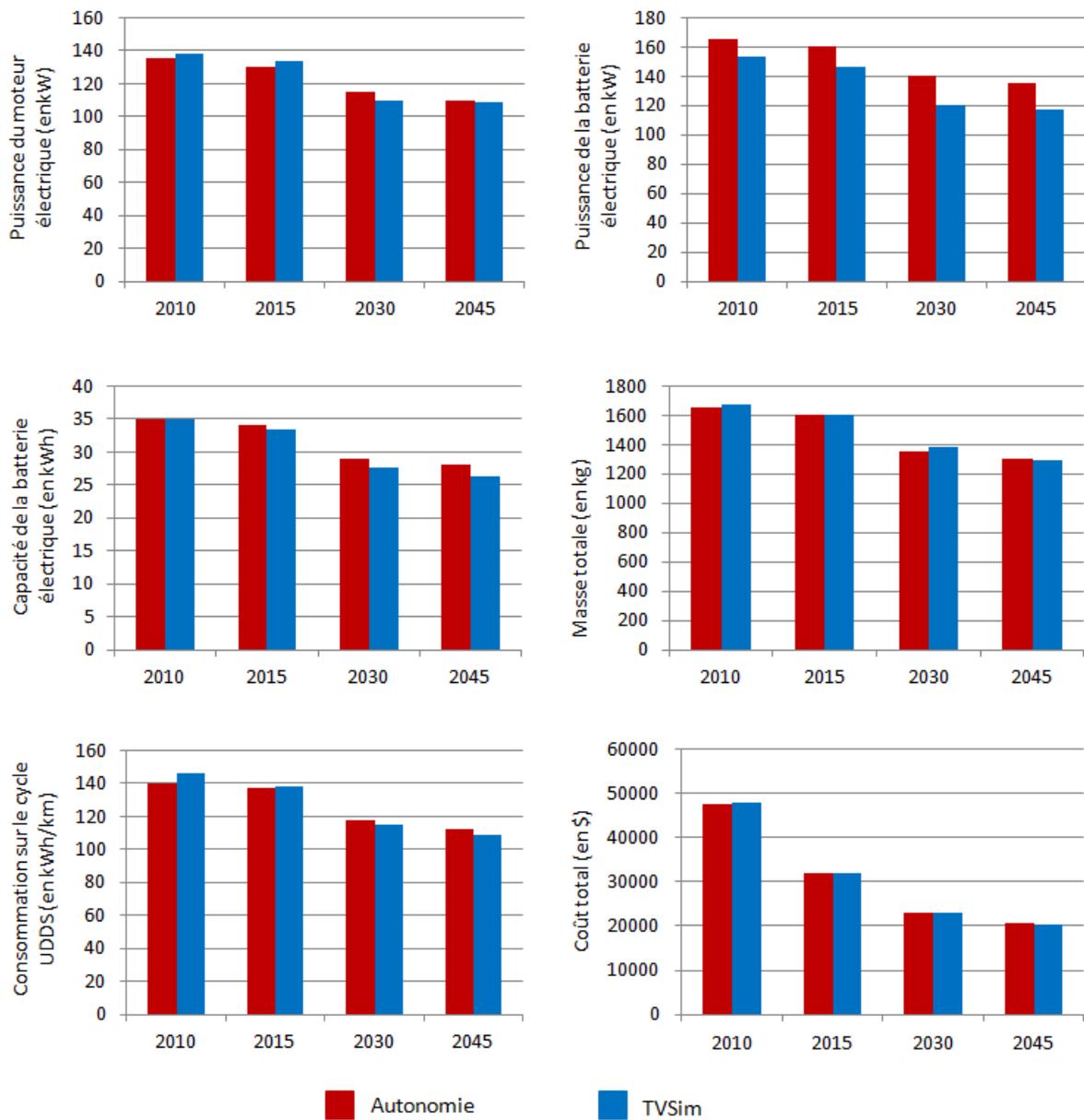


FIGURE 3.3 – Résultats de simulation des modèles Autonomie et TVSim

La différence moyenne observée entre les résultats obtenus par TVSim et ceux obtenus par Autonomie est de 11% et 3% pour la puissance et la capacité de la batterie électrique, sur les quatre années pour lesquelles ces données ont été calculées. Les résultats dépendent énormément des données utilisées. Ces différences peuvent en partie être expliquées par l'utilisation de données différentes de celles de l'ANL, en ce qui concerne la batterie électrique. Cependant, la consommation et le coût du véhicule prédits par TVSim sont très proches de ceux annoncés par l'ANL, avec une différence moyenne de 2.5% et 1% pour la consommation et le coût.

Ainsi, le modèle TVSim est assez précis et fournit des estimations de bonne qualité. Néanmoins, la qualité des données utilisées par un modèle suivant l'approche TIMES se mesure également par leur adaptation au contexte de la zone/région représentée. Nous avons adapté le modèle TVSim au contexte canadien, afin qu'il soit parfaitement compatible avec TIMES-Canada.

3.7 Mise en oeuvre dans un contexte canadien

Dans un premier temps, TVSim est utilisé essentiellement pour fournir les données relatives aux technologies de véhicules électriques de TIMES-Canada. Ainsi, nous l'avons calibré de manière à ce qu'il soit adapté au contexte canadien. Cependant, le choix est laissé à l'utilisateur d'utiliser la version calibrée pour le Canada ou la version de base (non calibrée). Nous verrons dans un premier temps quelles sont les spécificités du contexte canadien prises en compte dans la calibration de TVSim, puis une illustration de l'impact de cette calibration sur la simulation d'un véhicule.

3.7.1 Adaptation au contexte canadien

Le modèle TVSim a été calibré afin de prendre en compte l'impact du climat canadien sur la consommation des véhicules, et de fournir des coûts représentatifs du marché canadien.

Climat canadien

Comme précédemment mentionné, le climat joue un rôle important dans la détermination de la consommation d'un véhicule. En effet, la consommation des accessoires tels que le chauffage et la climatisation peuvent représenter une grande proportion de la consommation d'un véhicule, particulièrement dans un pays comme le Canada où le climat est marqué par des températures extrêmes.

Les conditions climatiques ne sont pas directement prises en compte dans les cycles de conduite. Nous avons donc choisi d'ajuster les valeurs des paramètres ρ (masse volumique de l'air) et Ω (consommation des accessoires) afin de les adapter au climat canadien.

Ces paramètres dépendent directement de la température, et puisque celle-ci est caractérisée au Canada par sa grande variabilité, nous calculons la consommation annuelle moyenne d'un véhicule à partir de sa consommation mensuelle tout au long de l'année. Par exemple, la consommation électrique annuelle moyenne du véhicule i (E_i^B) est donnée par :

$$E_i^B = \frac{\sum_{j=1}^{12} E_i^B(j)}{12} \quad (3.28)$$

où $E_i^B(j)$ est la consommation électrique du véhicule i durant le mois j .

Coûts fixes

Le paramètre c^{fix} absorbe tous les coûts autres que ceux des éléments du GMP d'un véhicule, dont les éléments propres au marché local (taxes, marges de profits, etc.), et est relativement stable au sein d'une catégorie de véhicules. Nous avons donc choisi de déterminer la valeur

de ce paramètre pour chaque catégorie de véhicule représentée dans TIMES-Canada, à partir d'observations de véhicules actuellement en vente au Canada ou qui seront rapidement introduits sur le marché canadien, afin que la réalité canadienne soit reflétée dans les données utilisées par TIMES-Canada. Pour chaque observation de véhicule, nous avons calculé le coût du GMP, que nous avons soustrait au prix de vente du véhicule, afin d'obtenir la valeur du paramètre c^{fix} pour cette observation. La valeur du paramètre c_c^{fix} correspond à la moyenne des valeurs des paramètres c^{fix} de toutes les observations de véhicules appartenant à la catégorie c .

Masse fixe

La masse fixe m_c^{fix} des véhicules de chaque catégorie de véhicules a également été déterminée à partir de l'échantillon d'observations de véhicules disponibles sur le marché canadien.

Autres paramètres

Nous avons également estimé des valeurs pour les paramètres C^R , C^D et A^F (les coefficients de résistance au roulement, de traînée aérodynamique et la surface frontale d'un véhicule) pour chaque classe de véhicule, et à partir de l'échantillon d'observations de véhicules disponibles sur le marché canadien.

3.7.2 Illustration pour un véhicule

Pour illustrer le fonctionnement de TVSim, et de sa version 'adaptée' au contexte canadien, nous avons modélisé et simulé la conduite d'un petit véhicule ayant les mêmes performances et caractéristiques que le modèle iMiev de Mitsubishi Motors, soit :

- un temps d'accélération de 13,5 secondes pour passer de 0 à 100 km.h⁻¹ ;
- une vitesse de pointe de 130 km.h⁻¹ ;
- une autonomie de 130 km ;

- une surface frontale de 2,14 m² ;
- un coefficient de résistance au roulement de 0,011 ;
- un coefficient de traînée aérodynamique de 0,33.

Les valeurs des paramètres d'efficacité, de puissance ou d'énergie spécifique, ainsi que de coûts utilisées sont celles utilisées dans la comparaison avec l'Autonomie (Voir tableaux 6.5 et 6.6 à l'annexe 6.14), que nous avons convertis en Cdn\$ (à un taux de 1,05US\$). Nous utilisons cependant pour les paramètres $m_{small.car}^{fix}$ et $CF_{small.car}$ (qui correspondent à la masse fixe et au coût fixe d'un véhicule appartenant à la catégorie des petits véhicules - la catégorie de véhicule à laquelle appartient la iMiev), les valeurs définies à partir d'observations réelles de véhicules en vente ou qui le seront sous peu au Canada ; à savoir : 947 kg et 24 840 Cdn\$.

La simulation de conduite a été effectuée à partir de l'un des cycles de conduite utilisés par Mitsubishi pour tester la iMiev : NEDC (*New European Driving Cycle*), et selon les hypothèses utilisées dans les simulations de conduites par les constructeurs. C'est-à-dire que l'énergie requise par les accessoires durant la conduite est nulle, l'air ambiant est sec, la température est de 20 °C, et la pression de l'air est de 101 325Pa (Ainsi, la masse volumique de l'air $\rho = 1,2042$).

Les résultats de modélisation et simulation obtenus par TVSim, pour l'année 2010, sont présentés et comparés à ceux annoncés par Mitsubishi pour la iMiev^{1 2}, dans le tableau 3.2.

Calcul de la consommation dans un contexte canadien

Mitsubishi annonce, sur son site internet canadien, une consommation 'réelle' de 186,6 Wh/km, pour sa iMiev. Nous avons donc calculé la consommation moyenne du véhicule précédemment modélisé à l'aide de TVSim, dans des conditions climatiques canadiennes, plus spécifiquement

1. Dans les simulations des constructeurs destinées à déterminer les spécificités des véhicules, le paramètre ϖ^S est fixé à 1 ; ainsi : $conso = capacite/autonomie$.

2. 32 998Cdn\$ correspond au prix de base, et 35 998Cdn\$ au prix de la version premium ; les véhicules représentés dans TIMES-Canada correspondent aux véhicules qui sont majoritairement choisis par les consommateurs canadiens, en termes d'équipement ; concernant la iMiev, nous considérons que les consommateurs choisiront le modèle premium.

celles de la ville de Montréal, afin de la comparer à cette donnée. La conduite de ce véhicule a été simulée selon les conditions climatiques mensuelles de cette ville, en prenant en compte des valeurs de la masse volumique de l'air et la puissance requise par les accessoires, adaptées aux conditions climatiques de Montréal. Ces valeurs sont présentées au tableau 3.3, pour chacun des 12 mois de l'année. Les températures mensuelles moyennes sont tirées de Environnement Canada (2006). Les valeurs de ρ sont déterminées sous l'hypothèse que l'humidité et la pression de l'air sont constantes tout au long de l'année. Les valeurs du paramètre Ω correspondent à divers accessoires, dont le chauffage en hiver et la climatisation en été, et sont tirées du rapport du Centre d'Analyse Stratégique, sur l'évolution des voitures (2011) (nous considérons que l'énergie requise par les accessoires autres que le chauffage et la climatisation est constante tout au long de l'année et égale à 200W).

Caractéristiques	TVSim	Mitsubishi	Erreur
Puissance du moteur électrique (P^{mot} - en kW)	53	49	8%
Capacité de la batterie électrique (cap - en kWh)	16,3	16	2%
Masse totale (m^{tot} - en kg)	1200	1171	2,5%
Consommation électrique (en Wh.km ⁻¹)	125,4	123	2%
Coût d'investissement (CI - en Cdn\$)	36 562	35 998 (32 998)	1,6% (10,8%)

Tableau 3.2 – Résultats de la modélisation et simulation d'un petit véhicule BEV par TVSim, et comparaison aux données constructeur

Nous obtenons avec le modèle TVSim une consommation moyenne de 180,46 Wh/km, soit une erreur de 3,3% par rapport à la consommation annoncée sur le site web canadien du constructeur. Les résultats, en termes de consommation, alliant l'énergie requise par les accessoires et l'énergie requise pour la traction du véhicule, sont illustrés dans la figure 3.4.

Mois	Température moyenne (en °C)	ρ	Ω (en W)	Mois	Température moyenne (en °C)	ρ	Ω (en W)
Janvier	-9	1,3364	2 810	Juillet	21	1,1960	700
Février	-7	1,3263	2 640	Août	21	1,2001	671
Mars	-1	1,2971	2 132	Septembre	16	1,2208	608
Avril	7	1,2600	1 454	Octobre	9	1,2511	1 285
Mai	15	1,2250	635	Novembre	3	1,2783	1 793
Juin	20	1,2042	641	Décembre	-6	1,3213	2 558

Tableau 3.3 – Valeurs moyennes mensuelles de la masse volumique de l’air et de la consommation des accessoires d’un petit véhicule, à Montréal

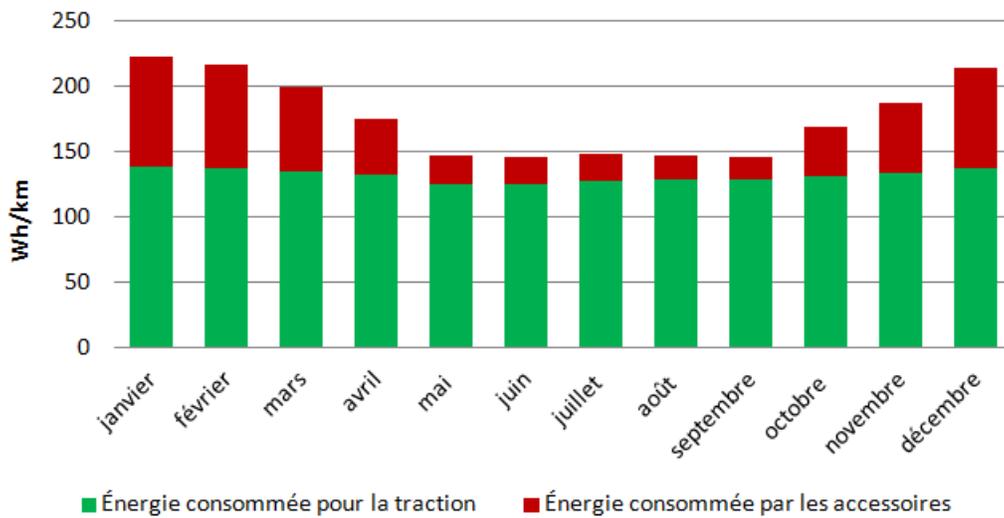


FIGURE 3.4 – Énergie moyenne consommée par les accessoires et pour la traction d’un petit véhicule à Montréal, selon le mois de l’année (modélisé avec TVSim)

3.8 Synthèse des caractéristiques de TVSim

Le modèle de simulation TVSim a été conçu afin de faciliter le processus d'analyse technologique sur les véhicules électriques, réalisée à l'aide de modèles suivant l'approche TIMES. En conclusion de ce chapitre, nous résumons les caractéristiques du modèle TVSim, qui :

- est **accessible et facile à utiliser**. Grâce à l'approche implicite de modélisation de véhicules qu'il suit, le modèle TVSim ne nécessite pas de grandes connaissances mécaniques ou automobiles de la part des utilisateurs.
- est **simple et rapide à exécuter**. La représentation simplifiée des composants et de leur fonctionnement, limite le nombre de calculs et la complexité du modèle TVSim, conçu pour fonctionner en utilisant des données disponibles dans la littérature.
- est **adapté à l'analyse technologique**, grâce à la flexibilité qu'il offre à l'utilisateur en termes de représentation des composants, performances et cycles de conduite.
- offre des **estimations précises de la consommation**. La simulation dynamique de conduite (seconde après seconde) selon un cycle de conduite, permet la modélisation dynamique des flux d'énergie, ainsi que des stratégies de contrôle des véhicules hybrides.
- offre des **estimations fiables et détaillées des coûts** d'investissement et d'opération des véhicules, en suivant une approche de détermination des coûts par décomposition calibrée sur des observations réelles de véhicules électriques.
- **prédit l'évolution de la consommation et des coûts** des véhicules simulés en fonction de l'évolution des technologies des différents composants dont sont équipés les véhicules.
- est **adapté au contexte canadien**, en tenant compte de l'impact des conditions climatiques canadiennes sur la consommation des véhicules, et parce que le modèle offre la possibilité, pour certains paramètres, d'utiliser des valeurs calibrées pour représenter la réalité canadienne.
- fournit **des données comparables** à celles utilisées pour modéliser les autres technologies de véhicules dans TIMES-Canada, qui proviennent de la littérature et ont été estimées à l'aide de

modèles similaires à TVSim, et que les valeurs des données requises pour faire fonctionner TVSim proviennent des mêmes sources.

3.9 Références

Argonne National Laboratory (2011b). “Light-Duty Vehicle Fuel Consumption Displacement Potential up to 2045”. ANL/ESD/11-4.

Centre d’Analyse Stratégique (2011). “La voiture de demain : carburants et électricité”. Documentation Française, Ref : 9782110087386.

Cuenca R., Gaines L., Vyas A. (1999). “Evaluation of Electric Vehicle Production and Operating Costs”. ANL/ESD/41.

Delucchi M. (2000). “Electric and Gasoline Vehicle Lifecycle Cost and Energy-Use Model”, report no. UCD-ITS-RR-99-4, Institute of Transportation Studies, University of California, Davis.

Environnement Canada (2006). “Normales climatiques au Canada 1971-2000”. Station Jean Lesage, Québec.

Graham R. (2001). “Comparing the Benefits and Impacts of Hybrid Electric Vehicle Options”. EPRI, No. ref : 1000349.

Simpson A. (2005). “Parametric Modelling of Energy Consumption in Road Vehicles” (thèse de doctorat, University of Queensland).

Transport Canada (2012). “Incidence du cycle de conduite et du climat sur la consommation électrique et l’autonomie des véhicules de tourisme entièrement électriques”. Disponible en ligne à l’adresse : http://www.tc.gc.ca/media/documents/programmes/evs26_fra.pdf (Dernière consultation : juillet 2013).

USABC - US Advanced Batteries Consortium (2011). “USABC goals for advanced batteries for EVs”. Disponible en ligne sur le site de l’USABC, à l’adresse : http://www.uscar.org/guest/article_view.php?articles_id=85 (Dernière consultation : juillet 2013).

Chapitre 4

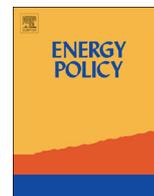
Electrification of the Canadian road transportation sector : A 2050 outlook with TIMES-Canada



ELSEVIER

Contents lists available at ScienceDirect

Energy Policy

journal homepage: www.elsevier.com/locate/enpol

Electrification of the Canadian road transportation sector: A 2050 outlook with TIMES-Canada



Olivier Bahn ^{a,*}, Mathilde Marcy ^a, Kathleen Vaillancourt ^b, Jean-Philippe Waaub ^b

^a GERAD and Department of Management Sciences, HEC Montréal, Montreal, QC, Canada H3T 2A7

^b GERAD and Department of Geography, UQAM, Montreal, QC, Canada

HIGHLIGHTS

- We use a newly developed TIMES-Canada model of the entire Canadian energy system.
- We assess potentials for electrification of the Canadian road transport sector.
- We analyse three scenarios: baseline, energy policy and climate policy.
- EVs penetrate notably after 2040 in the baseline and after 2030 in the energy policy scenario.
- The climate policy forces a stronger penetration of EVs.

ARTICLE INFO

Article history:

Received 1 February 2013

Accepted 7 July 2013

Available online 14 August 2013

Keywords:

Bottom-up energy modeling

Electric vehicles

Policy analysis

ABSTRACT

We use a newly developed bottom-up model of the entire Canadian energy system (TIMES-Canada) to assess potentials for electrification of the road transport sector. A special emphasis has been put on the modelling of the Canadian road transport, by considering a variety of vehicles for passenger and freight transportation. Besides a business-as-usual (baseline) scenario, we have analysed an energy policy scenario imposing targets for electric vehicle penetration and a climate policy scenario imposing targets for greenhouse gas emission reduction. Our analysis shows on the one hand that electric vehicles penetrate notably the passenger vehicle market after 2040 in the baseline scenario and after 2030 in the energy policy scenario (following the assumed penetration targets). On the other hand, the assumed climate policy forces a stronger penetration of electric vehicles for passenger transportation, with a progressive phasing out of internal combustion engine vehicles, whereas the latter vehicles remain dominant for freight transportation but with a shift away of fossil fuels and in favour of biofuels. A sensitivity analysis on the (assumed) evolution of electric vehicles over time confirms these general trends.

© 2013 Elsevier Ltd. All rights reserved.

1. Introduction

All around the world, transportation sectors rely heavily on petrol-based fuels. In 2010, as an illustration, 93% of fuels used by worldwide transportation were oil-products (IEA, 2012). Besides issues related to security of oil supply, such reliance makes transportation sectors large emitters of different atmospheric pollutants (such as carbon monoxide) and of carbon dioxide (CO₂) an important greenhouse gas (GHG). As an illustration, 23% of world CO₂ emissions (from fossil fuel combustion) came from transportation in 2009 (IEA, 2010a). In Canada, the contribution of the transportation sector to final energy consumption and CO₂ emissions is more important than the world average: transportation accounts for 30% of the Canadian final energy consumption (versus 27% for the world average, IEA (2012))

and for 30% of its CO₂ emissions (IEA, 2010a). Geographic considerations (a vast territory and a low population density) are mainly responsible for these trends.

To address the (negative) externalities associated with transportation, a first set of measures may be taken to reduce transportation demand. One may for instance encourage carpooling, public transportation or telecommuting. For example, in Canada, the *ecoMOBILITY Program*¹ of Transport Canada encourages the use of public transportation by funding local projects. A second set of (policy) measures may also be adopted to reduce the reliance of transportation on fossil fuels. In particular, one may promote the deployment of 'clean(er)' vehicles: vehicles equipped with a low-consumption internal combustion engine (ICV) powered by conventional fuels (gasoline and diesel) or biofuels; conventional hybrid electric – HEVs; electric

* Corresponding author. Tel.: +1 514 340 6503; fax: +1 514 340 5634.
E-mail address: olivier.bahn@hec.ca (O. Bahn).

¹ See: <http://www.tc.gc.ca/eng/programs/environment-ecomobility-menu-eng-144.htm>.

vehicles (EVs: plug-in hybrid – PHEVs – or battery electric – BEVs); and fuel cell vehicles (FCVs) powered by hydrogen. As an illustration, the province of Ontario has proposed for 2020 a 5% penetration target for EVs,² whereas the province of Quebec has proposed for 2020 a target of 25% EVs for new ‘light’ passenger vehicles equivalent to a 5% penetration target by 2020.³ Moreover, the choice of ‘clean’ energy processes (e.g., use of fossil fuels with carbon capture and sequestration) or ‘clean’ energy sources to generate electricity or produce hydrogen shall reinforce the benefits arising from the use of EVs and FCVs. Such Canadian policies take into account world trends considering among other things the availability of new types of vehicles from international car manufacturers.

The measures we have mentioned can therefore be part of energy policies designed to increase energy security by reducing the consumption of fossil fuels, or part of climate policies designed to curb GHG emissions (such energy and climate policies being of course inter-related). Within the Copenhagen Accord (United Nations, 2009) for instance, the Canadian federal government has committed to reducing Canadian GHG emissions by 17% (below 2005 levels) by 2020. Such a GHG reduction target will certainly impact the transportation sector.

The aim of this paper is to evaluate and compare effects on the transportation sector of generic climate policies and specific policies promoting the deployment of clean vehicles. The paper aims in particular at analysing the impacts of GHG emission reduction targets on the deployment of EVs (and FCVs); and conversely at assessing the consequences of imposing EV penetration targets on fossil fuel consumption, electricity generation and GHG emission levels. Our study focuses on Canada, but our approach is applicable to any other country.

Since several years, the literature on these issues is growing. It can be divided into two broad categories: articles using simulation approaches and those using optimization ones. On the one hand, simulation approaches have mainly been used to evaluate consequences (on the energy sector – electricity generation, in particular – and on GHG emissions) of deploying clean vehicles at different penetration levels. For instance, a CanESS model has been used for Canada (Steenhof and McInnis, 2008), GREET models for the United States (Thomas, 2009) and Canada (Kantor et al., 2010), an EDGE-CA model for the state of California (McCarthy and Yang, 2010) and the UKTCM model for United Kingdom (Brand et al., 2012). On the other hand, optimization approaches have mostly been used to analyse effects of different energy and climate policies on the penetration of clean vehicles. For instance, bottom-up MARKAL (or TIMES) models have been used for Japan (Endo, 2007), the USA (Yeh et al., 2008; McCollum et al., 2012), the city of Madrid (Contreras et al., 2009) and Norway (Rosenberg et al., 2010). Likewise, a top-down GCAM model (formerly MiniCAM) has been used for the United States (Wise et al., 2010) as well as for many world regions (Kyle and Kim, 2011). Let us mention also for the United States the use of hybrid approach, linking in particular a top-down EPPA model and a MARKAL model (Schäfer and Jacoby, 2006), and a hybrid NEMS model (EPRI, 2007). Let us mention finally the use of a multinomial logit approach (within a bottom-up model) to study the impact of a carbon tax on transport in several world regions (Girod et al., 2012).

In this paper, we use TIMES-Canada, the Canadian version of the TIMES model (Loulou et al., 2005). TIMES is a bottom-up optimization model that represents with great techno-economic details the whole energy sector of a country or region, from primary to useful energy. It models in particular the different vehicle types (ICVs, EVs and FCVs) that could be used within the transport sector. It is thus

appropriate to assess impacts of energy and climate policies on the deployment of specific clean vehicles.

This paper is organized as follows. In Section 2, we present an overview of the TIMES modelling approach, and give some details about TIMES-Canada and the modelling of the Canadian road transportation sector. Section 3 details our baseline, climate policy and energy policy scenarios. In Section 4, we analyse impacts of these policies in particular on: energy production and consumption, GHG emissions, EVs market penetration and on the electricity sector. Section 5 provides a sensitivity analysis on the evolution of some EVs characteristics. In Section 6, we compare our results with the ones of the existing literature. Finally Section 7 concludes.

2. Modelling approach

2.1. Overview of TIMES

TIMES stands for *The Integrated MARKAL-EFOM System*. It combines all the advanced features of the MARKAL (MARKet ALlocation) model (Fishbone and Abilock, 1981) and to a lesser extent the ones of the EFOM (Energy Flow Optimization Model) model (Van der Voort, 1982), as well as various new features developed over time; see Loulou et al. (2005), Loulou and Labriet (2008) and Loulou (2008). Within the Energy Technology Systems Analysis Program (ETSAP)⁴ of the International Energy Agency, MARKAL and TIMES models are currently used by more than 80 institutions in nearly 70 countries for various purposes including economic analysis of climate and energy policies.

TIMES represents the entire energy system of a country or region. Such a system typically includes extraction, transformation, distribution, end-uses, and trade of various energy forms and (some) materials. Each stage is described by means of specific technologies characterized by economic and technological parameters. The model tracks GHG and criteria air contaminant (CAC) emissions from fuel combustion and processes. Emission reduction is brought about by technology and fuel substitutions (which lead to efficiency improvements and process changes), by carbon capture and sequestration and by endogenous demand reductions. In the baseline scenario, end-use demands are exogenously specified in terms of socio-economic needs (e.g., transportation, expressed in vehicle-kilometres) over a future horizon. However, contrary to traditional bottom-up models, TIMES acknowledges that demands are elastic to their own prices. This feature ensures the endogenous variation of demands in constrained scenarios (e.g., scenarios imposing GHG emission reductions), thus capturing the vast majority of macroeconomic feedbacks on the energy system.

TIMES is cast as a dynamic linear programming model. Under the assumption that energy markets are under perfect competition, a single optimization, which searches for the maximal net total surplus, simulates market equilibrium. Maximizing the net total surplus (i.e., the sum of producers’ and consumers’ surpluses) is operationally done by minimizing the net total cost of the energy system that includes investment costs, operation and maintenance costs, plus the costs of imported fuels, minus the incomes of exported fuels, minus the residual value of technologies at the end of the model horizon, plus welfare losses due to endogenous demand reductions. The main model outputs are future investments and activities of technologies at each period of time. An additional output of the model is the implicit price (shadow price) of each energy form, material and emission, which corresponds to an opportunity cost.

² “One out of every 20 vehicles driven in Ontario” should “be electrically powered by 2020”; see: <http://www.mto.gov.on.ca/english/dandv/vehicle/electric/index.shtml>.

³ 25% of new light passenger vehicles sold in Quebec by 2020 should be EVs; see: <http://vehiculeselectriques.gouv.qc.ca/plan-action.asp#>.

⁴ See: <http://www.iea-etsap.org/web/index.asp>.

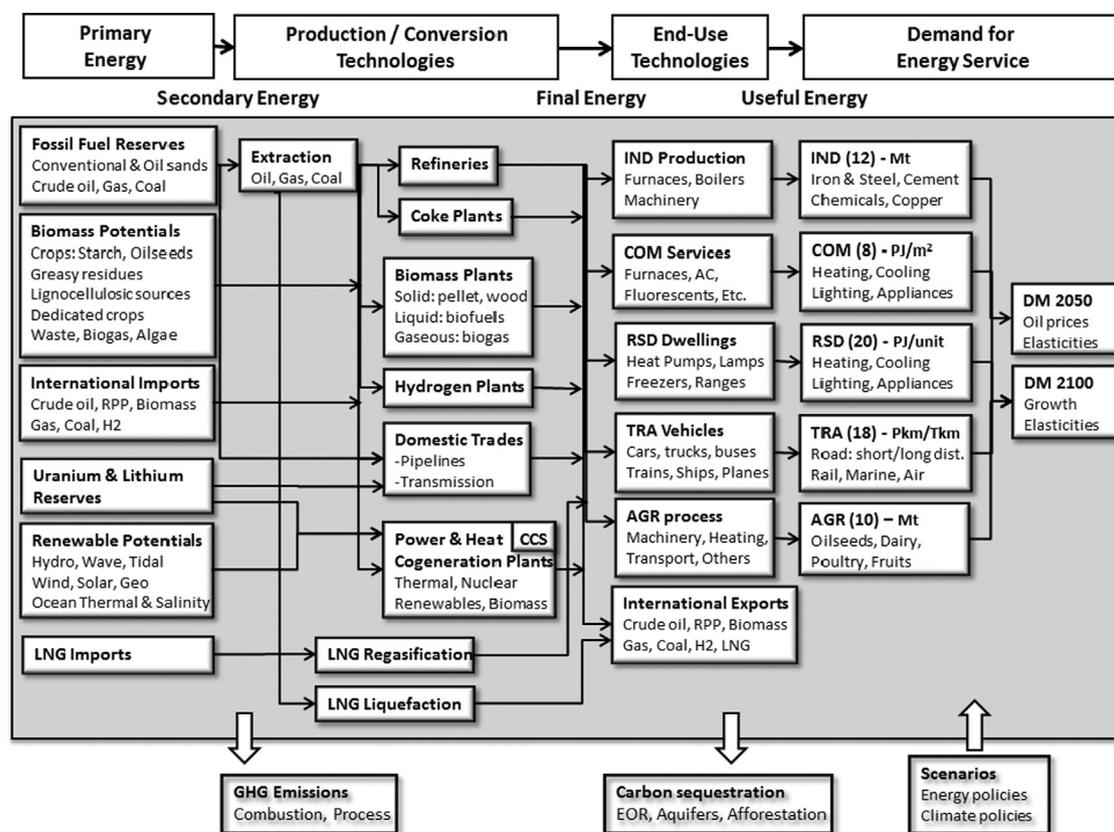


Fig. 1. Simplified representation of the RES of each province and territory.

2.2. Overview of TIMES-Canada

Although an 11-region MARKAL model of the Canadian energy system has been developed at GERAD⁵ in the past (see in particular Berger et al., 1992; Loulou et al., 1996; Kanudia and Loulou, 1999), a completely new database has been built to reflect the current situation on Canadian energy markets and to fit into the new TIMES modelling paradigm. TIMES-Canada covers the energy system of the 13 Canadian provinces and territories having their own reference energy system (RES; see Fig. 1), but linked together through energy, material as well as emission flows. For modelling and reporting purposes, four geographical regions have been created: (i) WEST: Alberta (AB), British Columbia (BC), Manitoba (MB) and Saskatchewan (SK); (ii) CENT: Ontario (ON) and Quebec (QC); (iii) EAST: New Brunswick (NB), Newfoundland (NL), Nova Scotia (NS) and Prince Edward Island (PE); and (iv) NORTH: Northwest Territories (NT), Nunavut (NU) and Yukon (YT).

The TIMES-Canada model is driven by a set of 53 end-use demand categories for energy services in five sectors: agriculture (AGR), commercial (COM), industrial (IND), residential (RSD) and transportation (TRA). The model is calibrated on a 2007 base year, using energy balances available at Statistics Canada (2007). In addition, numerous data sources were used to model energy flows in more details, including the *Comprehensive Energy use Database* of the Office of Energy Efficiency (OEE, 2007), and to calibrate the techno-economic attributes of energy technologies (Vaillancourt et al., 2012).

TIMES-Canada spans 44 years (2007 to 2050). Shorter time periods (1 to 2 years) are defined at the beginning of the horizon, while longer time periods (5 to 15 years) are considered afterwards, as uncertainties

related to data are increasing. For each period, there are 12 time slices defined uniformly across Canada, with four seasons a year (spring, summer, fall and winter) and three periods a day (day, night and peak hours). All costs are in 2007 Canadian dollars (\$). The global annual discount rate has been fixed to 5%. Additional rates can be specified on a technology basis. They correspond to hurdle rates that take into account uncertainties related to future technological development. For example, technological hurdle rates up to 18% are used for fuel cell vehicles (Loulou et al., 2009).

2.3. Modelling of the Canadian road transport sector

This section details the Canadian road transport sector on which our paper focuses. Fig. 2 presents first the reference energy system for the whole transport sector that includes road transportation.

Demand categories appear on the right hand-side of Fig. 2. Road transportation demand covers 13 different end-uses: 10 for passenger transportation (expressed in million passenger-kilometres) and 3 for freight transportation (in million tons-kilometres). Note that to illustrate further the richness of our model, a detailed RES for passenger transportation by small cars is presented in Appendix A.

Transportation fuels, listed in the upper left of Fig. 2, can be divided into 'conventional' and 'non-conventional' fuels. The former category contains fuels that are used to feed transportation technologies deployed in Canada before 2007 (our base year). For road transportation, this includes: diesel, gasoline, natural gas and natural gas liquids.⁶ The latter category encompasses 'new' fuels for transportation technologies not commercially deployed in Canada before 2007.

⁵ GERAD: Group for Research in Decision Analysis; HEC Montréal, Polytechnique Montréal, McGill University and Université du Québec à Montréal.

⁶ Natural gas liquids (NGL) refer to propane, ethane and butane.

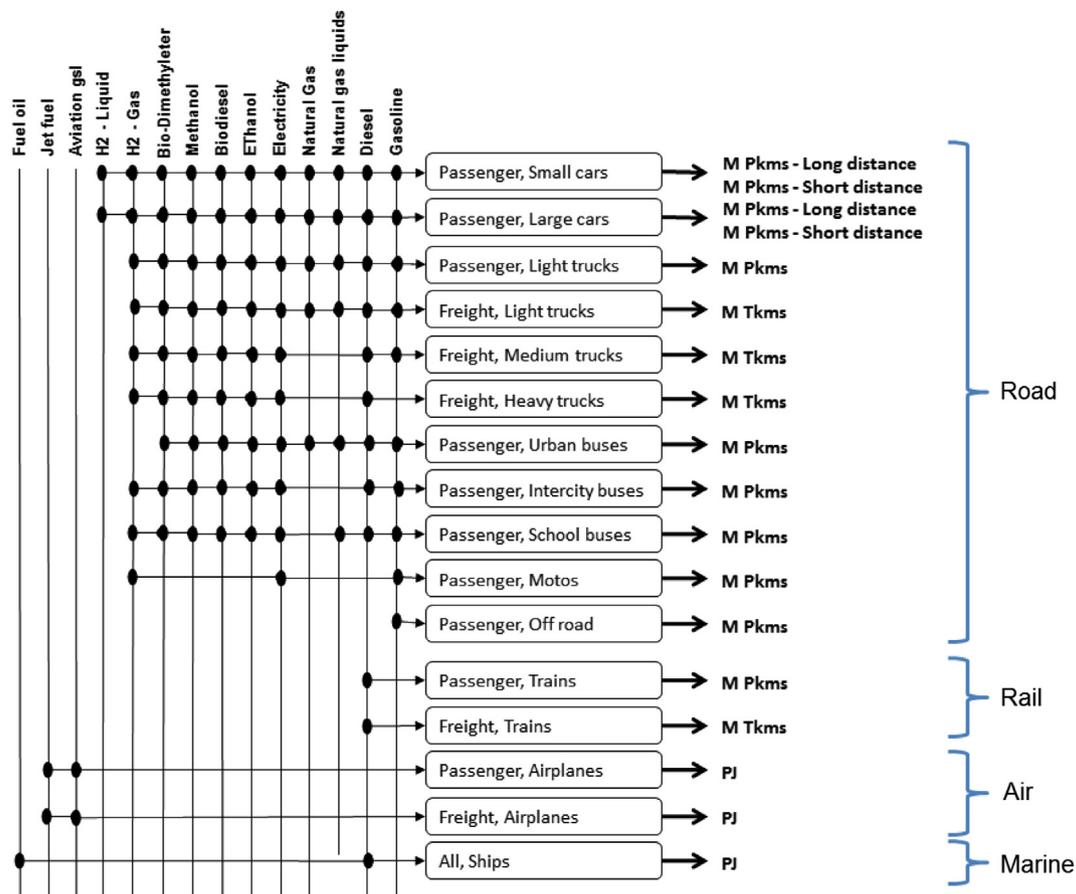


Fig. 2. The RES of the transportation sector.

For road transportation, this corresponds to electricity (currently – 2013 – available), biofuels (biodiesel, bio-dimethyl ether, ethanol and methanol) that could rapidly be available, and hydrogen (hydrogen gaseous and hydrogen liquid) that could be available in a longer run.

Generic transportation technologies appear in boxes in the middle of Fig. 2. Each vehicle technology represented uses a specific fuel (or combination of fuels) to satisfy a particular end-use demand. One distinguishes here again two categories of vehicles: ‘conventional’ and ‘non-conventional’. In TIMES-Canada, the former category corresponds to vehicles equipped with an internal combustion engine (ICVs) that run on conventional fuels. The latter category contains a series of alternative transportation technologies. A hybrid electric vehicle (HEV) combines an internal combustion engine (ICE) running on gasoline or diesel with an electric engine for which it generates its own electricity. Rather than fossil fuels, an ICV may also run on non-conventional fuels: biofuels (biodiesel, bio-dimethyl ether, ethanol and methanol, as already mentioned) on the one hand, (liquid or gaseous) hydrogen on the other hand. Note that ethanol can be used alone or blended with gasoline. Fuel cell vehicles (FCVs) run on gaseous hydrogen. Finally, both plug-in hybrid electric vehicles (PHEVs) and battery electric vehicles (BEVs) are equipped with an electric motor. The latter is fed by an internal battery rechargeable directly from the grid through a charging infrastructure. But whereas a BEV relies fully on its electric motor(s), a PHEV is equipped with both an electric motor and an ICE (running on gasoline or diesel). The focus in TIMES-Canada database is on EVs equipped with lithium-ion batteries (Li-Ion), as it is assumed to be the most promising technology; but few vehicles equipped with lead-acid and nickel-metal hydride (NiMH) batteries have also been modelled. Charging stations are explicitly represented in TIMES-

Canada, as such infrastructure is an important factor to consider when analysing market penetration possibilities for EVs. Charging activities are defined in TIMES-Canada on a time slice basis, modelling the possibility to charge EVs during day (at work) or night (at home) while driving during rush hours. This feature is particularly relevant as electricity prices fluctuate significantly across time slices. More details about the different EVs and charging stations modelled are presented in Appendix B.

Competition among technologies serving a particular demand is essentially based on lifecycle costs, which are calculated using capital, operation and maintenance and fuel costs. The latter heavily depend on fuel price and vehicle’s efficiency (expressed in kilometers driven on a unit of energy). For new technologies, capital costs (respectively, efficiency) are expected to decrease (resp., increase) over time, thanks to (exogenously assumed) public and private R&D investments. Cost and efficiency dynamics are illustrated for EVs in Appendix C.

3. Scenarios characterization

This section presents the three scenarios we shall analyse in Section 4: a baseline scenario, a climate policy scenario imposing a limit on GHG emissions and an energy policy scenario promoting the deployment of EVs.

3.1. Baseline scenario

Our baseline scenario, denoted BAU, is a business-as-usual case. End-use demands are first projected to the 2020 horizon using

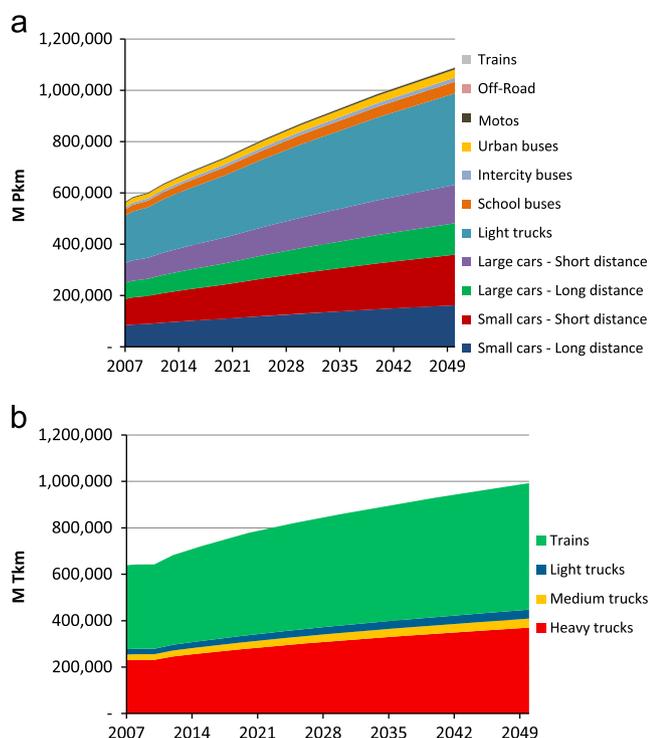


Fig. 3. (a) Demands for passenger transportation per category, 2007–2050. (b) Demands for freight transportation per category, 2007–2050.

socio-economic drivers of the National Energy Board (NEB, 2009). These demands are then extended to 2050 using a regression approach. Fig. 3a and b illustrate these projections for passenger and freight transportation end-use demands.

Between 2007 and 2050, demand for passenger transportation is expected to grow by 93%, whereas demand for freight transportation is expected to grow by only 55%. Passenger transportation is dominated by personal cars (small and large), with proportions staying around 60% between 2007 and 2050, in the absence of specific policies intended to modify consumer behaviours in favour of public transportation. Note however that our baseline scenario, following the NEB (2009), implicitly takes into account policies (already planned or under development) that will affect the transportation sector, such as regulations setting more stringent fuel efficiency standards for new vehicles. Note also that crude oil price is assumed to be 90 US\$/bbl by 2020 and 123 by 2050 on international markets, in line with the reference cases of the NEB (2009) and of the IEA (2010b).

3.2. Climate policy scenario

By signing the Copenhagen Accord (United Nations, 2009), the Canadian federal government has committed to reducing Canadian GHG emissions by 17% below 2005 levels by 2020. Reduction commitments have also been taken by provincial governments (Environment Canada, 2011). Our climate policy scenario takes these provincial targets into account and imposes the federal targets for the Canadian territories (Northwest Territories, Nunavut and Yukon) in the absence of specific territorial reduction targets. Note that this yields for Canada as a whole a more stringent reduction target than the one resulting from the Copenhagen Accord. Our climate policy scenario, denoted CLIM, defines also targets for 2050, by extending the 2020 targets through a simple linear regression, up to a maximum 50% reduction. All these targets are detailed in Appendix D. Note further that to take

into account the current political context, in particular provincial jurisdiction, our climate policy scenario assumes also that each province and territory needs to reach its own reduction targets. In other words, it is assumed that provinces and territories cannot trade GHG emission permits.

3.3. Energy policy scenario

Besides climate change concerns, the electrification of the transportation sector has gained interest in some Eastern Canadian provinces for energy security reasons. Indeed, although Canada is an important energy producer, a large proportion of energy consumed in Eastern Canadian provinces is imported, in particular refined petroleum products used in the transportation sector. The provinces of Ontario and Quebec have thus set objectives to increase the proportion of electricity in the transportation sector, by promoting the penetration of vehicles consuming electricity from the grid. More precisely, the province of Ontario has proposed for 2020 a 5% penetration target for EVs and the province of Quebec a target of 25% EVs for new 'light' passenger vehicles equivalent to a 5% penetration target by 2020. The province of Quebec has also considered supplementing this policy with an 18% penetration target by 2030. As a possible policy promoting the deployment of EVs in Canada, our energy policy scenario (denoted EVP) uses these latter targets for all provinces and territories. Penetration targets are then extended through a linear regression, yielding penetration targets of 31% by 2040 and 44% by 2050.

Note that this policy scenario is implemented in TIMES-Canada through constraints on the proportion of transportation demand that needs to be satisfied via EVs (BEVs and PHEVs). As transportation demands are modelled in different units, two separate but identical constraints have been imposed for passenger transportation (in % of million pkm) and freight transportation (in % of million tkm). However, we have only applied this latter constraint on light freight trucks. Indeed medium and heavy freight trucks represented in TIMES-Canada correspond to long distances freight, and are thus not well suited for EVs given electric battery capacity limitations.

4. Scenarios analysis

TIMES-Canada has been used to analyse the three scenarios described above (BAU, CLIM and EVP). This section reports on energy production and consumption, GHG emissions within the energy sector, and on impacts for the road transportation sector such as fuel consumption and market penetration of EVs.

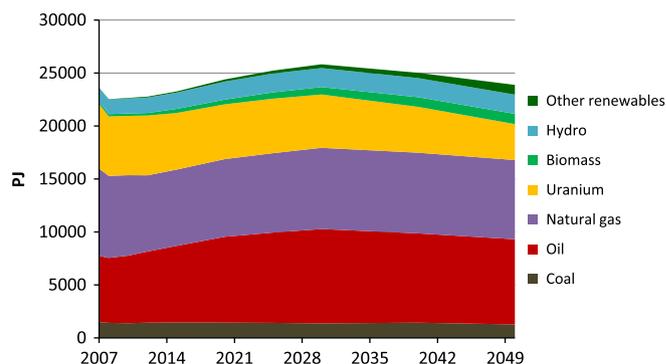


Fig. 4. Primary energy supply by fuel in the baseline scenario, 2007–2050.

4.1. Primary energy supply

Fig. 4 presents first the evolution of primary energy supply by energy sources in the baseline scenario.

Fig. 4 indicates that the share of fossil fuels in the energy supply mix remains approximately constant (around 70%) over time, but with a decrease in coal and natural gas supply compensated by an increase in oil supply (increase absorbed by foreign markets). Besides, one observes a switch between conventional (oil and natural gas) sources and unconventional ones. One can note also that the share of renewable (including hydro) and biomass will increase progressively after 2015. In 2050, biomass production is dominated by forestry residues and (other) renewable by wind farms. Compared to our baseline, the energy supply mix in 2050 is quite similar in the energy policy scenario; whereas in the climate policy scenario, the share of fossil fuels is slightly reduced (down to 66%) in favour of biomass and (other) renewables; see Fig. 5.

4.2. Final energy consumption

Fig. 6 reports next on the breakdown of final energy consumption by fuel in the baseline. Between 2007 and 2050, final energy consumption increases by around 49%, following exogenous assumptions on economic and population growth, in particular. But this increase is concentrated in a few provinces: central provinces are responsible for 60% of the additional consumption in 2050, while British Colombia and Alberta account for another 30%. On average, about a third of final energy consumption is due to the transportation sector on the whole horizon. Note also that the share of oil in the fuel mix is reduced over time in favour of biomass in particular. These trends can be explained on the one hand by the assumed increases of oil prices on international

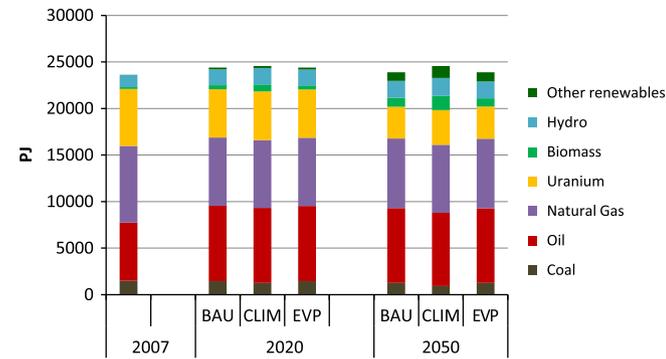


Fig. 5. Primary energy supply by energy source in the baseline (BAU), climate policy (CLIM) and energy policy (EVP) scenarios, 2007–2050.

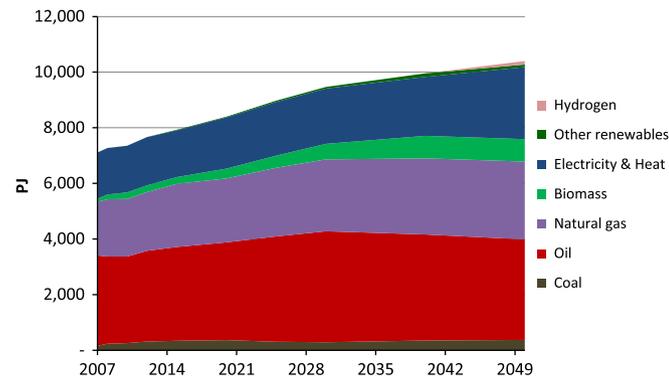


Fig. 6. Final energy consumption by fuel in the baseline scenario, 2007–2050.

markets, and on the other hand by the large variety of options available in Canada for biomass production (including biofuels for transportation).

Fig. 7 reports on the breakdown of final energy consumption by fuel for the baseline scenario, as well as for the climate policy and energy policy scenarios in 2020 and 2050. The energy policy scenario is again quite similar to the baseline scenario (in terms of final energy sources in the fuel mix). This somehow surprising result will be justified later when we compare the penetration of electric vehicles in both scenarios (baseline and energy policy). By contrast, in the climate scenario, one observes a stronger reduction of fossil fuel consumption driven by the necessity to abate GHG emissions, the other fuels (electricity & heat and biomass, in particular) reaching around 46% of the total energy consumed by 2050. Note also that, in all three scenarios and in average (on the whole horizon), about a third of final energy consumption is due to the transportation sector.

The situation is more contrasted in the transportation sector, as illustrated in Fig. 8 for the baseline scenario. Note first that in 2007, road transportation is responsible for the largest part of the energy consumed (82%), mainly for passengers (52%) where the consumption of gasoline dominates, while freight requires 30% of the energy used mainly through diesel consumption. The transportation sector continues admittedly to be largely dominated in the baseline by refined petroleum products. However, biofuels (biodiesel and ethanol) starts rapidly to be used, following the Canadian regulation on minimum biofuel content in conventional (fossil) fuels (Government of Canada, 2011). In addition, electricity starts contributing after 2040, when all-electric and plug-in hybrid vehicles are becoming cost-effective compared with conventional vehicles. Besides, prices of crude oil and petroleum products are

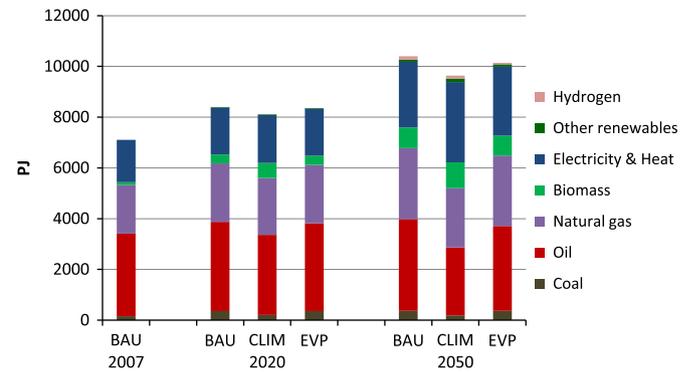


Fig. 7. Final energy consumption by fuel in the baseline (BAU), climate policy (CLIM) and energy policy (EVP) scenarios, 2007–2050.

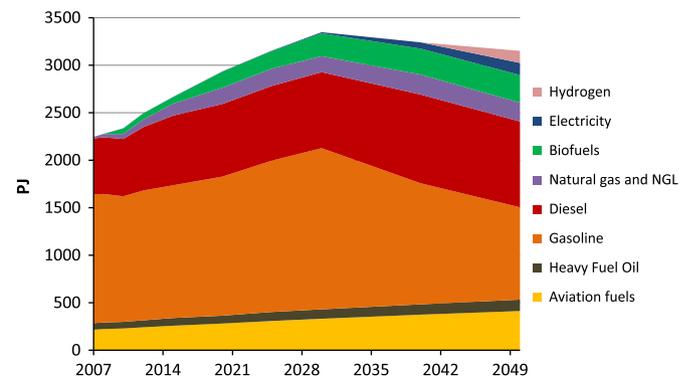


Fig. 8. Final energy consumption by fuel in the transport sector, for the baseline scenario, 2007–2050. (NGL stands for natural gas liquid).

assumed to increase with the rarefaction of world reserves, so that some electrification of transportation becomes part of an optimal solution without any specific (energy) policy in order to reduce the dependency on foreign oil. Finally, the decrease in demand between 2030 and 2050 is due to technology replacement yielding efficiency improvements.

A climate policy would involve significant changes in the transportation sector, as shown in Fig. 9. Final energy consumption would be reduced by almost 20% compared to the baseline. While there is already in the baseline an increase in biofuels and electricity consumption (both fuels representing, respectively, 9% and 4% in 2050), the climate policy pushes further the use of these fuels to, respectively, 24% and 8%. But as in the baseline, biodiesel continues to be produced mainly by trans-esterification from vegetal oil, and ethanol mainly by fermentation from corn and starch feedstocks (as the additional amount of biofuels needed is not enough to justify new investments in advanced plants). As for electricity, its contribution to GHG reduction is taking place mainly after 2030. Compared to this second scenario, the energy policy scenario yields fewer changes on the fuel mix. The average consumption is reduced by only 9% compared to the baseline. As there is here no incentive to abate GHG emissions, the proportion of biofuels remains at 10% in 2050, but the proportion of electricity increases to 9%. Indeed, in order to reach the policy target on EVs, some (further) electrification takes place (in particular for freight transportation; see Section 4.3). Note finally that hydrogen penetrates late in all three scenarios (around 2040) and represents only a very small share. Hydrogen consumption would be accentuated in some specific scenarios: with much severe GHG emission reduction targets or under zero-emission vehicle policies (not analysed in this paper) or under pessimistic assumptions on the development of electric vehicles (see Section 5).

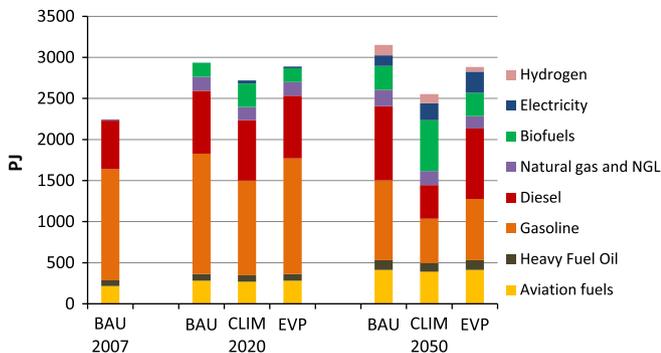


Fig. 9. Final energy consumption by fuel in the transport sector in the baseline (BAU), climate policy (CLIM) and energy policy (EVP) scenarios, 2007–2050.

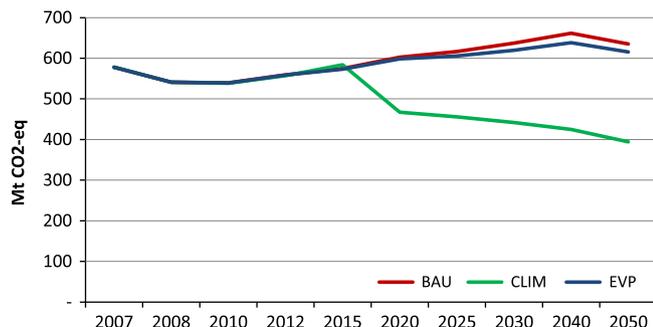


Fig. 10. Canadian GHG emissions in the baseline (BAU), climate policy (CLIM) and energy policy (EVP) scenarios, 2007–2050.

4.3. GHG emissions

Canadian GHG emissions are displayed in Fig. 10 for our three scenarios.

In the baseline, emissions increase progressively (by 23%) between 2010 and 2040, before declining (by 4%) between 2040 and 2050 with renewable electricity substituting for fossil fuels in several sectors, a trend explained in particular by the assumed price increases in oil products on international markets. The energy policy does not have a significant impact on GHG emissions. In fact, any moderate increase in electricity consumption (as observed in the EVP scenario) will not affect much emission profiles, as electricity is already produced (in a large proportion) from renewable sources for which important additional potential exists. A climate policy (such as the one enforced in our CLIM scenario) is necessary to significantly reduce GHG emissions. One can note here that the reduction profile occurs in two distinct phases. First, emissions are strongly reduced between 2015 and 2020 in order to meet the first target year (2020). And second, emissions decrease more progressively between 2020 and 2050. To respect provincial targets, (regional) reductions occur in different sectors depending on the energy system structures and available options for improvements (such as renewable potentials). Alberta and British Columbia in Western Canada, as well as Ontario and Quebec in Central Canada, are responsible for 83% of the total emission reductions in 2050. In Alberta, the electricity sector is contributing the most to achieving the reduction target, with the replacement of coal power by various renewable sources (hydro, geothermal, biogas, wind). In British Columbia, Quebec and Ontario, the industrial sector is contributing the most, with a switch from natural gas to renewable electricity in many industries. Nationally, the electricity sector accounts for 21% of the total reduction by 2050, the industrial sector for 35% and the transportation sector for 37%. We shall now analyse this last sector in more details.

4.4. Road transportation sector

This section explores in particular market penetration of electric vehicles in our two policy scenarios. Since electricity is only consumed for road transportation, our analysis is limited to this sub-sector, and focus more precisely on passenger transportation, where results are more contrasted.

Fig. 11 shows the penetration of different types of passenger vehicles in the baseline scenario. Conventional vehicles continue to ensure most of passenger transportation until 2040. But at the end of the model horizon, conventional vehicles have only 39% of market shares. Indeed, PHEVs start penetrating the market slowly after 2025, while BEVs become cost-competitive only after 2030. In the long run, PHEVs are more attractive than BEVs, especially for buses (that have to drive longer distances). Small cars are still dominated by conventional vehicles, but PHEVs represent 48% of

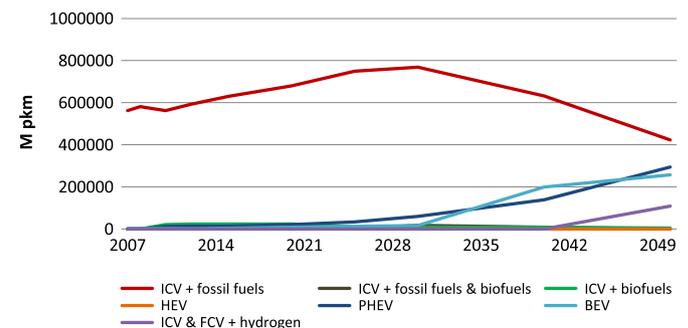


Fig. 11. Penetration of passenger vehicles in the baseline scenario, 2007–2050.

their market shares in 2050. By contrast, BEVs accounts for 82% of large cars in 2050, as fuel economies realised which such vehicles exceed their higher investment costs.

In the EVP scenario, conventional vehicles continue as well to satisfy most of passenger transportation demand, but only until 2030, as the energy policy accelerates the deployment of EVs; see Fig. 12. Indeed, BEVs and PHEVs start penetrating the market earlier (after 2015) and satisfy more than half of the demand in 2040. Consequently, conventional vehicles have only 26% of market shares by 2050. It turns out also that the policy favours the adoption of PHEVs over BEVs. But BEVs remain dominant for large cars (50% market shares in 2050) and gain also market shares for light passenger trucks (43% of market shares in 2050). Note that PHEVs are also preferred over BEVs for freight transportation. They represent 44% of the light freight trucks market shares (and correspondingly around 5% of the total freight transportation demand), satisfying totally by 2050 the constraint on EVs penetration (imposed only on light freight trucks; see again Section 3.3). BEVs are indeed not a competitive alternative as freight vehicles without further incentive because of their limited range and higher costs.

Fig. 13 shows next the penetration of passenger vehicles in the CLIM scenario. Although conventional vehicles continue to meet most of the passenger demand until 2030 (but less dominantly), the climate policy yields afterwards (compared to the EVP scenario) a stronger switch toward transport electrification: by 2050, 47% of the demand is met by BEVs and 33% by PHEVs. Electrification is indeed a valuable option for reducing GHG emissions in the passenger transportation sector, as electricity is being produced mainly from 'clean' sources (see Section 4.5) and as EVs' energy consumption is lower than other types of vehicles. Besides, BEVs are naturally a better option to abate emissions than PHEVs that consume some fossil fuels (gasoline or diesel). BEVs have a thus higher penetration rate in the CLIM scenario (than in the two other scenarios). Considering the different vehicle categories in 2050, BEVs satisfy in particular 96% of the demand for large cars and penetrate the market of small cars (13%) contrary to the other two scenarios. But PHEVs still dominate for some other

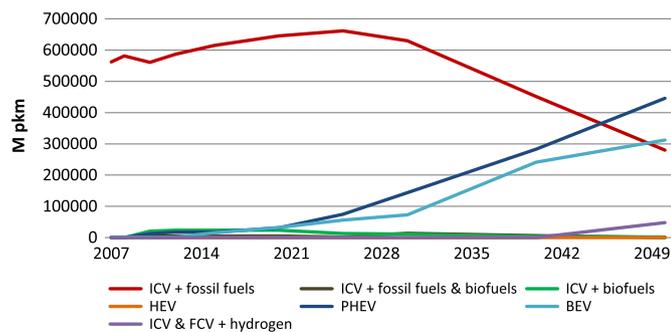


Fig. 12. Penetration of passenger vehicles in the energy policy scenario, 2007–2050.

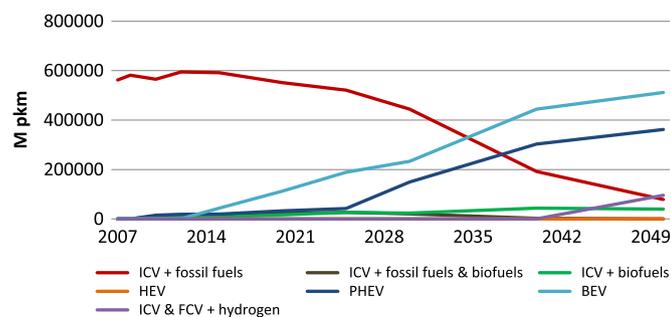


Fig. 13. Penetration of passenger vehicles in the climate policy scenario, 2007–2050.

categories such as buses and small cars. Note that conventional vehicles continue to meet a large part of the freight transportation demand on the whole horizon (36% in 2050). But ICVs with biofuels (ethanol and biodiesel) become dominant after 2030 (61% in 2050) and thus help reduce GHG emissions in the transportation sector. By contrast, EVs take only a 2% market share in 2050 (compared to 5% in the EVP scenario), as there are more cost-effective options to abate emissions in other sectors. Overall, the transportation sector contributes significantly to the GHG reduction effort imposed by the climate policy (see again Section 4.3) through the progressive use of cleaner vehicles to the detriment of most polluting ones.

EVs correspond to cost-effective options for passenger transportation even in the absence of specific (climate or energy) policies. But their market penetration (in the baseline) is somehow significant only after 2025. In other words, EVs are not expected to become competitive before 2025 without further incentives. However, EVs are also important from an energy security point of view as they enable to meet transportation demand while limiting petroleum product imports (compared to conventional vehicles). Currently, such considerations are not taken into account in TIMES-Canada. Our two policy scenarios favours the electrification of the passenger transportation sector, especially through the deployment of PHEVs in the EVP scenario and of BEVs in the CLIM scenario, whereas the deployments of EVs for freight transportation remains limited in both policy scenarios. Likewise, compared to the deployment of alternative vehicles, the one of hydrogen fuelled vehicles remains very limited. Canada benefits indeed from a large variety of options for electricity generation (fossil fuel reserves, uranium deposits reserves and numerous renewable sources) yielding an important generation capacity at relatively low costs. Similarly, there is a large variety of biomass feedstocks such as crops (corn, wheat, oilseeds and dedicated energy crops), residues (industrial, municipal, agricultural and forestry) and biogas (landfill, manure) which can be used for biofuel production. This and the necessity to build an infrastructure for hydrogen distribution in the transportation sector do not make hydrogen vehicles particularly attractive over the long term in the Canadian energy context.

Concerning batteries, the lithium-ion batteries are dominating the market of PHEVs running on gasoline and diesel as well as BEVs in 2050. Note that the lead-acid battery is represented in our database even if this technology is close to be out of the market. The performance of lead-acid battery is indeed half of the nickel-metal-hybrid's one and a quarter of the lithium-ion's one. The lithium-ion battery is thus considered as the most promising technology and is already taking market shares within almost all new car models currently in development.

4.5. Electricity sector

To feed all these EVs, performing charging stations are implemented, namely level 2 in the residential areas (6.5 kW) and level 3.2 in public areas (60 kW). Such technologies are more expensive (than other charging stations) but the amount of electricity required by EVs is important enough to justify the investments that allow important economies of scale per kilowatt delivered. Besides, the storage technology option we have modelled allows TIMES-Canada to take into account the fact that batteries are most likely to be charged during the day (for commercial and public stations) or the night (for residential stations) and used during rush hours.

Electricity generation by fuel in the baseline scenario is reported in Fig. 14. Notice that this scenario includes projects already under development or planned for the near future, such as: coal phase out in Ontario with some conversion to biomass plant (e.g., Nanticoke Generating Station); nuclear reactor overhauls in New-Brunswick

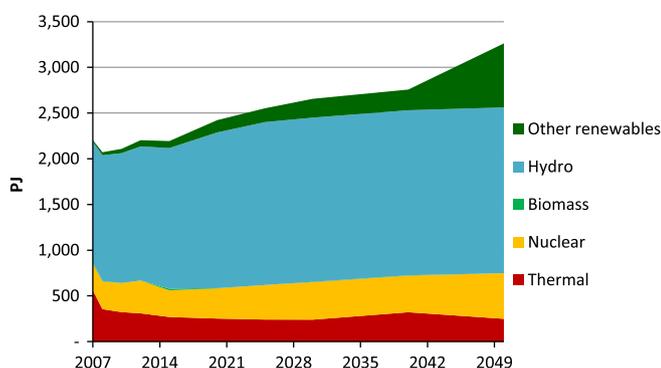


Fig. 14. Electricity generation by fuel in the baseline scenario, 2007–2050.

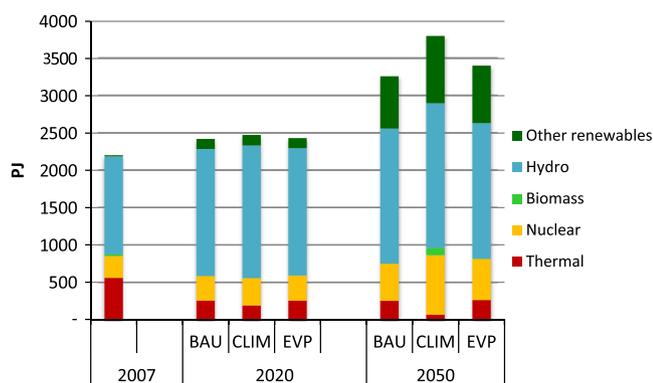


Fig. 15. Electricity generation by fuel in the baseline (BAU), climate policy (CLIM) and energy policy (EVP) scenarios; 2007–2050.

and Ontario; starting operation of new hydro dams in Quebec and Newfoundland; wind farm projects in many provinces; etc.

Electricity generation increases by 48% between 2007 and 2050. Hydro power continues to be the main source of electricity and there is in particular an important development of new hydro capacities in British Columbia, Quebec and Newfoundland. But the share of hydro electricity decreases over time, from 59% in 2007 to 56% in 2050. The share of thermal power decreases more significantly from 25% in 2007 to 8% in 2050. This is due in particular to a decrease in coal power, with the coal phase-out in Ontario (by 2015) as well as other coal-fired plant retirements in Western and Eastern provinces (at the end of their useful life). Oil is still used in isolated areas, in Northern Territories and on Prince Edward Island. The nuclear capacity remains quite constant (14% to 15%), with very small new capacities in New-Brunswick and in Ontario. Other nuclear plant units are refurbished. The largest increases come from other renewables that represent 64% of the additional generation between 2007 and 2050. The share of electricity from other renewable sources becomes then significant (21%) in 2050. The most important contribution comes from new wind farms in Ontario; other contributions (e.g., biomass and photovoltaic in Ontario and geothermal in British Columbia) are comparatively minor.

Fig. 15 reports next on electricity generation by fuel for the baseline scenario, as well as for the climate policy and energy policy scenarios in 2020 and 2050. By 2050, electricity generation in the EVP scenario is quite similar to the baseline, where EVs are already notably deployed. By contrast, an additional amount of electricity is generated in the CLIM scenario, requiring an additional 69 GW of capacity compared to the baseline. Besides, the GHG reduction targets yield a stronger switch from thermal power (decreasing further to 2% of total

generation) to nuclear, biomass and other renewables (reaching, respectively, 21%, 3% and 24% of total generation). The contribution from hydro increases also in absolute value but not in terms of market share.

5. Sensitivity analysis on EVS

The development of EVs depends on many elements, in particular the evolution of electric batteries. Battery cost represents indeed an important part of an EV purchase cost and directly affects its maintenance cost (since a large part is related to battery replacement). As specified in Appendix C, we assume that these costs are reduced over time through (exogenous) technological improvements. Furthermore, battery improvements yield better energy efficiency for EVs. Likewise, we assume that the electrical efficiency of batteries (measured in kilometres travelled per kW h of battery recharged, km/kW h) is increasing over time.

In this section, to analyse the sensitivity of EVs deployment to the evolution of batteries, we have tested two additional scenarios with different evolution trends for the characteristics of the lithium-ion batteries (the most promising battery type): an ‘optimistic’ scenario (OPT) that envisions a rapid improvement of Li-ion batteries (both in terms of cost and efficiency) and a ‘pessimistic’ (PESS) scenario with less improvements. These scenarios are to be contrasted to the improvement scenario assumed so far (see Appendix C), which we considered as ‘average’ (denoted thereafter BASE). In terms of costs, all scenarios assume a decrease (from the 2008 level of 1200 \$/kW h) until a given (specific) level is reached: 190 \$/kW h in OPT, 390 \$/kW h in BASE and 660 \$/kW h in PESS. These levels are compatible with cost predictions available in the literature (see e.g., Hensley et al., 2012; Lache et al., 2008; Dinger et al., 2010; USDOE, 2010). In terms of efficiency evolution over 40 years, efficiency of Li-ion batteries are assumed to improve by 47% in OPT, 33% in BASE and 26% in PESS.

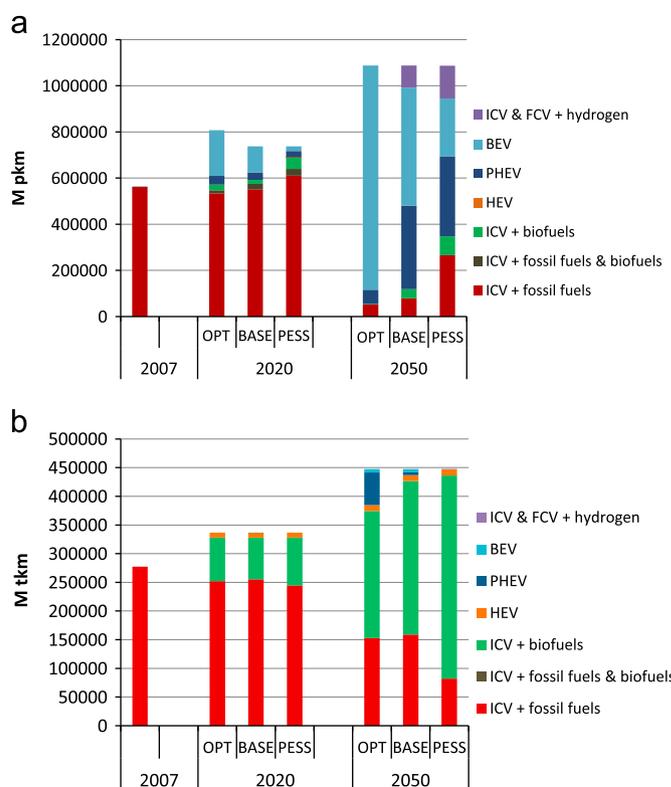


Fig. 16. (a) Penetration of passenger vehicles in the climate policy scenario. (b) Penetration of freight vehicles in the climate policy scenario.

Although, all policy scenarios have been tested with the different hypotheses concerning the evolution of batteries, we have chosen to report only results for the CLIM scenario where results are more contrasted. More precisely, Fig. 16a reports first on the penetration of passenger vehicles in 2020 and 2050.

In all battery scenarios, ICVs are progressively phased out, but at a speed that varies according to the technological progress assumed for the batteries. At the two extremes, in particular, ICVs start being phased out after 2015 in the OPT scenario, but only in 2030 in the PESS scenario. The penetration of EVs is as expected (inverse) mirroring this phasing out and takes place faster under stronger technological improvements in batteries. Consequently, by 2050 and again looking at our two extreme battery scenarios, EVs are dominating in OPT with a market share of 95%, whereas ICVs' market share is still 32% in PESS. Furthermore, the relative dynamics of PHEVs and BEVs is also affected by the different battery scenarios: by 2050, in OPT, EVs consist almost exclusively of BEVs (94%), whereas in PESS, the fleet of EVs is composed at 58% by PHEVs. Indeed, as batteries are bigger in BEVs than in PHEVs, effects of technological improvements on costs and efficiency are more important in the former vehicles.

Fig. 16b reports finally on the penetration of freight vehicles in the climate policy scenario in 2020 and 2050. For freight transportation likewise, our battery scenarios do not change the main trends observed in our base scenario: ICVs remain dominant but with a shift away of fossil fuels and in favour of biofuels. EVs market share remain small, with as expected the highest market share under the most favourable battery improvements: around 14% in OPT, only 2% in BASE and negligible in PESS.

6. Comparison to previous studies

For our study, we are using an optimisation approach that allows analysing the role of the electrification of road transportation within an optimal configuration of the Canadian energy sector. Previous studies (mostly concerning regions or countries other than Canada) have also used different optimisation approaches (in particular: Endo, 2007; Yeh et al., 2008; Contreras et al., 2009; Rosenberg et al., 2010; Wise et al., 2010; Kyle and Kim, 2011; McCollum et al., 2012). Conversely, other studies have used alternative approaches such as simulation (in particular: Steenhof and McInnis, 2008; Thomas, 2009; McCarthy and Yang, 2010; Kantor et al., 2010; Brand et al., 2012) and multinomial logit (Girod et al., 2012). Most of these alternative approaches analyse consequences on the energy sector of forcing a predefined penetration rate for alternative vehicles. One cannot thus directly compare results of such studies with the ones we obtain, as penetration rates for alternative vehicles (more specifically in our climate scenario) are endogenously computed (as a mean to abate GHG emissions).

Within optimisation approaches, the specific energy context (available resources, existing energy mix, policies adopted, etc.) that depends on the region studied plays a major role in defining future developments of alternative vehicles. Besides, the list of alternative technologies considered may differ among studies. For instance, Wise et al. (2010) does not consider BEVs, whereas these vehicles appear to be very competitive among passenger vehicles in our study. Such discrepancies limit the possibilities for detailed comparisons among the different studies relying on optimisation approaches. We can however identify some general trends.

On the one hand, our results present similarities with previous optimisation studies. First, as in Wise et al. (2010), we find that electric vehicles become cost-effective in the business-as-usual scenario and thus penetrate the passenger vehicles market to a certain extent without any help from a specific energy or climate

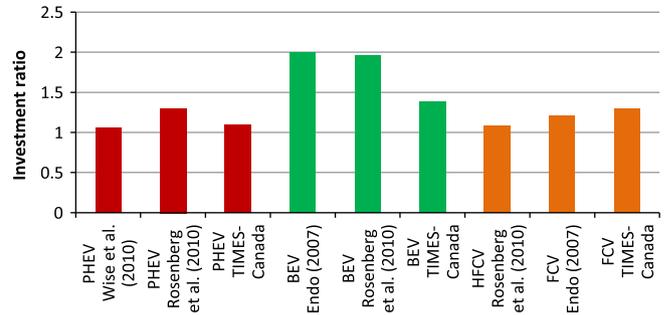


Fig. 17. 2050 investment costs ratio of alternative vehicles over the ones of conventional vehicles. (TIMES-Canada refers to this present study).

policy. And second, as in Yeh et al. (2008) and McCollum et al. (2012), our results show that a climate policy (aiming at curbing GHG emissions) favours the deployment of electric vehicles. Such a trend is also observable in studies using alternative approaches (in particular: Brand et al., 2012; Girod et al., 2012).

On the other hand, our results present some differences compared to previous studies, in particular the ones based on a MARKAL/TIMES approach (Endo, 2007; Yeh et al., 2008; Contreras et al., 2009; Rosenberg et al., 2010; McCollum et al., 2012). Indeed, in our climate scenario, BEVs dominate the passenger vehicles market by 2050 and hydrogen vehicles only have a small market share. Conversely, these other studies show that hydrogen vehicles dominate at the end of the model horizon (under their climate scenarios). As already mentioned, such discrepancy may well result from differences in energy context, with Canada benefiting from a large variety of (comparatively) 'low-cost' options for clean electricity generation. Techno-economic assumptions as well as level of detail in the modelling of EVs (McCollum et al., 2012, has for instance less detail than our model) vary also across studies. As an illustration, Fig. 17 compares for 2050 the ratio of investment costs of some alternative vehicles over the ones of conventional ICV fuelled with gasoline.

Fig. 17 shows that our PHEV costs are rather similar but our BEV costs are notably lower (albeit in the range of the advanced fuel cell vehicles). Our stronger penetration of EVs can thus also be explained by our assumption that more R&D efforts will be made in developing BEVs than FCVs.

7. Conclusion

In this paper, we use the newly developed TIMES-Canada model to analyse impacts of climate and energy policies on the Canadian road transportation sector and more specifically on the penetration of electric vehicles for passenger and freight transportation. The climate policy combines all GHG emission reduction targets proposed by provincial governments for 2020 and extends them to 2050, whereas the energy policy imposes a specific penetration rate for electric vehicles (EVs) for 2020 (inspired by policies of the provinces of Quebec and Ontario) and extends it to 2050. These policies are contrasted to a business-as-usual (baseline) scenario.

On the one hand, our analysis shows that EVs penetrate notably the passenger vehicle market after 2040 in the baseline scenario (when they become cost-effective) and after 2030 in the energy policy scenario (following the assumed penetration targets). On the other hand, respecting GHG emission reduction targets yields in the climate scenario a stronger penetration of EVs for passenger transportation, with a progressive phasing out of internal combustion engine vehicles, whereas the latter vehicles remain dominant for freight transportation but with a shift away of fossil fuels and in favour of biofuels. Globally, the transport sector contributes thus

significantly to the Canadian GHG emission abatement imposed by the climate policy. A sensitivity analysis on the (assumed) evolution of EVs over time confirms these general trends, but the speeds at which EVs penetrate are naturally affected by the extent of technological improvements.

Our results present similarities with the existing literature, in particular that EVs can after a while significantly penetrate the passenger vehicles market without any help from a specific (climate or energy policy). Conversely, our results present differences with the existing literature, in particular that the curbing of GHG emissions in the transport sector can be done through the deployment of EVs but at the expense of hydrogen vehicles deployment. We believe that this discrepancy results mainly from differences in energy context, with Canada benefiting from a diversity of ‘low-cost’ options for clean electricity generation, and from techno-economic assumptions concerning the future characteristics of these alternative vehicles.

Besides their contribution to GHG emission abatement, the deployment of EVs can also enhance energy security, by allowing meeting (some) transportation demand while limiting petroleum product imports (compared to conventional vehicles). This would be of particular importance for Eastern Canadian provinces that are currently importing crude oil. We plan to take into account such considerations in the near future, through the modelling in TIMES-Canada of energy corridors (for import/export) and the associated risk for international energy trade. Another improvement we keep for future research is the modelling

of smart electrical grids and vehicle-to-grid – V2G – systems where EVs could be used in particular to provide power to the grid to help meet peak load demands, to avoid new large scale producing infrastructure or even to increase exports. The future market shares of different types of EVs will need further investigations and modelling effort to encompass all those cross-cutting issues.

Acknowledgments

The authors wish to acknowledge financial support from the Natural Sciences and Engineering Research Council of Canada (NSERC individual and strategic grants) and from the Quebec Ministry of Economic Development, Innovation and Export Trade (MDEIE). Natural Resources Canada and Environment Canada were partners of our NSERC strategic grant. The REACCESS project (Seventh Framework Program of the European Union) and Hydro-Québec were partners of our MDEIE funded project.

Appendix A. A TIMES-Canada’s reference energy system for passenger transportation by small cars

To illustrate the richness of the TIMES-Canada database, Figs. A1 and A2 present the detailed RES for passenger transportation by small cars.

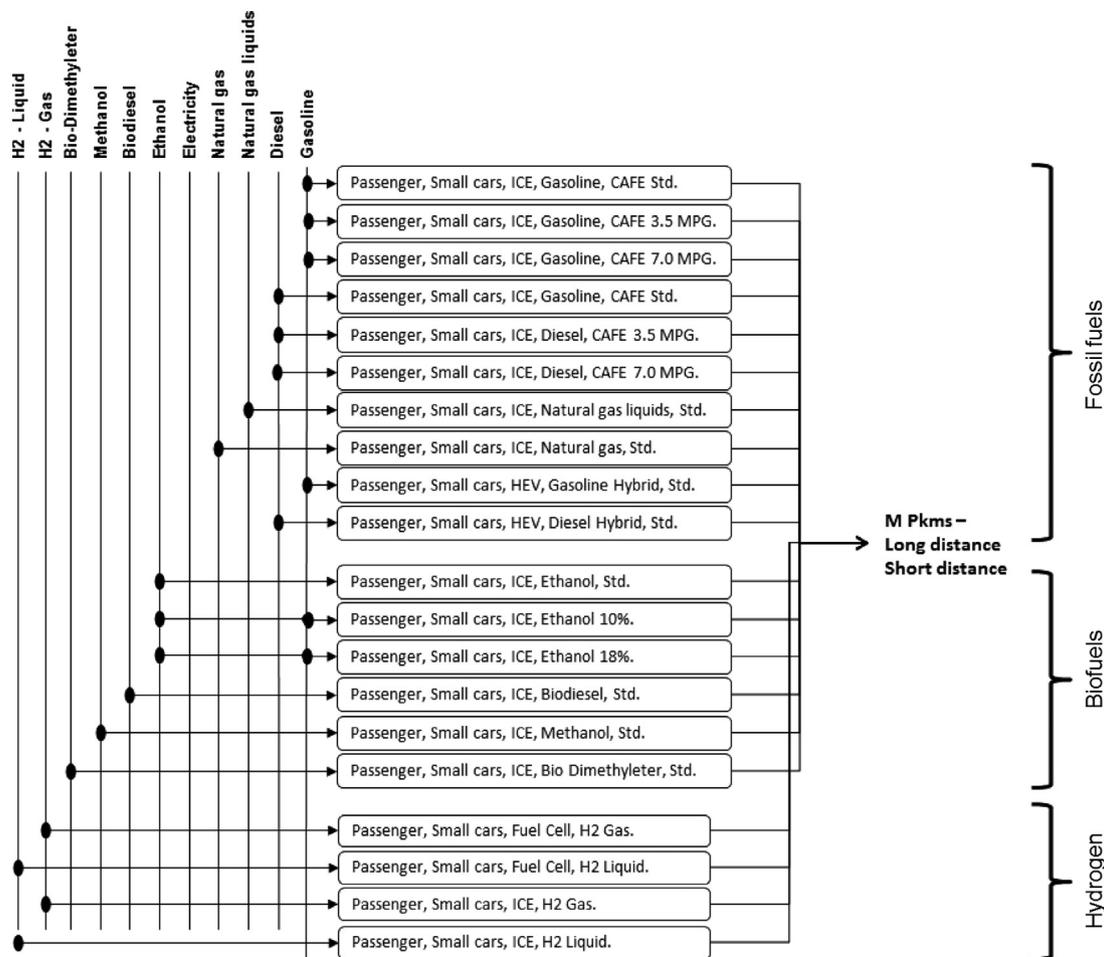


Fig. A1. RES for passenger transportation by small cars. Part 1: Vehicles equipped with an internal combustion engine (ICVs); hybrid electric vehicles (HEVs) and fuel cells vehicles (FCVs). (CAFE stands for Corporate Average Fuel Economy; Std stands for standard; MPG stands for miles per gallon).

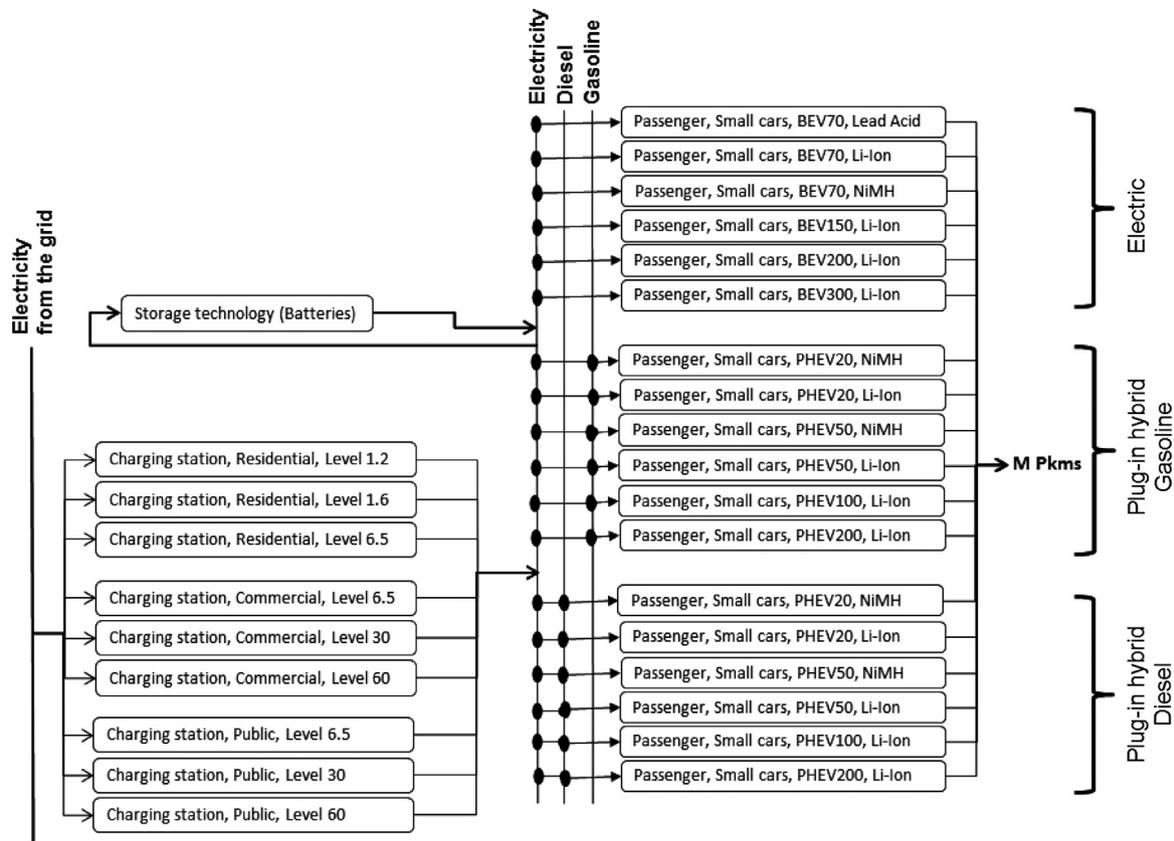


Fig. A2. RES for passenger transportation by small cars. Part 2: Electric vehicles (EVs); distinguishing between plug-in hybrid vehicles (PHEVs) and battery electric vehicles (BEVs). (Charging station levels correspond to the charging power in kW).

Appendix B. EVs and charging stations specific data

TIMES-Canada distinguishes between 70 EVs that address transportation demands covered by passenger cars and trucks (41 EVs), freight trucks (12), busses (12) and motorcycles (5). In TIMES-Canada, each EV is characterized by several economic parameters (such as capital costs and operation & maintenance costs) and technical parameters (such as the type of battery it is equipped with and its electric range, namely the distance it can drive before its battery is fully discharged). These parameters come from various sources (Vaillancourt et al., 2012). Note that a utility factor (maximum ratio of the vehicle-km driven on all-electric over the total annual vehicle-km) is imposed to represent limits due to the electric range of each PHEV. The different EVs addressing road transportation demands are shown in Table A1.

EVs must recharge their battery from the grid using a specific charging infrastructure. Nine types of charging stations are represented, each as a combination of charger level (characterized by its power, expressed in kW), and its location. TIMES-Canada distinguishes between 3 possible locations for the charging stations: residential areas (private homes and residential buildings), commercial buildings (for the recharge of commercial fleets and employees' cars), and public stations (similarly to the actual gas stations). Characteristics of these stations depend in particular on the level and number of chargers used. The charging capacity (measured in min/kW h) and economic characteristics are among the most important attributes, since they allow TIMES-Canada to capture the availability and installation costs of these new infrastructures. These characteristics were estimated from two sources (Battelle Energy Alliance, 2008; ETEC, 2009) and are given in Table A2.

Appendix C. EVs' costs and efficiency evolution over time

TIMES-Canada assumes that potential for costs decrease is higher in the first years following a technology's availability on the market and lower afterwards. Let us illustrate these cost dynamics for EVs. These vehicles have currently high capital costs, compared to other existing transportation technologies, due to the price of their electric battery in particular. But the latter is expected to experience deep cost reduction over time. As an example, the cost of a Li-ion battery is expected to decrease from 1200 \$/kW h in 2008 to 470 \$/kW h in 2015 (following PikeResearch (2009)). In accordance with ranges provided in particular by Dinger et al. (2010), we have also assumed a further reduction down to a minimum cost level (reached in 2031) of 390 \$/kW h. Similarly, based on various sources (see Vaillancourt et al., 2012) capital costs (excluding battery costs) of EVs are assumed to decrease by almost 24% in the first 10 years after market entry, and by another 45% the next 20 years. Fixed operation and maintenance costs are divided into two categories: replacement costs of the electric battery (spread over the battery's lifetime) and other costs given by kilometer driven⁷.

Another important parameter to consider is the efficiency of each transportation technology, expressed in million km that can be driven on a unit of energy (Mkm/PJ). It depends on the fuel used and on the vehicle characteristics. Similarly to costs, efficiencies are expected in TIMES-Canada to exogenously improve

⁷ Note that due to assumed efficiency improvements (see next paragraph), costs of ICVs per Mkm are also expected to decrease over time.

Table A1

List of the different EVs considered in TIMES-Canada for road transportation. (ELC stands for electricity, GSL for gasoline, DST for diesel, # of tech. for number of different vehicle types. The range is given in kilometres. Capital costs and operation and maintenance (O&M) costs are in \$/vehicle. Efficiency is in million km/Pj.

Categories	Energy	No of tech.	Range	Battery types	Available	Capital costs (start)	O&M costs (lifespan)	Efficiency (lifespan)
Small light-duty cars—BEVs	ELC	6	[70; 300]	Lead-acid, Li-Ion, NiMH	2008/2016	[14,730; 62,290]	[0.97; 2.59]	[1,656; 2,881]
Small light-duty cars—PHEVs	ELC, GSL	6	[20; 200]	Lead-acid, Li-Ion, NiMH	2008/2016	[19,110; 128,490]	[0.78; 2.87]	[1,143; 3,685]
Small light-duty cars—PHEVs	ELC, DST	6	[20; 200]	Lead-acid, Li-Ion, NiMH	2008/2016	[19,730; 132,440]	[0.83; 2.95]	[1,044; 3,635]
Large light-duty cars—BEVs	ELC	3	[150; 400]	Li-Ion, NiMH	2010/2016	[32,610; 62,770]	[0.97; 3.47]	[1,686; 3,026]
Large light-duty cars—PHEVs	ELC, GSL	7	[20; 300]	Li-Ion, NiMH	2008/2016	[21,730; 229,960]	[0.97; 3.98]	[845; 2,708]
Large light-duty cars—PHEVs	ELC, DST	7	[20; 300]	Li-Ion, NiMH	2008/2016	[22,100; 233,330]	[1.01; 4.04]	[816; 2,708]
Light-duty trucks—BEVs	ELC	2	[150; 300]	Li-Ion	2012/2015	[42,400; 65,920]	[1.37; 2.39]	[1,696; 3,026]
Light-duty trucks—PHEVs	ELC, GSL	2	[50; 150]	Li-Ion	2010/2012	[60,840; 156,080]	[1.45; 3.50]	[571; 2,555]
Light-duty trucks—PHEVs	ELC, DST	2	[50; 150]	Li-Ion	2010/2012	[61,740; 158,370]	[1.45; 3.50]	[522; 2,555]
Light-freight trucks—BEVs	ELC	2	[175; 250]	Li-Ion	2010/2013	[149,000; 193,700]	[1.61; 4.46]	[648; 1,380]
Light-freight trucks—PHEVs	ELC, GSL	1	50	Li-Ion	2012	74,500	[1.61; 974]	[257; 1,472]
Light-freight trucks—PHEVs	ELC, DST	2	[50; 150]	Li-Ion	2012/2014	[78,230; 111,750]	[1.61; 18.73]	[128; 1,345]
Medium-freight trucks—BEVs	ELC	2	[175; 300]	Li-Ion	2010/2014	[153,330; 230,000]	[2.39; 6.17]	[489; 1,204]
Medium-freight trucks—PHEVs	ELC, DST	2	[50; 150]	Li-Ion	2012/2016	[96,850; 145,280]	[2.39; 4.21]	[177; 942]
Heavy-freight trucks—BEVs	ELC	2	[75; 150]	Li-Ion	2012/2014	[208,000; 353,600]	[8.69; 32.32]	[238; 573]
Urban bus—BEVs	ELC	2	[50; 70]	Li-Ion	2008/2010	[268,210; 670,110]	[3.78; 38.47]	[128; 303]
Urban bus—PHEVs	ELC, DST	2	[20; 30]	Li-Ion	2010/2012	[134,100; 335,060]	[3.78; 28.59]	[57; 1570]
Intercity bus—BEVs	ELC	3	[80; 150]	Li-Ion	2010/2015	[643,320; 1,607,900]	[9.10; 36.32]	[196; 483]
Intercity bus—PHEVs	ELC, DST	1	25	Li-Ion	2012	1,607,900	[9.10; 30.18]	[67; 113]
School bus—BEVs	ELC	2	[100; 150]	Li-Ion	2010	[279,960; 559,690]	[4.38; 32.41]	[238; 579]
School bus—PHEVs	ELC, DST	1	20	Li-Ion	2010	209,970	[4.38; 30.39]	[128; 942]
Motorcycles—BEVs	ELC	3	[90; 200]	Li-Ion	2010/2012	[9,930; 22,070]	[0.27; 0.52]	[6,261–11,476]
Motorcycles—PHEVs	ELC, GSL	2	[20; 50]	Li-Ion	2010/2012	[9,000; 12,000]	[0.27; 0.55]	[1,429; 10,152]

Table A2

List of the different charging stations considered in TIMES-Canada.

Location	No. of chargers	Power of charger (kW)	Charging capacity (min/kW h)	Capital costs (\$/kW)
Residential	1	1.2	50.0	1030
	1	1.6	37.5	779
Commercial	1	6.5	9.2	315
	2	6.5	9.2	441
	2	30.0	2.4	988
Public station	2	60.0	1.0	746
	2	6.5	9.2	625
	2	30.0	2.4	1593
	2	60.0	1.0	545

over time, especially during the first years a technology becomes available. While it is expected that reduction of fuel consumption essentially comes from engine improvements in ICVs, EVs' efficiency increase is mainly due to battery improvements. In that respect, TIMES-Canada assumes for instance that energy efficiency

Table A3

GHG emission reduction targets per province and territory, together with the reference year.

Province	Reference year	Target for 2020 (%)	Target for 2050 (%)
Alberta	2005	5	14
British Columbia	2007	33	50
Manitoba	2005	15	45
New Brunswick	1990	10	20
Newfoundland	1990	10	20
Nova Scotia	1990	10	20
Northwest Territories	2005	17	50
Nunavut	2005	17	50
Ontario	1990	15	30
Prince Edward Island	1990	10	20
Quebec	1990	20	40
Saskatchewan	2006	20	40
Yukon	2005	17	50

of Li-ion batteries will increase by 29% 10 years after market entry, and by almost 50% 20 years after market entry. We did not assume any improvement in lead-acid batteries (expected to be soon driven out of the market), and only marginal improvements for NiMH batteries (that appear less promising than Li-ion batteries and thus attract less R&D investments).

Appendix D. Provincial GHG reduction targets

Table A3 presents the detailed targets of GHG emissions reduction by province for 2020 and 2050.

References

- Battelle Energy Alliance (2008). Plug-in hybrid electric vehicle charging infrastructure review. Available on line at: <http://avt.inl.gov/pdf/phev/phevInfrastructureReport08.pdf> (accessed on June 27, 2011).
- Berger, C., Dubois, R., Haurie, A., Lessard, E., Loulou, R., Waaub, J.-P., 1992. Canadian MARKAL: an advanced linear programming system for energy and environmental modelling. *INFOR* 30, 222–239.
- Brand, C., Tran, M., Anable, J., 2012. The UK transport carbon model: an integrated life cycle approach to explore low carbon futures. *Energy Policy* 41, 107–124.
- Contreras, A., Guervos, E., Posso, F., 2009. Market penetration analysis of the use of hydrogen in the road transport sector of the Madrid region, using MARKAL. *International Journal of Hydrogen Energy* 34, 13–20.
- Dinger, A., Martin R., Mosquet X., Rabl M., Rizoulis D., Russo M., Sticher G. (2010). Batteries for Electric Cars: Challenges, Opportunities, and the Outlook to 2020. Report, The Boston Consulting Group.
- Endo, E., 2007. Market penetration analysis of fuel cell vehicles in Japan by using the energy system model MARKAL. *International Journal of Hydrogen Energy* 32, 1347–1354.
- Environment Canada (2011). Canada's emissions trends. Available on line at: <http://www.ec.gc.ca/Publications/E197D5E7-1AE3-4A06-B4FC-CB74EAAA60F/CanadasEmissionsTrends.pdf> (accessed on December 5, 2011).
- EPRI (July 2007). Environmental Assessment of Plug-In Hybrid Electric Vehicles, Volume 1: Nationwide Greenhouse Gas Emissions. Electric Power Research Institute Report N. 1015325.
- ETEC (July 2009). Electric vehicle charging infrastructure deployment guidelines: British Columbia. Electric Transportation Engineering Corporation. Available on line at: http://www.bchydro.com/etc/medialib/internet/documents/environment/EVcharging_infrastructure_guidelines09.Par.0001.File.EV%20Charging%20Infrastructure%20Guidelines-BC-Aug09.pdf (accessed on June 27, 2011).
- Fishbone, L.G., Abilock, H., 1981. MARKAL, a linear-programming model for energy systems analysis: technical description of the BNL version. *Energy Research* 5, 353–375.
- Girod, B., Van Vuuren, D.P., Deetman, S., 2012. Global travel within the 2 °C climate target. *Energy Policy* 45, 152–166.
- Government of Canada, 2011. Regulations amending the renewable fuels regulations. *Canada Gazette* 145 (No. 9), 26. (February).
- Hensley R., Newman J., Rogers M. (July 2012). Battery technology charges ahead, McKinsey Quarterly, available on line for members at: https://www.mckinseyquarterly.com/Battery_technology_charges_ahead_2997# (accessed on August 22, 2012).
- IEA (2010a). "CO₂ emissions by product and flow". IEA CO₂ emissions from fuel combustion statistics (database). International Energy Agency. <http://dx.doi.org/10.1787/data-00430-en>.
- IEA, 2010b. World Energy Outlook 2010. International Energy Agency. OECD Publishing p. 736.
- IEA (2012). World energy balances. International Energy Agency. IEA World Energy Statistics and Balances (database). <http://dx.doi.org/10.1787/data-00512-en>.
- Kantor, I., Fowler, M.W., Hajimiragha, A., Elkamel, A., 2010. Air quality and environmental impacts of alternative vehicle technologies in Ontario, Canada. *International Journal of Hydrogen Energy* 35, 5145–5153.
- Kanudia, A., Loulou, R., 1999. Advanced bottom-up modelling for national and regional energy planning in response to climate change. *International Journal of Environment and Pollution* 12, 191–216.
- Kyle, P., Kim, S.H., 2011. Long-term implications of alternative light-duty vehicle technologies for global greenhouse gas emissions and primary energy demands. *Energy Policy* 39, 3012–3024.
- Lache, R., Nolan, P., Galves, D., Toulemonde, G., Gehrke, J., Sanger, K., et al., 2008. Electric Cars: Plugged In—Batteries Must Be Included. Global Autos Research Team, Deutsche Bank.
- Loulou, R., Kanudia, A., Lavigne, D., 1996. GHG abatement in central Canada with inter-provincial cooperation. *Energy Studies Review* 8, 120–129.
- Loulou, R., Remme U., Kanudia A., Lehtila A., Goldstein G. (2005). Documentation for the TIMES Model, Energy Technology Systems Analysis Program. Available on line at: <http://www.iea-etsap.org/web/Documentation.asp> (accessed on January 23, 2012).
- Loulou, R., Labriet, M., 2008. ETSAP-TIAM: the TIMES integrated assessment model. Part I: Model structure. *Computational Management Science* 5, 7–40.
- Loulou, R., 2008. ETSAP-TIAM: the TIMES integrated assessment model. Part II: Mathematical formulation. *Computational Management Science* 5, 41–66.
- Loulou, R., Labriet, M., Kanudia, A., 2009. Deterministic and stochastic analysis of alternative climate targets under differentiated cooperation regimes. *Energy Economics* 31 (Suppl. 2), S131–S143.
- McCarthy, R., Yang, C., 2010. Determining marginal electricity for near-term plug-in and fuel cell vehicle demands in California: impacts on vehicle greenhouse gas emissions. *Journal of Power Sources* 195, 2099–2109.
- McCollum, D., Yang, C., Yeh, S., Ogden, J., 2012. Deep greenhouse gas reduction scenarios for California—strategic implications from the CA-Times energy-economic systems model. *Energy Strategy Reviews* 1, 19–32.
- NEB (2009). 2009 Reference Case Scenario: Canadian Energy Demand and Supply to 2020. National Energy Board, 52 p.
- OEE (2007). Comprehensive energy use database. Available on line at: http://oee.nrcan.gc.ca/corporate/statistics/neud/dpa/comprehensive_tables/index.cfm?attr=0 (accessed on January 24, 2012).
- PikeResearch (2009). Research brief: electric vehicles: 10 predictions for 2010. Available on line at: <http://www.pikeresearch.com/research/electric-vehicle-s-10-predictions-for-2010> (accessed on June 27, 2011).
- Rosenberg, E., Fidje, A., Espegren, K.A., Stiller, C., Svensson, A.M., Møller-Holst, S., 2010. Market penetration analysis of hydrogen vehicles in Norwegian passenger transport towards 2050. *International Journal of Hydrogen Energy* 35, 7267–7279.
- Schäfer, A., Jacoby, H.D., 2006. Vehicle technology under CO₂ constraint: a general equilibrium analysis. *Energy Policy* 34, 975–985.
- Statistics Canada (2007). Report on energy supply–demand in Canada. Catalogue No. 57-003-XIE.
- Steenhof, P.A., McInnis, B.C., 2008. A comparison of alternative technologies to decarbonize Canada's passenger transportation sector. *Technological Forecasting & Social Change* 75, 1260–1278.
- Thomas, C.E.S., 2009. Transportation options in a carbon-constrained world: hybrids, plug-in hybrids, biofuels, fuel cell electric vehicles, and battery electric vehicles. *International Journal of Hydrogen Energy* 34, 9279–9296.
- United Nations (2009). Copenhagen Accord to the UNFCCC, Appendix I—quantified economy-wide emissions targets for 2020. Available on line at: http://unfccc.int/meetings/copenhagen_dec_2009/items/5264.php (accessed on January 23, 2012).
- USDOE (2010). The recovery act: transforming America's transportation sector—batteries and electric vehicles. US Department of Energy. Available on line at: <http://www.whitehouse.gov/files/documents/Battery-and-Electric-Vehicle-Report-FINAL.pdf> (accessed on June 27, 2011).
- Vaillancourt, K., Alcocer Y., Bahn O., Fertel C., Frenette E., Garboui H., Kanudia A., Kippelen A., Labriet M., Loulou R., Marcy M., Reisi N., Waaub J.-P. (2012). NSERC Strategic Project 'Greenhouse Gas Control in Canada: Technological Assessment and Policy Analysis'—The Reference Energy System (RES) of TIMES-Canada. GERAD Technical Report (Preliminary version), 275 pages.
- Van der Voort, E., 1982. The EFOM-12C energy supply model within the EC modelling system. *OMEGA, International Journal of Management Science* 10, 507–523.
- Wise, M., Kyle, G.P., Dooley, J.J., Kim, S.H., 2010. The impact of electric passenger transport technology under an economy-wide climate policy in the United-States: carbon dioxide emissions, coal use, and carbon dioxide capture and storage. *International Journal of Greenhouse Gas Control* 4, 301–308.
- Yeh, S., Farrell, A., Plevin, R., Sanstad, A., Weyant, J., 2008. Optimizing U.S. mitigation strategies for the light-duty transportation sector: what we learn from a bottom-up model. *Environmental Science & Technology* 42, 8202–8210.

Chapitre 5

Conclusion

Le secteur du transport canadien, et plus précisément du transport routier, est l'un des secteurs les plus émetteurs de GES, en partie en raison de son fort degré de dépendance aux combustibles fossiles. Ainsi, dans une optique de réduction des émissions de GES, le secteur du transport offre un fort potentiel que l'on ne peut négliger. Il est donc essentiel d'étudier ce secteur afin de déterminer quelles politiques et mesures mettre en place et dans quelles technologies investir à court, moyen et long terme, pour bénéficier au mieux de ce potentiel.

Le modèle TVSim a été conçu dans le but de faciliter ce type d'analyse dans un contexte canadien. Il fournit des données techno-économiques et prospectives sur différentes technologies de véhicules électriques. Le modèle TIMES-Canada représente le secteur énergétique canadien dans son intégralité avec un grand niveau de détail. Combinés, ces deux modèles permettent de mener des analyses politiques, économiques et technologiques détaillées, sur l'avenir du secteur du transport au Canada.

Nous les avons utilisés pour tester et comparer les effets d'une part d'une politique climatique de réduction d'émissions de GES, et d'autre part d'une politique énergétique visant à favoriser le déploiement des véhicules électriques au Canada, selon différents scénarios d'évolution de ces véhicules. Un scénario de base a également été développé afin de déterminer l'évolution

potentielle des véhicules électriques sans contrainte particulière. Les résultats de notre analyse montrent que le secteur des transports jouera un rôle important dans l'effort de réduction des GES, imposé par la politique climatique (37% des réductions d'émissions d'ici 2050 seront imputables à ce secteur). Ce processus de décarbonisation du secteur des transports se fera essentiellement par l'électrification des transports routiers de passagers. Cependant, d'après les résultats du scénario de base, les véhicules électriques devraient tout de même pénétrer le marché canadien après 2040, sans aucun incitatif. La politique énergétique favorise le déploiement de ces véhicules à partir de 2030, mais n'a pas d'impact significatif sur les émissions de GES. Enfin, le déploiement des véhicules électriques est directement lié au développement des batteries électriques, qui représentent un enjeu majeur du processus d'électrification des transports.

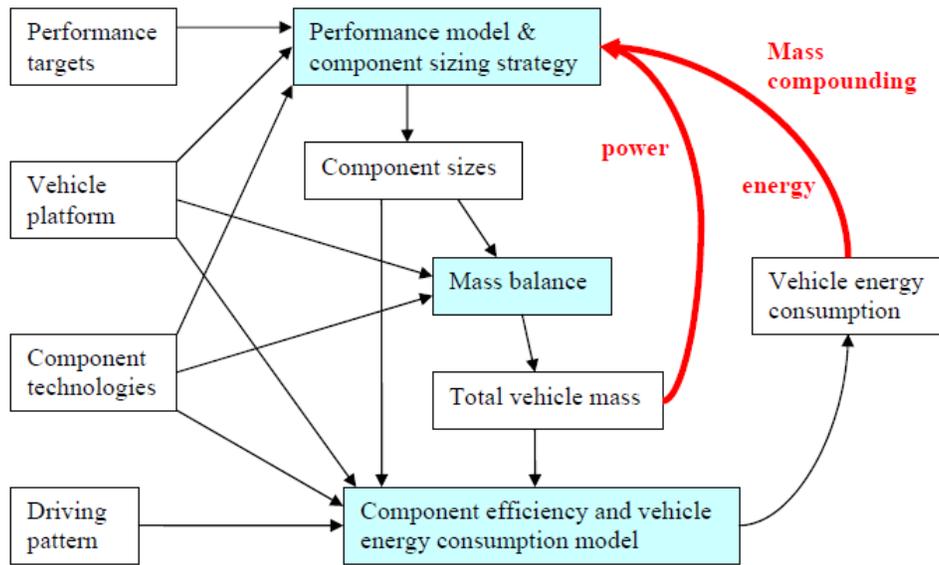
Ce mémoire présente la version courante du modèle TVSim, à laquelle nous apportons actuellement des améliorations. Nous développons, par exemple, une version de TVSim dans laquelle un plus grand nombre d'architectures de véhicules est représenté (ICV, HEV, FCV, etc.), de manière à étendre le champs d'analyse technologique à l'ensemble du secteur du transport routier. Nous construisons également une base de données de composants actuellement disponibles sur le marché ou en développement (comprenant toutes les données requises par TVSim), afin de faciliter le travail de l'utilisateur et de diminuer le nombre d'entrées dans le modèle.

Chapitre 6

Annexes

6.1 Explication du processus de *mass-compounding*

Pour atteindre de meilleures performances, un véhicule doit être équipé de composants plus puissants. L'amélioration des composants provoque une augmentation de la masse du véhicule. Étant donné la nouvelle masse du véhicule, certains composants ne sont plus en mesure de fournir la puissance nécessaire à l'atteinte des nouvelles performances. La puissance de ces composants, et donc leur taille, doivent être augmentées, ce qui provoquera une augmentation de la masse totale du véhicule. Le processus suit cette boucle jusqu'à ce que la masse totale du véhicule converge. La figure ci-dessous (tirée de Simpson, 2005) représente le processus récursif utilisé par les modèles suivant une approche implicite pour déterminer la taille des composants.



Source : Simpson (2005)

FIGURE 6.1 – Schématisation du processus de *mass-compounding*

6.2 Formules de calcul de puissance requise pour la traction d'un véhicule

Un véhicule i nécessite une puissance $P_i(t)$ à l'instant t , tel que :

$$P_i(t) = F_i(t) \cdot v(t)$$

où $v_i(t)$ et $F_i(t)$ sont respectivement la vitesse du véhicule i à l'instant t , et la force de traction requise par ce véhicule à l'instant t , tel que :

$$F_i(t) = F_i^R(t) + F_i^D(t) + F_i^M(t) + F_i^A(t)$$

avec :

$F_i^R(t)$, la force de résistance au roulement requise (en Newton) par le véhicule i , à l'instant t :

$$F_i^R(t) = m_i \cdot g \cdot C_i^R$$

$F_i^D(t)$, la force de traînée aérodynamique requise (en Newton) par le véhicule i , à l'instant t :

$$F_i^D(t) = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot C_{Di} \cdot A_i^F \cdot v(t)^2$$

$F_i^M(t)$, la force de montée requise (en Newton) par le véhicule i , à l'instant t :

$$F_{Cit} = m_i \cdot g \cdot \sin \alpha(t)$$

$F_i^A(t)$, la force d'accélération requise (en Newton) par le véhicule i , à l'instant t :

$$F_i^A(t) = m_i \cdot a(t)$$

Où :

m_i est la masse du véhicule i (en kg)

g est le paramètre d'accélération gravitationnelle ($g = 9,81 m \cdot s^{-2}$)

C_i^R est le coefficient de résistance au roulement du véhicule i

C_i^D est le coefficient de traînée aérodynamique du véhicule i

ρ est la densité de l'air (en $kg \cdot m^{-3}$)

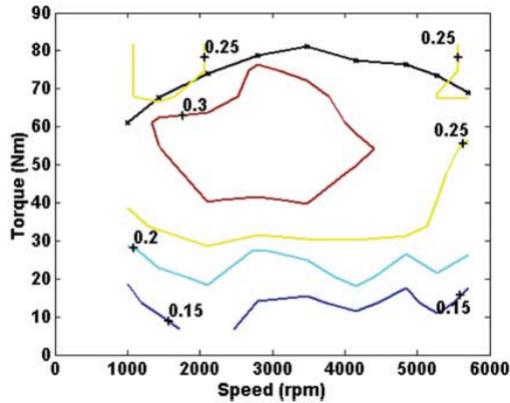
A_i^F est la surface frontale du véhicule i (en m^2)

$v(t)$ est la vitesse à l'instant t

$a(t)$ est l'accélération à l'instant t

$\alpha(t)$ est la pente à l'instant t

6.3 Exemple de *performance map* d'un moteur à combustion interne



Source : Gao et al. (2007)

FIGURE 6.2 – Exemple de *performance map* d'un moteur à combustion interne

6.4 Formule de calcul du RPE de Lindgren

$$RPE = \{[DM + DL + FVO] \times [1 + SA + SP] + TE + LBE\} \times \{1 + CA + CP + DOP\} + RD + TE \quad (6.1)$$

Avec :

<i>DM</i>	= Direct Material	<i>LBE</i>	= Land & Building Expenses
<i>DL</i>	= Direct Labor	<i>CA</i>	= Corporate Allocation
<i>FVO</i>	= Fixed & Variable Overhead	<i>CP</i>	= Corporate Profit
<i>SA</i>	= Supplier Allocation	<i>DOP</i>	= Dealer Overhead & Profit
<i>SP</i>	= Supplier Profit	<i>RD</i>	= Research & Development
<i>TE</i>	= Tooling Expenses		

6.5 Groupes de composants communs aux véhicules ICVs et EVs

Vehicle Group and Subgroup	Fully common	Somewhat common	Not Common
Body group			
Body-in-white	x		
Paint and coatings	x		
Glass	x		
Interior body trim	x		
Exterior body trim	x		
Seats	x		
Instrument panel		x	
Restraint system	x		
Body electrical components	x		
Heating, ventilating, and air-conditioning (HVAC)		x	
Engine group			
Base engine			x
Emissions control			x
Engine accessories			x
Engine electrical components			x
Cooling system			x
Transmission group			
Transaxle			x
Clutch and actuator			x
Transmission controls			x
Chassis group			
Frame	x		
Suspension	x		
Steering		x	
Brakes		x	
Exhaust system			x
Fuel storage			x
Final drive	x		
Wheels and tires	x		
Bumpers, fenders, and shields	x		
Chassis electrical components		x	
Accessories and tools	x		
Fluids		x	

Source : Cuenca et al. (1999)

Tableau 6.1 – Listes des composants communs aux IVCs et EVs

6.6 Paramètres techno-économiques des véhicules électriques dans les modèles suivant l'approche TIMES

Les paramètres descriptifs des véhicules électriques requis par TIMES pour fonctionner sont présentés dans le tableau ci-dessous. Les paramètres fournis par le modèle TVSim sont : INVCOST, FIXOM, EFF ICE, EFF ELC, Share LO 2015.

Paramètre	Unité	Description
Caractéristiques		
TechName		Nom de la technologie
TechDesc		Description de la technologie
Comm-IN		Type de carburant
Comm-OUT		Catégorie de demande finale
coûts		
INVCOST	M\$/1000 véhicules	Coût d'investissement
FIXOM	M\$/1000 véhicules	Coût de maintenance et opération annuel
Efficacité		
Share FX		
Share LO 2015		Proportion d'utilisation maximale dun certain carburant
Share LO		Proportion de demande (courte ou longue distance)
EFF ICE	Mkm.PJ ⁻¹	Consommation de carburant fossile
EFF ELC	Mkm.PJ ⁻¹	Consommation d'électricité
Divers		
ACTFLO DEMO	Passagers ou Tonnes/Véhicule	
AF	Max Ann Km	Nombre de km parcourus par an
START		Année d'entrée sur le marché de la technologie
LIFE		Durée de vie de la technologie

Source : Loulou et al. (2005)

Tableau 6.2 – Liste des paramètres techno-économiques des véhicules électriques requis par les modèles TIMES

6.7 Liste des paramètres et résultats de TVSim

Cette annexe récapitule quels sont les différents paramètres que l'utilisateur doit fournir (au modèle TIMES ou à TVSim), les résultats intermédiaires et les finaux de TVSim (qui serviront d'entrées au modèle TIMES). Ces paramètres correspondent à ceux d'une version de TVSim adaptée à contexte local (ici, canadien). L'utilisateur de TVSim simule un véhicule i .

Paramètres provenant de TIMES

c_i	Catégorie à laquelle appartient le véhicule i
AF_i	Distance parcourue annuellement par le véhicule i
$type_i$	type d'architecture du véhicule i
χ_i	Année de sortie du véhicule i sur le marché
l_i	Durée de vie du véhicule i

Entrées de l'utilisateur de TVSim

Caractéristiques des composants

$\eta_i^{trans}(y)$	Efficacité de la transmission dont est équipé le véhicule i , durant l'année y
$\eta_i^{mot}(y)$	Efficacité du moteur électrique dont est équipé le véhicule i , durant l'année y
$\eta_i^{elec}(y)$	Efficacité de l'électronique de puissance dont est équipé le véhicule i , durant l'année y
$\eta_i^{gen}(y)$	Efficacité du générateur dont est équipé le véhicule PHEV i , durant l'année y
$\eta_i^{comb}(y)$	Efficacité du moteur à combustion dont est équipé le véhicule PHEV i , durant l'année y
$\eta_i^{batt}(y)$	Efficacité de la batterie électrique dont est équipé le véhicule i , durant l'année y
$\xi_i^{trans}(y)$	Puissance spécifique de la transmission dont est équipé le véhicule i , durant l'année y
$\xi_i^{mot}(y)$	Puissance spécifique du moteur électrique dont est équipé le véhicule i , durant l'année y
$\xi_i^{elec}(y)$	Puissance spécifique de l'électronique de puissance dont est équipé le véhicule i , durant l'année y
$\xi_i^{gen}(y)$	Puissance spécifique du générateur dont est équipé le véhicule PHEV i , durant l'année y
$\xi_i^{comb}(y)$	Puissance spécifique du moteur à combustion dont est équipé le véhicule PHEV i , durant l'année y
$\xi_i^{batt}(y)$	Puissance spécifique de la batterie électrique dont est équipé le véhicule i , durant l'année y

$\Pi_i^B(y)$	Puissance maximale pouvant être fournie par le moteur électrique du véhicule PHEV i , durant l'année y
$\Pi_i^C(y)$	Puissance maximale pouvant être fournie par le moteur à combustion du véhicule PHEV i , durant l'année y
$\varpi_i^S(y)$	Seuil de l'état de charge de la batterie du véhicule PHEV i indiquant le passage du mode consommation de la charge au mode maintien de la charge, durant l'année y
$\varpi_i^R(y)$	Seuil indiquant le début de du processus de recharge de la batterie du véhicule PHEV (série ou power-split) i par son moteur à combustion, durant l'année y
$\kappa_i(y)$	Cycle de vie du type de batterie électrique dont est équipé le véhicule i , durant l'année y
$\iota_i(y)$	Durée de vie du type de batterie électrique dont est équipé le véhicule i , durant l'année y
$\beta_i^{trans}(y)$	Coût fixe de la transmission dont est équipé le véhicule i , durant l'année y
$\gamma_i^{trans}(y)$	Coût variable de la transmission dont est équipé le véhicule i , durant l'année y
$\beta_i^{mot}(y)$	Coût fixe du moteur électrique dont est équipé le véhicule i , durant l'année y
$\gamma_i^{mot}(y)$	Coût variable du moteur électrique dont est équipé le véhicule i , durant l'année y
$\beta_i^{elec}(y)$	Coût fixe de l'électronique de puissance dont est équipé le véhicule i , durant l'année y
$\gamma_i^{elec}(y)$	Coût variable de l'électronique de puissance dont est équipé le véhicule i , durant l'année y
$\beta_i^{batt}(y)$	Coût fixe de la batterie électrique dont est équipé le véhicule i , durant l'année y
$\gamma_i^{batt}(y)$	Coût variable de la batterie électrique dont est équipé le véhicule i , durant l'année y
$\beta_i^{gen}(y)$	Coût fixe du générateur dont est équipé le véhicule PHEV i , durant l'année y
$\gamma_i^{gen}(y)$	Coût variable du générateur dont est équipé le véhicule PHEV i , durant l'année y
$\beta_i^{comb}(y)$	Coût fixe du moteur à combustion dont est équipé le véhicule PHEV i , durant l'année y
$\gamma_i^{comb}(y)$	Coût variable du moteur à combustion dont est équipé le véhicule PHEV i , durant l'année y

Taux d'évolution des paramètres

μ_{c_i}	Taux d'évolution annuel de la masse fixe d'un véhicule appartenant à la catégorie c_i
ϕ_{c_i}	Taux d'évolution annuel du coût fixe d'un véhicule appartenant à la catégorie c_i

Autres paramètres

k	Cycle de conduite choisi
$per f_i$	Niveau de performances du véhicule i choisi
$Te(j)$	Température moyenne du mois j

ε	Seuil de tolérance du processus itératif de <i>mass compounding</i>
u_{struct}	Paramètre de calcul de la masse additionnelle du véhicule requise pour supporter la masse additionnelle du GMP
b_i	Proportion d'énergie fournie aux accessoires par la combustion du véhicule PHEV i durant le mode de conduite de maintien de la charge
z	Paramètre de calcul de l'énergie fournie par la combustion pour recharger la batterie du véhicule PHEV i durant le mode de conduite de maintien de la charge
$cm_i(y)$	Coût d'opération et maintenance (autre que le remplacement de la batterie), par kilomètre parcouru par le véhicule i , pour l'année y

Paramètres déterminés par la catégorie du véhicule

$m_{c_i}^{fix}$	Masse fixe d'un véhicule appartenant à la catégorie c_i
$CF_{c_i}^{fix}$	Coût fixe d'un véhicule appartenant à la catégorie c_i
$C_{c_i}^R$	Coefficient de résistance au roulement d'un véhicule appartenant à la catégorie c_i
$C_{c_i}^D$	Coefficient de traînée aérodynamique d'un véhicule appartenant à la catégorie c_i
$A_{c_i}^F$	Surface frontale d'un véhicule appartenant à la catégorie c_i
m_{c_i}	Masse totale moyenne de la catégorie de véhicule c_i

Paramètres déterminés par le cycle de conduite

$v_k(t)$	Vitesse à l'instant t donnée par le cycle de conduite k
$a_k(t)$	Accélération à l'instant t donnée par le cycle de conduite k
$\alpha_k(t)$	Pente à l'instant t donnée par le cycle de conduite k

Paramètres déterminés par le niveau de performance et la type du véhicule

v^*	Vitesse maximale désirée
t^{a^*}	Temps d'accélération pour passer de 0 à $v^a m.s^{-1}$ désiré
v^a	Vitesse maximale utilisée pour tester la performance ($v^a = \frac{100}{3.6} m.s^{-1}$)

- α_* Pente maximale montée à une vitesse constante de $v^m m.s^{-1}$
 v^m Vitesse à laquelle le véhicule peut monter la pente α^*

Paramètre déterminé par la température mensuelle

- $\Omega(y)$ Énergie requise par les accessoires durant le mois y

Paramètres fixes de TVSim

- g Paramètres d'accélération gravitationnelle ($g = 9,81 m.s^{-2}$)
 σ Facteur de conversion de N à kWh
 δ Facteur de conversion de kWh.km $^{-1}$ à Mkm.PJ $^{-1}$

Résultats intermédiaire de TVSim

Forces et puissance requise pour la traction du véhicule

- $F_i^R(t)$ Force de résistance au roulement du véhicule i à l'instant t
 $F_i^D(t)$ Force de traînée aérodynamique du véhicule i à l'instant t
 $F_i^M(t)$ Force de montée du véhicule i à l'instant t
 $F_i^A(t)$ Force d'accélération du véhicule i à l'instant t
 $P_i(t)$ Force requise pour la traction du véhicule i à l'instant t

Puissances requises pour assurer les performances

- P_i^{v*} Puissance requise par le véhicule i pour assurer la performance de vitesse maximale
 P_i^{a*} Puissance requise par le véhicule i pour assurer la performance d'accélération
 P_i^{m*} Puissance requise par le véhicule i pour assurer la performance de montée
 P_i^{k*} Puissance maximale requise par le véhicule i durant la conduite sur le cycle k

Tailles des composants

- P_i^{trans} Puissance de la transmission dont est équipé le véhicule i .
 P_i^{mot} Puissance du moteur électrique dont est équipé le véhicule i
 P_i^{elec} Puissance de l'électronique de puissance dont est équipé le véhicule i .

P_i^{gen}	Puissance du générateur dont est équipé le véhicule PHEV i
P_i^{comb}	Puissance du moteur à combustion dont est équipé le véhicule PHEV i .
P_i^{batt}	Puissance de la batterie électrique dont est équipé le véhicule i
cap_i	Capacité de la batterie électrique dont est équipé le véhicule i

Masses des composants et du véhicule

m_i^{trans}	Masse de la transmission dont est équipé le véhicule i .
m_i^{mot}	Masse du moteur électrique dont est équipé le véhicule i
m_i^{elec}	Masse de l'électronique de puissance dont est équipé le véhicule i .
m_i^{gen}	Masse du générateur dont est équipé le véhicule PHEV i
m_i^{comb}	Masse du moteur à combustion dont est équipé le véhicule PHEV i .
m_i^{batt}	Masse de la batterie électrique dont est équipé le véhicule i
m_i^{tot}	Masse totale du véhicule i

Simulation de conduite

$\Lambda_i(t)$	Énergie requise pour la traction du véhicule i à l'instant t
$\lambda_i^F(t)$	Énergie récupérable au freinage du véhicule i à l'instant t (au niveau des roues)
$\lambda_i^B(t)$	Énergie demandée à la batterie électrique pour assurer la traction du véhicule i à l'instant t (au niveau des roues)
$\lambda_i^C(t)$	Énergie demandée au moteur à combustion pour assurer la traction du véhicule PHEV i à l'instant t (au niveau des roues)
$\Phi_i(t)$	Énergie fournie par la batterie électrique du véhicule i à l'instant t
φ_i^F	Énergie récupérée du freinage par la batterie électrique du véhicule i à l'instant t
φ_i^C	Énergie provenant de la combustion de carburants fossiles pour alimenter la batterie électrique du véhicule PHEV i à l'instant t
$\psi_i^B(t)$	Énergie disponible dans la batterie électrique du véhicule i à l'instant t
$\varpi_i(t)$	État de charge de la batterie électrique véhicule i à l'instant t
$\Psi_i^B(t)$	Consommation électrique (cumulée) du véhicule i à l'instant t
$\Psi_i^C(t)$	Consommation de carburants fossiles (cumulée) du véhicule PHEV i à l'instant t

$h_i(t)$	Proportion d'énergie utilisée pour la traction du véhicule PHEV i fournie par la batterie électrique à l'instant t
$q_i(t)$	Mode de conduite du véhicule PHEV i (0 = consommation de la charge, 1 = maintien de la charge) à l'instant t
$\omega_i^B(t)$	Énergie fournie aux accessoires par la batterie électrique du véhicule i à l'instant t
$\omega_i^C(t)$	Énergie fournie aux accessoires provenant de la combustion de carburants fossiles du véhicule PHEV i à l'instant t
$\Theta_i(t)$	Énergie fournie par la combustion de carburants fossiles du véhicule PHEV i à l'instant t
$\Psi_{i,k}^B$	Consommation électrique (cumulée) du véhicule i sur le cycle k
$EL_{i,k}$	Consommation électrique (en kWh.km ⁻¹) du véhicule i , sur le cycle k
$d(t)$	Distance (cumulée) parcourue par véhicule i à l'instant t
$d^B(t)$	Distance (cumulée) parcourue grâce à la consommation d'énergie électrique par véhicule i à l'instant t
$d^C(t)$	Distance (cumulée) parcourue grâce à la combustion de carburant fossiles par véhicule PHEV i à l'instant t

Coûts

$C_i^{trans}(y)$	Coût de la transmission dont est équipé le véhicule i , durant l'année y
$C_i^{mot}(y)$	Coût du moteur électrique dont est équipé le véhicule i , durant l'année y
$C_i^{elec}(y)$	Coût de l'électronique de puissance dont est équipé le véhicule i , durant l'année y
$C_i^{batt}(y)$	Coût de la batterie électrique dont est équipé le véhicule i , durant l'année y
$C_i^{gen}(y)$	Coût du générateur dont est équipé le véhicule PHEV i , durant l'année y
$C_i^{comb}(y)$	Coût du moteur à combustion dont est équipé le véhicule PHEV i , durant l'année y
$CP_i(y)$	Coût du GMP du véhicule i , durant l'année y
$CF_i(y)$	Coût fixe du véhicule i , durant l'année y
cr_i	Coût total de remplacement de la batterie électrique du véhicule i , tout au long de sa vie
cra_i	Coût annuel de remplacement de la batterie électrique du véhicule i
$cma_i(y)$	Coût d'opération et de maintenance (autre que le remplacement de la batterie) du véhicule i , durant l'année y

Résultats Finaux de TVSim

- $CI_i(y)$ Coût d'investissement de la technologie de véhicule i , durant l'année y , correspond au paramètre INVCOST dans TIMES
- $CM_i(y)$ Coût d'opération et de maintenance de la technologie de véhicule i , durant l'année y , correspond au paramètre FIXOM dans TIMES
- $E_i^B(y)$ Efficacité électrique de la technologie de véhicule i , durant l'année y , correspond au paramètre EFF ELC dans TIMES
- $E_i^C(y)$ Efficacité de la combustion de carburants fossiles de la technologie de véhicule PHEV i , durant l'année y , correspond au paramètre EFF ICE dans TIMES
- $UF_i(y)$ Facteur d'utilité de la technologie de véhicule PHEV i , durant l'année y , correspond au paramètre ShareLO2015 dans TIMES

6.8 Architectures de véhicules électriques représentées dans TVSim

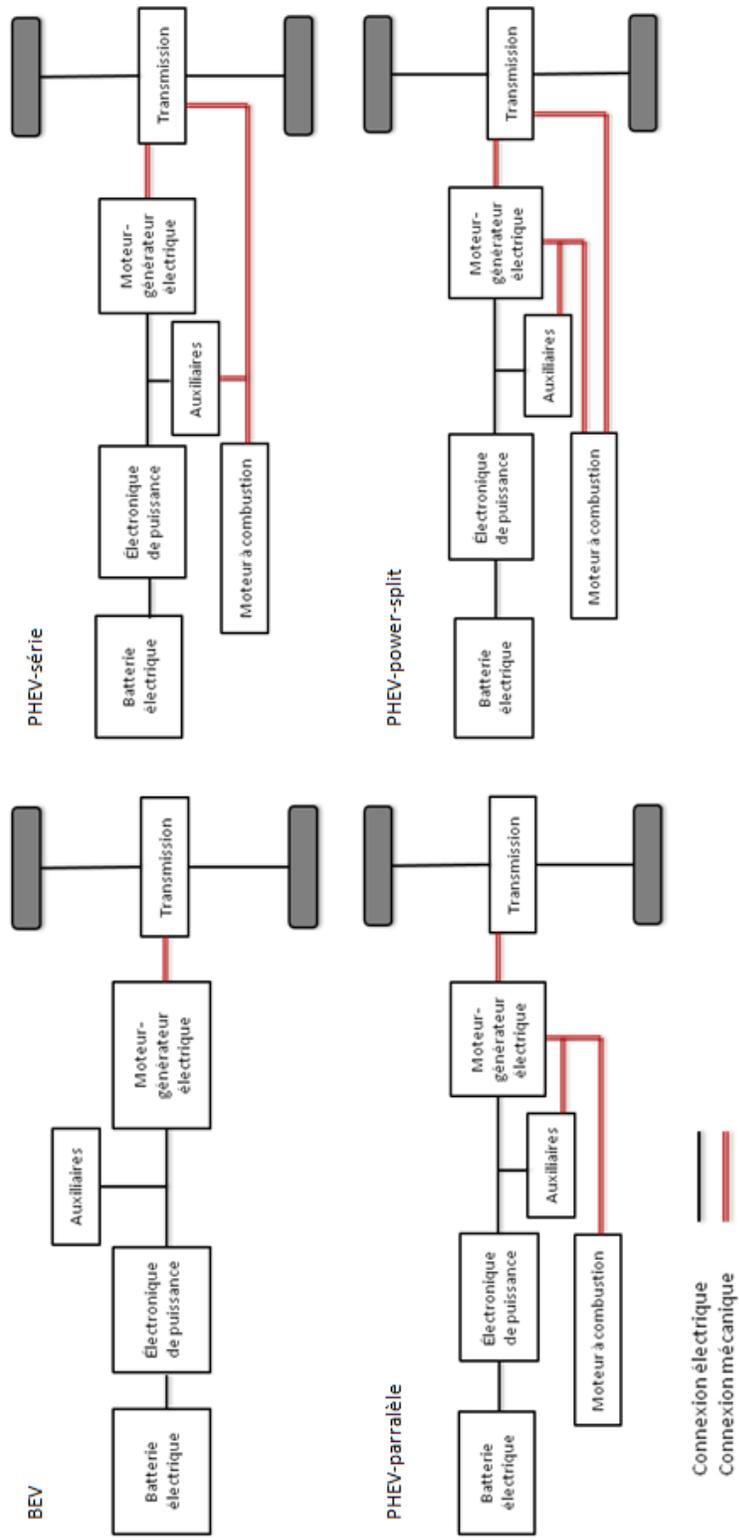


FIGURE 6.3 – Architectures de véhicules électriques représentées dans TVSim

6.9 Composants représentés dans TVSim

Composants	Caractéristiques
Transmission	Efficacité(%), coût(Cnd\$)
Moteur électrique	Efficacité (%), puissance spécifique (kW.kg ⁻¹), coût (Cdn\$)
Moteur à combustion	Efficacité (%), puissance spécifique (kW.kg ⁻¹), coût (Cdn\$)
Générateur	Efficacité (%), puissance spécifique (kW.kg ⁻¹), coût (Cdn\$)
Batterie électrique	Efficacité (%), puissance spécifique (kW.kg ⁻¹), énergie spécifique (kWh.kg ⁻¹), coût (Cdn\$)
Électronique de puissance	Efficacité (%), puissance spécifique (kW.kg ⁻¹), coût (Cdn\$)

Tableau 6.3 – Liste des composants représentés dans le modèle TVSim

6.10 Cycles de conduite représentés dans TVSim

Le tableau 6.4 présente les cycles de conduite inclus dans TVSim, ainsi que leur description.

Cycle de conduite	Types de véhicule	Description
NEDC (<i>New European Driving Cycle</i>)	légers	combine la conduite urbaine (2/3) et extra-urbaine (1/3)
UDDS (<i>Urban Dynamometer Driving Cycle</i>)	légers	conduite urbaine
HWFET (<i>Highway Fuel Economy Test</i>)	légers	conduite sur autoroute en dessous de 100km/h
NYCC (<i>New York City Cycle</i>)	légers	conduite urbaine en conditions d'arrêts fréquents (<i>stop-and-go</i>)
US06	légers	conduite sujette à des accélérations fortes et agressives
HUDDS (<i>Heavy duty Urban Dynamometer Driving Cycle</i>)	lourds	conduite urbaine de poids lourds

Tableau 6.4 – Cycles de conduite représentés dans TVSim

6.11 Calcul des tailles et masses des composants et du véhicule

Les tailles et masses des composants et masses des véhicules BEV, PHEV-série, PHEV-parallèle et PHEV-*power-split* sont calculées par les algorithmes 2, 3, 4 et 5 respectivement. Les variables et constantes utilisées par ces algorithmes sont présentées ci-dessous.

Constantes des algorithmes 2 à 5 :

c_i	Catégorie à laquelle appartient le véhicule i
g	Paramètres d'accélération gravitationnelle ($g = 9,81m.s^{-2}$)
C_i^R	Coefficient de résistance au roulement du véhicule i
C_i^D	Coefficient de traînée aérodynamique du véhicule i
ρ	Densité de l'air (en $kg.m^{-3}$)
A_i^F	Surface frontale du véhicule i (en m^2)
v^*	Vitesse maximale désirée
t^{a*}	Temps d'accélération pour passer de 0 à $v^a m.s^{-1}$ désiré
v^a	Vitesse maximale utilisée pour tester la performance ($v^a = \frac{100}{3.6} m.s^{-1}$)
α_*	Pente maximale montée à une vitesse constante de $v^m m.s^{-1}$
v^m	Vitesse à laquelle le véhicule peut monter la pente α^*
η_i^{trans}	Efficacité de la transmission dont est équipé le véhicule i .
η_i^{mot}	Efficacité du moteur électrique dont est équipé le véhicule i .
η_i^{elec}	Efficacité de l'électronique de puissance dont est équipé le véhicule i .
η_i^{gen}	Efficacité du générateur dont est équipé le véhicule PHEV i .
η_i^{comb}	Efficacité du moteur à combustion dont est équipé le véhicule PHEV i .
η_i^{batt}	Efficacité de la batterie électrique dont est équipé le véhicule i .
ξ_i^{trans}	Puissance spécifique de la transmission dont est équipé le véhicule i .
ξ_i^{mot}	Puissance spécifique du moteur électrique dont est équipé le véhicule i .
ξ_i^{elec}	Puissance spécifique de l'électronique de puissance dont est équipé le véhicule i .
ξ_i^{gen}	Puissance spécifique du générateur dont est équipé le véhicule PHEV i .
ξ_i^{comb}	Puissance spécifique du moteur à combustion dont est équipé le véhicule PHEV i .
ξ_i^{batt}	Puissance spécifique de la batterie électrique dont est équipé le véhicule i .

$\rho_i^{batt} \in \mathbb{R}$	Énergie spécifique de la batterie électrique dont est équipé le véhicule i .
$m_{c_i} \in \mathbb{R}$	Masse moyenne des véhicules de la catégorie c_i
$\varepsilon \in \mathbb{R}$	Seuil de tolérance du processus itératif de “ <i>mass-compounding</i> ”
$m_{c_i}^{fix} \in \mathbb{R}$	Masse fixe d’un véhicule appartenant à la catégorie c_i
$\varpi_i^S \in \mathbb{R}$	Seuil minimal de l’état de charge de la batterie électrique du véhicule i

Variables des algorithmes 2 à 5 :

$P_i^{trans} \in \mathbb{R}$	Puissance de la transmission dont est équipé le véhicule i .
$P_i^{mot} \in \mathbb{R}$	Puissance du moteur électrique dont est équipé le véhicule i
$P_i^{elec} \in \mathbb{R}$	Puissance de l’électronique de puissance dont est équipé le véhicule i .
$P_i^{gen} \in \mathbb{R}$	Puissance du générateur dont est équipé le véhicule PHEV i
$P_i^{comb} \in \mathbb{R}$	Puissance du moteur à combustion dont est équipé le véhicule PHEV i .
$P_i^{batt} \in \mathbb{R}$	Puissance de la batterie électrique dont est équipé le véhicule i
$cap_i \in \mathbb{R}$	Capacité de la batterie électrique dont est équipé le véhicule i
$m_i^{trans} \in \mathbb{R}$	Masse de la transmission dont est équipé le véhicule i .
$m_i^{mot} \in \mathbb{R}$	Masse du moteur électrique dont est équipé le véhicule i
$m_i^{elec} \in \mathbb{R}$	Masse de l’électronique de puissance dont est équipé le véhicule i .
$m_i^{gen} \in \mathbb{R}$	Masse du générateur dont est équipé le véhicule PHEV i
$m_i^{comb} \in \mathbb{R}$	Masse du moteur à combustion dont est équipé le véhicule PHEV i .
$m_i^{batt} \in \mathbb{R}$	Masse de la batterie électrique dont est équipé le véhicule i
$P_i^{v*} \in \mathbb{R}$	Puissance requise par le véhicule i pour assurer la performance de vitesse maximale
$P_i^{a*} \in \mathbb{R}$	Puissance requise par le véhicule i pour assurer la performance d’accélération
$P_i^{m*} \in \mathbb{R}$	Puissance requise par le véhicule i pour assurer la performance de montée
$P_i^{k*} \in \mathbb{R}$	Puissance maximale requise par le véhicule i durant la conduite sur le cycle k
$EL_{i,k} \in \mathbb{R}$	Consommation électrique (en kWh.km ⁻¹) du véhicule i , sur le cycle k
$m_i(n) \in \mathbb{R}$	Masse du véhicule i à l’itération n

Algorithm 2 Calcul des tailles et masses des composants et de la masse totale du véhicule BEV

 i

Initialization

 $n \leftarrow 0; P_i^{trans} \leftarrow 0; P_i^{mot} \leftarrow 0; P_i^{elec} \leftarrow 0; P_i^{batt} \leftarrow 0; cap_i \leftarrow 0; m_i^{trans} \leftarrow 0;$
 $m_i^{mot} \leftarrow 0; m_i^{elec} \leftarrow 0; m_i^{batt} \leftarrow 0; P_i^{v^*} \leftarrow 0; P_i^{a^*} \leftarrow 0; P_i^{m^*} \leftarrow 0; P_i^{k^*} \leftarrow 0; \Psi_{i,k}^B \leftarrow 0;$
 $m_i(n) \leftarrow 0$ $n \leftarrow 1$ $m_i(n) \leftarrow m_{c_i}$ **while** $\left| \frac{m_i(n-1) - m_i(n)}{m_i(n-1)} \right| > \varepsilon$ **do**

$$P_i^{v^*} \leftarrow m_i(n) \cdot g \cdot C_i^R \cdot v^* + \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot C_i^D \cdot A_i^F \cdot (v^*)^3$$

$$P_i^{a^*} \leftarrow \frac{\left(m_i(n) \cdot \left(\frac{v^a}{t^{a^*}} \right) m_i(N) \cdot g \cdot C_i^R + \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot C_i^D \cdot A_i^F \cdot (v^a)^2 \right) \cdot v^a}{x^a}$$

$$P_i^{m^*} \leftarrow \left(m_i(n) \cdot g \cdot C_i^R + \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot C_i^D \cdot A_i^F \cdot (v^m)^2 + m_i(n) \cdot \sin \alpha^* \right) \cdot v^m$$

Call Algorithm 6 (Compute $P_i^{k^*}$)Call Algorithm 6 (Compute $EL_{i,k}$)

$$P_i^{trans} \leftarrow \text{Max}(P_i^{v^*}, P_i^{m^*}, P_i^{a^*}, P_i^{k^*})$$

$$P_i^{mot} \leftarrow \frac{P_i^{trans}}{\eta_i^{trans}}$$

$$P_i^{elec} \leftarrow \frac{P_i^{mot}}{\eta_i^{mot}} + \Omega_i$$

$$P_i^{batt} \leftarrow \frac{P_i^{elec}}{\eta_i^{elec}}$$

$$cap_i \leftarrow \frac{EL_{i,k} \cdot r_i}{(1 - \varpi_i)}$$

$$m_i^{trans} \leftarrow P_i^{trans} \cdot \xi_i^{trans}$$

$$m_i^{mot} \leftarrow P_i^{mot} \cdot \xi_i^{mot}$$

$$m_i^{elec} \leftarrow P_i^{elec} \cdot \xi_i^{elec}$$

$$m_i^{batt} \leftarrow \text{Max}(P_i^{batt} \cdot \xi_i^{batt}, cap_i \cdot \varrho_i^{batt})$$

Algorithm 2 Calcul des tailles et masses des composants et de la masse totale du véhicule BEV i (continued)

$$m_i(n) \leftarrow m_{c_i}^F + m_i^{trans} + m_i^{mot} + m_i^{elec} + m_i^{batt}$$

$$n \leftarrow n + 1$$

end while

$$m_i \leftarrow m_i(n)$$

Algorithm 3 Calcul des tailles et masses des composants et de la masse totale du véhicule PHEV-série i

Initialization

$$n \leftarrow 0; P_i^{trans} \leftarrow 0; P_i^{mot} \leftarrow 0; P_i^{elec} \leftarrow 0; P_i^{gen} \leftarrow 0; P_i^{comb} \leftarrow 0; P_i^{batt} \leftarrow 0; \\ cap_i \leftarrow 0; m_i^{trans} \leftarrow 0; m_i^{mot} \leftarrow 0; m_i^{elec} \leftarrow 0; m_i^{gen} \leftarrow 0; m_i^{comb} \leftarrow 0; m_i^{batt} \leftarrow 0; \\ P_i^{v^*} \leftarrow 0; P_i^{a^*} \leftarrow 0; P_i^{m^*} \leftarrow 0; P_i^{k^*} \leftarrow 0; \Psi_{i,k}^B \leftarrow 0; m_i(n) \leftarrow 0$$

$$n \leftarrow 1$$

$$m_i(n) \leftarrow m_{c_i}$$

while $\left| \frac{m_i(n-1) - m_i(n)}{m_i(n-1)} \right| > \varepsilon$ **do**

$$P_i^{v^*} \leftarrow m_i(n) \cdot g \cdot C_i^R \cdot v^* + \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot C_i^D \cdot A_i^F \cdot (v^*)^3$$

$$P_i^{a^*} \leftarrow \frac{\left(m_i(n) \cdot \left(\frac{v^a}{t^{a^*}} \right) m_i(n) \cdot g \cdot C_i^R + \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot C_i^D \cdot A_i^F \cdot (v^a)^2 \right) \cdot v^a}{x^a}$$

$$P_i^{m^*} \leftarrow \left(m_i(n) \cdot g \cdot C_i^R + \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot C_i^D \cdot A_i^F \cdot (v^m)^2 + m_i(n) \cdot \sin \alpha^* \right) \cdot v^m$$

Call Algorithm 6 (Compute $P_i^{k^*}$)

Call Algorithm 6 (Compute $EL_{i,k}$)

Algorithm 3 Calcul des tailles et masses des composants et de la masse totale du véhicule PHEV-série i (continued)

$$P_i^{trans} \leftarrow \text{Max}(P_i^{v*}, P_i^{m*}, P_i^{a*}, P_i^{k*})$$

$$P_i^{mot} \leftarrow \frac{P_i^{trans}}{\eta_i^{trans}}$$

$$P_i^{elec} \leftarrow \frac{P_i^{mot}}{\eta_i^{mot}} + \Omega_i$$

$$P_i^{batt} \leftarrow \frac{P_i^{elec}}{\eta_i^{elec}}$$

$$cap_i \leftarrow \frac{EL_{i,k} \cdot r_i}{(1 - \varpi_i)}$$

$$P_i^{gen} \leftarrow \frac{P_i^{k*}}{\eta_i^{trans} \cdot \eta_i^{mot}}$$

$$P_i^{comb} \leftarrow \frac{P_i^{gen}}{\eta_i^{gen}} + \Omega_i$$

$$m_i^{trans} \leftarrow P_i^{trans} \cdot \xi_i^{trans}$$

$$m_i^{mot} \leftarrow P_i^{mot} \cdot \xi_i^{mot}$$

$$m_i^{elec} \leftarrow P_i^{elec} \cdot \xi_i^{elec}$$

$$m_i^{gen} \leftarrow P_i^{gen} \cdot \xi_i^{gen}$$

$$m_i^{comb} \leftarrow P_i^{comb} \cdot \xi_i^{comb}$$

$$m_i^{batt} \leftarrow \text{Max}(P_i^{batt} \cdot \xi_i^{batt}, cap_i \cdot \rho_i^{batt})$$

$$m_i(n) \leftarrow m_{c_i}^F + m_i^{trans} + m_i^{mot} + m_i^{elec} + m_i^{gen} + m_i^{comb} + m_i^{batt}$$

$$n \leftarrow n + 1$$

end while

$$m_i \leftarrow m_i(n)$$

Algorithm 4 Calcul des tailles et masses des composants et de la masse totale du véhicule PHEV-parallèle i

Initialization

$n \leftarrow 0; P_i^{trans} \leftarrow 0; P_i^{mot} \leftarrow 0; P_i^{elec} \leftarrow 0; P_i^{comb} \leftarrow 0; P_i^{batt} \leftarrow 0; cap_i \leftarrow 0;$
 $m_i^{trans} \leftarrow 0; m_i^{mot} \leftarrow 0; m_i^{elec} \leftarrow 0; m_i^{comb} \leftarrow 0; m_i^{batt} \leftarrow 0; P_i^{v*} \leftarrow 0; P_i^{a*} \leftarrow 0;$
 $P_i^{m*} \leftarrow 0; P_i^{k*} \leftarrow 0; \Psi_{i,k}^B \leftarrow 0; m_i(n) \leftarrow 0$

$n \leftarrow 1$

$m_i(n) \leftarrow m_{c_i}$

while $\left| \frac{m_i(n-1) - m_i(n)}{m_i(n-1)} \right| > \varepsilon$ **do**

$$P_i^{v*} \leftarrow m_i(n) \cdot g \cdot C_i^R \cdot v^* + \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot C_i^D \cdot A_i^F \cdot (v^*)^3$$

$$P_i^{a*} \leftarrow \frac{\left(m_i(n) \cdot \left(\frac{v^a}{t^{a*}} \right) m_i(n) \cdot g \cdot C_i^R + \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot C_i^D \cdot A_i^F \cdot (v^a)^2 \right) \cdot v^a}{x^a}$$

$$P_i^{m*} \leftarrow \left(m_i(n) \cdot g \cdot C_i^R + \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot C_i^D \cdot A_i^F \cdot (v^m)^2 + m_i(n) \cdot \sin \alpha^* \right) \cdot v^m$$

Call Algorithm 6 (Compute P_i^{k*})

Call Algorithm 6 (Compute $EL_{i,k}$)

$$P_i^{trans} \leftarrow \text{Max}(P_i^{v*}, P_i^{m*}, P_i^{a*}, P_i^{k*})$$

$$P_i^{mot} \leftarrow \frac{P_i^{k*}}{\eta_i^{trans}}$$

$$P_i^{elec} \leftarrow \frac{P_i^{mot}}{\eta_i^{mot}} + \Omega_i$$

$$P_i^{batt} \leftarrow \frac{P_i^{elec}}{\eta_i^{elec}}$$

$$cap_i \leftarrow \frac{EL_{i,k} \cdot r_i}{(1 - \varpi_i)}$$

$$P_i^{comb} \leftarrow \frac{P_i^{trans}}{\eta_i^{trans}} + \Omega_i - P_i^{mot}$$

Algorithm 4 Calcul des tailles et masses des composants et de la masse totale du véhicule PHEV-parallèle i (continued)

$$\begin{aligned}
m_i^{trans} &\leftarrow P_i^{trans} \cdot \xi_i^{trans} \\
m_i^{mot} &\leftarrow P_i^{mot} \cdot \xi_i^{mot} \\
m_i^{elec} &\leftarrow P_i^{elec} \cdot \xi_i^{elec} \\
m_i^{comb} &\leftarrow P_i^{comb} \cdot \xi_i^{comb} \\
m_i^{batt} &\leftarrow \text{Max} (P_i^{batt} \cdot \xi_i^{batt}, \text{cap}_i \cdot \rho_i^{batt}) \\
m_i(n) &\leftarrow m_{c_i}^F + m_i^{trans} + m_i^{mot} + m_i^{elec} + m_i^{comb} + m_i^{batt} \\
n &\leftarrow n + 1
\end{aligned}$$

end while

$$m_i \leftarrow m_i(n)$$

Algorithm 5 Calcul des tailles et masses des composants et de la masse totale du véhicule PHEV-power-split i

Initialization

$$\begin{aligned}
n &\leftarrow 0; P_i^{trans} \leftarrow 0; P_i^{mot} \leftarrow 0; P_i^{elec} \leftarrow 0; P_i^{gen} \leftarrow 0; P_i^{comb} \leftarrow 0; P_i^{batt} \leftarrow 0; \\
\text{cap}_i &\leftarrow 0; m_i^{trans} \leftarrow 0; m_i^{mot} \leftarrow 0; m_i^{elec} \leftarrow 0; m_i^{gen} \leftarrow 0; m_i^{comb} \leftarrow 0; m_i^{batt} \leftarrow 0; \\
P_i^{v^*} &\leftarrow 0; P_i^{a^*} \leftarrow 0; P_i^{m^*} \leftarrow 0; P_i^{k^*} \leftarrow 0; \Psi_{i,k}^B \leftarrow 0; m_i(n) \leftarrow 0
\end{aligned}$$

$$n \leftarrow 1$$

$$m_i(n) \leftarrow m_{c_i}$$

while $\left| \frac{m_i(n-1) - m_i(n)}{m_i(n-1)} \right| > \varepsilon$ **do**

$$P_i^{v^*} \leftarrow m_i(n) \cdot g \cdot C_i^R \cdot v^* + \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot C_i^D \cdot A_i^F \cdot (v^*)^3$$

$$P_i^{a^*} \leftarrow \frac{\left(m_i(n) \cdot \left(\frac{v^a}{t^{a^*}} \right) m_i(n) \cdot g \cdot C_i^R + \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot C_i^D \cdot A_i^F \cdot (v^a)^2 \right) \cdot v^a}{x^a}$$

$$P_i^{m^*} \leftarrow \left(m_i(n) \cdot g \cdot C_i^R + \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot C_i^D \cdot A_i^F \cdot (v^m)^2 + m_i(n) \cdot \sin \alpha^* \right) \cdot v^m$$

Algorithm 5 Calcul des tailles et masses des composants et de la masse totale du véhicule PHEV-power-split i (continued)

Call Algorithm 6 (Compute P_i^{k*})

Call Algorithm 6 (Compute $EL_{i,k}$)

$$P_i^{trans} \leftarrow \text{Max}(P_i^{v*}, P_i^{m*}, P_i^{a*}, P_i^{k*})$$

$$P_i^{mot} \leftarrow \frac{P_i^{k*}}{\eta_i^{trans}}$$

$$P_i^{elec} \leftarrow \frac{P_i^{mot}}{\eta_i^{mot}} + \Omega_i$$

$$P_i^{batt} \leftarrow \frac{P_i^{elec}}{\eta_i^{elec}}$$

$$cap_i \leftarrow \frac{EL_{i,k} \cdot r_i}{(1 - \varpi_i)}$$

$$P_i^{comb} \leftarrow \frac{P_i^{trans}}{\eta_i^{trans}} + \Omega_i - P_i^{mot}$$

$$P_i^{gen} \leftarrow P_i^{comb} \cdot \eta_i^{gen}$$

$$m_i^{trans} \leftarrow P_i^{trans} \cdot \xi_i^{trans}$$

$$m_i^{mot} \leftarrow P_i^{mot} \cdot \xi_i^{mot}$$

$$m_i^{elec} \leftarrow P_i^{elec} \cdot \xi_i^{elec}$$

$$m_i^{gen} \leftarrow P_i^{gen} \cdot \xi_i^{gen}$$

$$m_i^{comb} \leftarrow P_i^{comb} \cdot \xi_i^{comb}$$

$$m_i^{batt} \leftarrow \text{Max}(P_i^{batt} \cdot \xi_i^{batt}, cap_i \cdot \rho_i^{batt})$$

$$m_i(n) \leftarrow m_{c_i}^F + m_i^{trans} + m_i^{mot} + m_i^{elec} + m_i^{gen} + m_i^{comb} + m_i^{batt}$$

$$n \leftarrow n + 1$$

end while

$$m_i \leftarrow m_i(n)$$

6.12 Détermination des paramètres P^{k*} et EL_k

Les valeurs des paramètres P^{k*} et EL_k sont calculés grâce à une simple simulation de conduite, à partir du cycle de conduite k (selon le choix de l'utilisateur), par l'algorithme 6. Les constantes et variables de l'algorithme 6 sont présentées ci-dessous.

Constantes de l'algorithme 6 :

$m_i(n)$	Masse du véhicule i à l'itération n de l'algorithme 2, 3, 4 ou 5
g	Paramètre d'accélération gravitationnelle ($g = 9,81m.s^{-2}$)
C_i^R	Coefficient de résistance au roulement du véhicule i
C_i^D	Coefficient de traînée aérodynamique du véhicule i
ρ	Densité de l'air (en $kg.m^{-3}$)
A_i^F	Surface frontale du véhicule i (en m^2)
$v_k(t)$	Vitesse à l'instant t donnée par le cycle de conduite k
$a_k(t)$	Accélération à l'instant t donnée par le cycle de conduite k
$\alpha_k(t)$	Pente à l'instant t donnée par le cycle de conduite k
σ	Facteur de conversion de N à kWh
η_i^{trans}	Efficacité de la transmission dont est équipé le véhicule i .
η_i^{mot}	Efficacité du moteur électrique dont est équipé le véhicule i .
η_i^{elec}	Efficacité de l'électronique de puissance dont est équipé le véhicule i .
η_i^{gen}	Efficacité du générateur dont est équipé le véhicule PHEV i .
η_i^{comb}	Efficacité du moteur à combustion dont est équipé le véhicule PHEV i .
η_i^{batt}	Efficacité de la batterie électrique dont est équipé le véhicule i .
$\Omega_i(t)$	Énergie requise par les accessoires du véhicule i à l'instant t

Variables de l'algorithme 6 :

$F_i^R(t)$	Force de résistance au roulement du véhicule i à l'instant t
$F_i^D(t)$	Force de traînée aérodynamique du véhicule i à l'instant t
$F_i^M(t)$	Force de montée du véhicule i à l'instant t
$F_i^A(t)$	Force d'accélération du véhicule i à l'instant t
$P_i(t)$	Force requise pour la traction du véhicule i à l'instant t

$\Lambda_i(t) \in \mathbb{R}$	Énergie requise pour la traction du véhicule i à l'instant t
$\lambda_i^F(t) \in \mathbb{R}$	Énergie récupérable au freinage du véhicule i à l'instant t (au niveau des roues)
$\lambda_i^B(t) \in \mathbb{R}$	Énergie demandée à la batterie électrique pour assurer la traction du véhicule i à l'instant t (au niveau des roues)
$\Phi_i(t) \in \mathbb{R}$	Énergie fournie par la batterie électrique du véhicule i à l'instant t
$\varphi_i^F \in \mathbb{R}$	Énergie récupérée du freinage par la batterie électrique du véhicule i à l'instant t
$\psi_i^B(t) \in \mathbb{R}$	Énergie disponible dans la batterie électrique du véhicule i à l'instant t
$P_i^{k*} \in \mathbb{R}$	Puissance maximale requise par le véhicule i durant la conduite sur le cycle k
$\Psi_{i,k}^B \in \mathbb{R}$	Consommation d'électricité (cumulée) du véhicule i sur le cycle k
$EL_{i,k} \in \mathbb{R}$	Consommation électrique (en kWh/km) du véhicule i , sur le cycle k
$d(t) \in \mathbb{R}$	Distance (cumulée) parcourue par véhicule i à l'instant t

Algorithm 6 Détermination des valeurs des paramètres P^{k*} et EL_k

Initialization

$t \leftarrow 0$; $F_i^R(t) \leftarrow 0$; $F_i^D(t) \leftarrow 0$; $F_i^M(t) \leftarrow 0$; $F_i^A(t) \leftarrow 0$; $P_i(t) \leftarrow 0$; $\lambda_i^F(t) \leftarrow 0$;
 $\Lambda_i(t) \leftarrow 0$; $\Phi_i(t) \leftarrow 0$; $\varphi_i^B(t) \leftarrow 0$; $\psi_i^B(t) \leftarrow cap_i$; $\Psi_i^B(t) \leftarrow 0$; $\varpi_i(t) \leftarrow 0$; $\Psi_i^B(t) \leftarrow 0$;
 $d(t) \leftarrow 0$; $P_i^{k*} \leftarrow 0$; $\Psi_k^B \leftarrow 0$

$t \leftarrow 1$

while $t \leq T$ **do**

$F_i^R(t) \leftarrow m_i(n).g.C_i^R$

$F_i^D(t) \leftarrow \frac{1}{2} \cdot \rho.C_i^D.A_i^F.(v_k(t))^2$

$F_i^M(t) \leftarrow m_i(n).g.sin\alpha_k(t)$

$F_i^A(t) \leftarrow m_i(n).a_k(t)$

if $F_i^A(t) \geq 0$ **then**

$P_i(t) \leftarrow [F_i^R(t) + F_i^D(t) + F_i^M(t) + F_i^A(t)].v_k(t)$

$\lambda_i^F(t) \leftarrow 0$

Algorithm 6 Détermination des valeurs des paramètres $P_i^{k^*}$ et EL_k (continued)

else

$$P_i(t) \leftarrow [F_i^R(t) + F_i^D(t) + F_i^M(t)] \cdot v_k(t)$$
$$\lambda_i^F(t) \leftarrow -F_i^A(t) \cdot v(t) \cdot \sigma$$

end if

if $P_i(t) > P_i^{k^*}$ **then**

$$P_i^{k^*} \leftarrow P_i(t)$$

end if

$$\Lambda_i(t) \leftarrow P_i(t) \cdot \sigma$$
$$\Phi_i(t) \leftarrow \frac{\Lambda_i(t)}{\eta_i^{trans} \cdot \eta_i^{mot} \cdot \eta_i^{elec} \cdot \eta_i^{batt}} + \frac{\Omega_i(t)}{\eta_i^{elec} \cdot \eta_i^{batt}}$$
$$\varphi_i^B(t) \leftarrow \lambda_i^F(t) \cdot \eta_i^{reïn} \cdot \eta_i^{trans} \cdot \eta_i^{mot} \cdot \eta_i^{elec} \cdot \eta_i^{batt}$$
$$\Psi_i^B(t) \leftarrow \Psi_i^B(t-1) + \Phi_i(t) - \varphi_i^F(t)$$
$$t \leftarrow t + 1$$
$$d(t) \leftarrow d(t-1) + v(t)$$

end while

$$EL_{i,k} \leftarrow \frac{\Psi_i^B(T)}{d(T)}$$

6.13 Détermination de la consommation des véhicules

La consommation (électrique et de carburants fossiles - en kWh), ainsi que le facteur d'hybridation pour les PHEVs, sont calculés selon des cycles de conduite, en suivant l'algorithme 7 pour les BEVs, 8 pour les PHEV-série, 9 pour les PHEV-parallèle et 10 pour les PHEV-*power-split*. Les constantes et variables utilisées par les algorithmes 7 à 10 sont présentées ci-dessous.

Constantes des algorithmes 7 à 10 :

- m_i Masse du véhicule i
- g Paramètre d'accélération gravitationnelle ($g = 9,81 m \cdot s^{-2}$)
- C_i^R Coefficient de résistance au roulement du véhicule i

C_i^D	Coefficient de traînée aérodynamique du véhicule i
ρ	Densité de l'air (en $kg.m^{-3}$)
A_i^F	Surface frontale du véhicule i (en m^2)
$v_k(t)$	Vitesse à l'instant t donnée par le cycle de conduite k
$a_k(t)$	Accélération à l'instant t donnée par le cycle de conduite k
$\alpha_k(t)$	Pente à l'instant t donnée par le cycle de conduite k
σ	Facteur de conversion de N à kWh
η_i^{trans}	Efficacité de la transmission dont est équipé le véhicule i .
η_i^{mot}	Efficacité du moteur électrique dont est équipé le véhicule i .
η_i^{elec}	Efficacité de l'électronique de puissance dont est équipé le véhicule i .
η_i^{gen}	Efficacité du générateur dont est équipé le véhicule PHEV i .
η_i^{comb}	Efficacité du moteur à combustion dont est équipé le véhicule PHEV i .
η_i^{batt}	Efficacité de la batterie électrique dont est équipé le véhicule i .
cap_i	Capacité de la batterie électrique du véhicule i .
Π_i^B	Puissance maximale pouvant être fournie par le moteur électrique du véhicule PHEV i .
Π_i^C	Puissance maximale pouvant être fournie par le moteur à combustion du véhicule PHEV i .
$\Omega_i(t)$	Énergie requise par les accessoires du véhicule i à l'instant t
ϖ_i^S	Seuil de l'état de charge de la batterie du véhicule PHEV i indiquant le passage du mode consommation de la charge au mode maintien de la charge
ϖ_i^R	Seuil indiquant le début du processus de recharge de la batterie du véhicule PHEV (série ou power-split) i par son moteur à combustion
b_i	Proportion d'énergie fournie aux accessoires du véhicule PHEV i par le moteur à combustion en mode 'maintien de la charge'.

Variables des algorithmes 7 à 10 :

$F_i^R(t)$	Force de résistance au roulement du véhicule i à l'instant t
$F_i^D(t)$	Force de traînée aérodynamique du véhicule i à l'instant t
$F_i^M(t)$	Force de montée du véhicule i à l'instant t
$F_i^A(t)$	Force d'accélération du véhicule i à l'instant t
$P_i(t)$	Force requise pour la traction du véhicule i à l'instant t

$\Lambda_i(t)$	Énergie requise pour la traction du véhicule i à l'instant t
$\lambda_i^F(t)$	Énergie récupérable au freinage du véhicule i à l'instant t (au niveau des roues)
$\lambda_i^B(t)$	Énergie demandée à la batterie électrique pour assurer la traction du véhicule i à l'instant t (au niveau des roues)
$\lambda_i^C(t)$	Énergie demandée au moteur à combustion pour assurer la traction du véhicule PHEV i à l'instant t (au niveau des roues)
$\Phi_i(t)$	Énergie fournie par la batterie électrique du véhicule i à l'instant t
φ_i^F	Énergie récupérée du freinage par la batterie électrique du véhicule i à l'instant t
φ_i^C	Énergie provenant de la combustion de carburants fossiles pour alimenter la batterie électrique du véhicule PHEV i à l'instant t
$\psi_i^B(t)$	Énergie disponible dans la batterie électrique du véhicule i à l'instant t
$\varpi_i(t)$	État de charge de la batterie électrique véhicule i à l'instant t
$\Psi_i^B(t)$	Consommation électrique (cumulée) du véhicule i à l'instant t
$\Psi_i^C(t)$	Consommation de carburants fossiles (cumulée) du véhicule PHEV i à l'instant t
$h_i(t)$	Proportion d'énergie utilisée pour la traction du véhicule PHEV i fournie par la batterie électrique à l'instant t
$q_i(t)$	Mode de conduite du véhicule PHEV i (0 = consommation de la charge, 1 = maintien de la charge) à l'instant t
$\omega_i^B(t)$	Énergie fournie aux accessoires par la batterie électrique du véhicule i à l'instant t
$\omega_i^C(t)$	Énergie fournie aux accessoires provenant de la combustion de carburants fossiles du véhicule PHEV i à l'instant t
$\Theta_i(t)$	Énergie fournie par la combustion de carburants fossiles du véhicule PHEV i à l'instant t
P_i^{k*}	Puissance maximale requise par le véhicule i durant la conduite sur le cycle k
$\Psi_{i,k}^B$	Consommation électrique du véhicule i sur le cycle k
$d(t)$	Distance (cumulée) parcourue par véhicule i à l'instant t
$d^B(t)$	Distance (cumulée) parcourue grâce à la consommation d'énergie électrique par véhicule i à l'instant t
$d^C(t)$	Distance (cumulée) parcourue grâce à la combustion de carburant fossiles par véhicule PHEV i à l'instant t

Algorithm 7 Calcul de la consommation du véhicule BEV i

Initialization

$t \leftarrow 0$; $F_i^R(t) \leftarrow 0$; $F_i^D(t) \leftarrow 0$; $F_i^M(t) \leftarrow 0$; $F_i^A(t) \leftarrow 0$; $P_i(t) \leftarrow 0$; $\lambda_i^F(t) \leftarrow 0$;
 $\Lambda_i(t) \leftarrow 0$; $\Phi_i(t) \leftarrow 0$; $\varphi_i^B(t) \leftarrow 0$; $\psi_i^B(t) \leftarrow cap_i$; $\Psi_i^B(t) \leftarrow 0$; $\varpi_i(t) \leftarrow 0$; $\Psi_i^B(t) \leftarrow 0$;
 $d(t) \leftarrow 0$

$t \leftarrow 1$

while $t \leq T$ **do**

$$F_i^R(t) \leftarrow m_i \cdot g \cdot C_i^R$$

$$F_i^D(t) \leftarrow \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot C_i^D \cdot A_i^F \cdot (v_k(t))^2$$

$$F_i^M(t) \leftarrow m_i \cdot g \cdot \sin \alpha_k(t)$$

$$F_i^A(t) \leftarrow m_i \cdot a_k(t)$$

if $F_i^A(t) \geq 0$ **then**

$$P_i(t) \leftarrow [F_i^R(t) + F_i^D(t) + F_i^M(t) + F_i^A(t)] \cdot v_k(t)$$

$$\lambda_i^F(t) \leftarrow 0$$

else

$$P_i(t) \leftarrow [F_i^R(t) + F_i^D(t) + F_i^M(t)] \cdot v_k(t)$$

$$\lambda_i^F(t) \leftarrow -F_i^A(t) \cdot v(t) \cdot \sigma$$

end if

$$\Lambda_i(t) \leftarrow P_i(t) \cdot \sigma$$

$$\Phi_i(t) \leftarrow \frac{\Lambda_i(t)}{\eta_i^{trans} \cdot \eta_i^{mot} \cdot \eta_i^{elec} \cdot \eta_i^{batt}} + \frac{\Omega_i(t)}{\eta_i^{elec} \cdot \eta_i^{batt}}$$

$$\varphi_i^B(t) \leftarrow \lambda_i^F(t) \cdot \eta_i^{frein} \cdot \eta_i^{trans} \cdot \eta_i^{mot} \cdot \eta_i^{elec} \cdot \eta_i^{batt}$$

$$\psi_i^B(t) \leftarrow \psi_i^B(t-1) - \Phi_i(t) + \varphi_i^F(t)$$

$$\varpi_i(t) \leftarrow \frac{\psi_i^B}{cap_i}$$

$$\Psi_i^B(t) \leftarrow \Psi_i^B(t-1) + \Phi_i(t) - \varphi_i^F(t)$$

$$d(t) \leftarrow d(t-1) + v(t)$$

$t \leftarrow t + 1$

end while

Algorithm 8 Calcul de la consommation du véhicule PHEV-série i

Initialization

$t \leftarrow 0; F_i^R(t) \leftarrow 0; F_i^D(t) \leftarrow 0; F_i^M(t) \leftarrow 0; F_i^A(t) \leftarrow 0; P_i(t) \leftarrow 0; \lambda_i^F(t) \leftarrow 0;$
 $\Lambda_i(t) \leftarrow 0; \Phi_i(t) \leftarrow 0; \varphi_i^B(t) \leftarrow 0; \psi_i^B(t) \leftarrow cap_i; \Psi_i^B(t) \leftarrow 0; \varpi_i(t) \leftarrow 0; \Psi_i^B(t) \leftarrow 0;$
 $d(t) \leftarrow 0; q(t) \leftarrow 0; \lambda_i^C(t) \leftarrow 0; \varphi_i^C(t) \leftarrow 0; \varphi_i^F(t) \leftarrow 0; \psi_i^C(t); \Psi_i^C(t); \omega_i^B(t); \omega_i^C(t);$
 $d^C(t); d^B(t); h_i(t)$

$t \leftarrow 1$

while $t \leq T$ **do**

$F_i^R(t) \leftarrow m_i \cdot g \cdot C_i^R$

$F_i^D(t) \leftarrow \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot C_i^D \cdot A_i^F \cdot (v_k(t))^2$

$F_i^M(t) \leftarrow m_i \cdot g \cdot \sin \alpha_k(t)$

$F_i^A(t) \leftarrow m_i \cdot a_k(t)$

if $F_i^A(t) \geq 0$ **then**

$P_i(t) \leftarrow [F_i^R(t) + F_i^D(t) + F_i^M(t) + F_i^A(t)] \cdot v_k(t)$

$\lambda_i^F(t) \leftarrow 0$

else

$P_i(t) \leftarrow [F_i^R(t) + F_i^D(t) + F_i^M(t)] \cdot v_k(t)$

$\lambda_i^F(t) \leftarrow -F_i^A(t) \cdot v(t) \cdot \sigma$

end if

$\Lambda_i(t) \leftarrow P_i \cdot \sigma$

if $q(t-1) = 0$ **then**

$\lambda_i^C(t) \leftarrow 0$

else

if $q(t-1) = 1$ et $P_i(t) \leq \Pi_i^C$ **then**

$\Lambda_i(t) \leftarrow 0$

else

$\lambda_i^C(t) \leftarrow \Pi_i^C \cdot \eta_i^{trans} \cdot \sigma$

end if

end if

Algorithm 8 Calcul de la consommation du véhicule PHEV-série i (continued)

$$\lambda_i^B(t) \leftarrow \Lambda_i(t) - \lambda_i^C(t)$$
$$h_i(t) \leftarrow \frac{\lambda_i^B(t)}{\Lambda_i(t)}$$
if $q(t-1) = 1$ **then**
$$\omega_i^C(t) \leftarrow b_i \cdot \Omega_i(t)$$
$$\omega_i^B(t) \leftarrow \Omega_i(t) - \omega_i^C(t)$$
else
$$\omega_i^C(t) \leftarrow 0$$
$$\omega_i^B(t) \leftarrow \Omega_i(t)$$
end if
$$\Phi_i(t) \leftarrow \frac{\Lambda_i(t)}{\eta_i^{trans} \cdot \eta_i^{mot} \cdot \eta_i^{elec} \cdot \eta_i^{batt}} + \frac{\omega_i^B(t)}{\eta_i^{elec} \cdot \eta_i^{batt}}$$
$$\varphi_i^B(t) \leftarrow \lambda_i^F(t) \cdot \eta_i^{frein} \cdot \eta_i^{trans} \cdot \eta_i^{mot} \cdot \eta_i^{elec} \cdot \eta_i^{batt}$$
if $\varpi_i(t-1) \leq \varpi_i^R$ **then**
$$\varphi_i^C(t) \leftarrow z \cdot (\varpi_i^R - \varpi_i(t-1))$$
else
$$\varphi_i^C(t) \leftarrow 0$$
end if
$$\psi_i^B(t) \leftarrow \psi_i^B(t-1) - \Phi_i(t) + \varphi_i^F(t) + \varphi_i^C(t)$$
$$\varpi_i(t) \leftarrow \frac{\psi_i^B}{cap_i}$$
if $q(t) = 0$ et $\varpi_i(t) \geq \varpi_i^S$ **then**
$$q(t) \leftarrow 0$$
else
$$q(t) \leftarrow 1$$
end if

Algorithm 8 Calcul de la consommation du véhicule PHEV-série i (continued)

$$\Theta_i(t) \leftarrow \frac{\lambda_i^C(t)}{\eta_i^{trans} \cdot \eta_i^{mot} \cdot \eta_i^{gen} \cdot \eta_i^{comb}} + \frac{\omega_i^C(t)}{\eta_i^{comb} \cdot \eta_i^{batt} \cdot \eta_i^{elec}} + \frac{\varphi_i^C(t)}{\eta_i^{batt} \cdot \eta_i^{elec} \cdot \eta_i^{mot} \cdot \eta_i^{gen} \cdot \eta_i^{comb}}$$
$$\Psi_i^C(t) \leftarrow \Psi_i^C(t-1) + \Theta_i(t)$$
$$\Psi_i^B(t) \leftarrow \Psi_i^B(t-1) + \Phi_i(t) - \varphi_i^F(t) - \varphi_i^C(t)$$
$$d(t) \leftarrow d(t-1) + v(t)$$
$$d^B(t) \leftarrow d^B(t-1) + v(t) \cdot h_i(t)$$
$$d^C(t) \leftarrow d^C(t-1) + v(t) \cdot (1 - h_i(t))$$
$$t \leftarrow t + 1$$

end while

Algorithm 9 Calcul de la consommation du véhicule PHEV-parallèle i

Initialization

$$t \leftarrow 0; F_i^R(t) \leftarrow 0; F_i^D(t) \leftarrow 0; F_i^M(t) \leftarrow 0; F_i^A(t) \leftarrow 0; P_i(t) \leftarrow 0; \lambda_i^F(t) \leftarrow 0;$$
$$\Lambda_i(t) \leftarrow 0; \Phi_i(t) \leftarrow 0; \varphi_i^B(t) \leftarrow 0; \psi_i^B(t) \leftarrow cap_i; \Psi_i^B(t) \leftarrow 0; \varpi_i(t) \leftarrow 0; \Psi_i^B(t) \leftarrow 0;$$
$$d(t) \leftarrow 0; q(t) \leftarrow 0; \lambda_i^C(t) \leftarrow 0; \varphi_i^C(t) \leftarrow 0; \varphi_i^F(t) \leftarrow 0; \psi_i^C(t); \Psi_i^C(t); \omega_i^B(t); \omega_i^C(t);$$
$$d^C(t); d^B(t); h_i(t)$$

$$t \leftarrow 1$$

while $t \leq T$ **do**

$$F_i^R(t) \leftarrow m_i \cdot g \cdot C_i^R$$

$$F_i^D(t) \leftarrow \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot C_i^D \cdot A_i^F \cdot (v(t))^2$$

$$F_i^M(t) \leftarrow m_i \cdot g \cdot \sin \alpha(t)$$

$$F_i^A(t) \leftarrow m_i \cdot a(t)$$

if $F_i^A(t) \geq 0$ **then**

$$P_i(t) \leftarrow [F_i^R(t) + F_i^D(t) + F_i^M(t) + F_i^A(t)] \cdot v_k(t)$$

$$\lambda_i^F(t) \leftarrow 0$$

Algorithm 9 Calcul de la consommation du véhicule PHEV-parallèle i (continued)

else

$$P_i(t) \leftarrow [F_i^R(t) + F_i^D(t) + F_i^M(t)] \cdot v_k(t)$$

$$\lambda_i^F(t) \leftarrow -F_i^A(t) \cdot v(t) \cdot \sigma$$

end if

$$\Lambda_i(t) \leftarrow P_i \cdot \sigma$$

if $q(t-1) = 0$ **then**

$$\lambda_i^C(t) \leftarrow \Lambda_i(t)$$

else

if $q(t-1) = 1$ et $P_i(t) \leq \Pi_i^B$ **then**

$$\lambda_i^C(t) \leftarrow \Lambda_i(t) - \Pi_i^B \cdot \eta_i^{trans} \cdot \sigma$$

else

$$\lambda_i^C(t) \leftarrow 0$$

end if

end if

$$\lambda_i^B(t) \leftarrow \Lambda_i(t) - \lambda_i^C(t)$$

$$h_i(t) \leftarrow \frac{\lambda_i^B(t)}{\Lambda_i(t)}$$

if $q(t-1) = 1$ **then**

$$\omega_i^C(t) \leftarrow b_i \cdot \Omega_i(t)$$

$$\omega_i^B(t) \leftarrow \Omega_i(t) - \omega_i^C(t)$$

else

$$\omega_i^C(t) \leftarrow 0$$

$$\omega_i^B(t) \leftarrow \Omega_i(t)$$

end if

$$\Phi_i(t) \leftarrow \frac{\Lambda_i(t)}{\eta_i^{trans} \cdot \eta_i^{mot} \cdot \eta_i^{elec} \cdot \eta_i^{batt}} + \frac{\omega_i^B(t)}{\eta_i^{elec} \cdot \eta_i^{batt}}$$

$$\varphi_i^B(t) \leftarrow \lambda_i^F(t) \cdot \eta_i^{frein} \cdot \eta_i^{trans} \cdot \eta_i^{mot} \cdot \eta_i^{elec} \cdot \eta_i^{batt}$$

Algorithm 9 Calcul de la consommation du véhicule PHEV-parallèle i (continued)

$$\psi_i^B(t) \leftarrow \psi_i^B(t-1) - \Phi_i(t) + \varphi_i^F(t)$$

$$\varpi_i(t) \leftarrow \frac{\psi_i^B}{cap_i}$$

if $q(t-1) = 1$ et $\varpi_i(t) \geq \varpi_i^S$ **then**

$$q(t) \leftarrow 0$$

else

$$q(t) \leftarrow 1$$

end if

$$\Theta_i(t) \leftarrow \frac{\lambda_i^C(t)}{\eta_i^{trans} \cdot \eta_i^{comb}} + \frac{\omega_i^C(t)}{\eta_i^{comb}}$$

$$\Psi_i^C(t) \leftarrow \Psi_i^C(t-1) + \Theta_i(t)$$

$$\Psi_i^B(t) \leftarrow \Psi_i^B(t-1) + \Phi_i(t) - \varphi_i^F(t)$$

$$d(t) \leftarrow d(t-1) + v(t)$$

$$d^B(t) \leftarrow d^B(t-1) + v(t) \cdot h_i(t)$$

$$d^C(t) \leftarrow d^C(t-1) + v(t) \cdot (1 - h_i(t))$$

$$t \leftarrow t + 1$$

end while

Algorithm 10 Calcul de la consommation du véhicule PHEV-power-split i

Initialization

$$t \leftarrow 0; F_i^R(t) \leftarrow 0; F_i^D(t) \leftarrow 0; F_i^M(t) \leftarrow 0; F_i^A(t) \leftarrow 0; P_i(t) \leftarrow 0; \lambda_i^F(t) \leftarrow 0;$$

$$\Lambda_i(t) \leftarrow 0; \Phi_i(t) \leftarrow 0; \varphi_i^B(t) \leftarrow 0; \psi_i^B(t) \leftarrow cap_i; \Psi_i^B(t) \leftarrow 0; \varpi_i(t) \leftarrow 0; \Psi_i^B(t) \leftarrow 0;$$

$$d(t) \leftarrow 0; q(t) \leftarrow 0; \lambda_i^C(t) \leftarrow 0; \varphi_i^C(t) \leftarrow 0; \varphi_i^F(t) \leftarrow 0; \psi_i^C(t); \Psi_i^C(t); \omega_i^B(t); \omega_i^C(t);$$

$$d^C(t); d^B(t); h_i(t)$$

$$t \leftarrow 1$$

while $t \leq T$ **do**

$$F_i^R(t) \leftarrow m_i \cdot g \cdot C_i^R$$

$$F_i^D(t) \leftarrow \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot C_i^D \cdot A_i^F \cdot (v(t))^2$$

Algorithm 10 Calcul de la consommation du véhicule PHEV-*power-split* i (continued)

$$F_i^M(t) \leftarrow m_i \cdot g \cdot \sin\alpha(t)$$

$$F_i^A(t) \leftarrow m_i \cdot a(t)$$

if $F_i^A(t) \geq 0$ **then**

$$P_i(t) \leftarrow [F_i^R(t) + F_i^D(t) + F_i^M(t) + F_i^A(t)] \cdot v_k(t)$$

$$\lambda_i^F(t) \leftarrow 0$$

else

$$P_i(t) \leftarrow [F_i^R(t) + F_i^D(t) + F_i^M(t)] \cdot v_k(t)$$

$$\lambda_i^F(t) \leftarrow -F_i^A(t) \cdot v(t) \cdot \sigma$$

end if

$$\Lambda_i(t) \leftarrow P_i \cdot \sigma$$

if $q(t-1) = 0$ **then**

$$\lambda_i^C(t) \leftarrow \Lambda_i(t)$$

else

if $q(t-1) = 1$ et $P_i(t) \leq \Pi_i^B$ **then**

$$\lambda_i^C(t) \leftarrow \Lambda_i(t) - \Pi_i^B \cdot \eta_i^{trans} \cdot \sigma$$

else

$$\lambda_i^C(t) \leftarrow 0$$

end if

end if

$$\lambda_i^B(t) \leftarrow \Lambda_i(t) - \lambda_i^C(t)$$

$$h_i(t) \leftarrow \frac{\lambda_i^B(t)}{\Lambda_i(t)}$$

if $q(t-1) = 1$ **then**

$$\omega_i^B(t) \leftarrow \Omega_i(t) - \omega_i^C(t)$$

else

$$\omega_i^C(t) \leftarrow 0$$

$$\omega_i^B(t) \leftarrow \Omega_i(t)$$

end if

Algorithm 10 Calcul de la consommation du véhicule PHEV-*power-split* i (continued)

$$\Phi_i(t) \leftarrow \frac{\Lambda_i(t)}{\eta_i^{trans} \cdot \eta_i^{mot} \cdot \eta_i^{elec} \cdot \eta_i^{batt}} + \frac{\omega_i^B(t)}{\eta_i^{elec} \cdot \eta_i^{batt}}$$

$$\varphi_i^B(t) \leftarrow \lambda_i^F(t) \cdot \eta_i^{frein} \cdot \eta_i^{trans} \cdot \eta_i^{mot} \cdot \eta_i^{elec} \cdot \eta_i^{batt}$$

if $\varpi_i(t-1) \leq \varpi_i^R$ **then**

$$\varphi_i^C(t) \leftarrow z \cdot (\varpi_i^R - \varpi_i(t-1))$$

else

$$\varphi_i^C(t) \leftarrow 0$$

end if

$$\psi_i^B(t) \leftarrow \psi_i^B(t-1) - \Phi_i(t) + \varphi_i^F(t) + \varphi_i^C(t)$$

$$\varpi_i(t) \leftarrow \frac{\psi_i^B}{cap_i}$$

if $q(t-1) = 0$ et $\varpi_i(t) \geq \varpi_i^S$ **then**

$$q(t) \leftarrow 0$$

else

$$q(t) \leftarrow 1$$

end if

$$\Theta_i(t) \leftarrow \frac{\lambda_i^C(t)}{\eta_i^{trans} \cdot \eta_i^{mot} \cdot \eta_i^{gen} \cdot \eta_i^{comb}} + \frac{\omega_i^C(t)}{\eta_i^{comb} \cdot \eta_i^{batt} \cdot \eta_i^{elec}} + \frac{\varphi_i^C(t)}{\eta_i^{batt} \cdot \eta_i^{elec} \cdot \eta_i^{mot} \cdot \eta_i^{gen} \cdot \eta_i^{comb}}$$

$$\Psi_i^C(t) \leftarrow \Psi_i^C(t-1) + \Theta_i(t)$$

$$\Psi_i^B(t) \leftarrow \Psi_i^B(t-1) + \Phi_i(t) - \varphi_i^F(t) - \varphi_i^C(t)$$

$$d(t) \leftarrow d(t-1) + v(t)$$

$$d^B(t) \leftarrow d^B(t-1) + v(t) \cdot h_i(t)$$

$$d^C(t) \leftarrow d^C(t-1) + v(t) \cdot (1 - h_i(t))$$

$$t \leftarrow t + 1$$

end while

6.14 Paramètres utilisés pour la validation de TVSim

Les valeurs des paramètres utilisées pour la validation du modèle TVSim sont présentées dans les tableaux suivants, selon qu'elles proviennent de l'ANL (2011) ou de Simpson (2005). Nous avons appliqué les taux d'évolution de l'efficacité et de la puissance spécifique du système d'électronique de puissance de l'ANL à l'efficacité et la puissance spécifique de la batterie électrique, le taux d'évolution de l'efficacité de la transmission de l'ANL à l'efficacité du système de freinage, et nous avons considéré que la puissance spécifique de la transmission demeurerait stable dans le temps. Le coût de la transmission est considéré comme fixe, donc $\beta^{trans} = 0$, et les coûts des autres composants sont considérés comme seulement variables, donc $\gamma^{mot} = \gamma^{elec} = \gamma^{batt} = 0$.

paramètre	2010	2015	2030	2045
Surface frontale du véhicule (A^F - en m ²)	2,17	2,22	2,26	2,28
Coefficient de résistance au roulement du véhicule (C^R)	0,0078	0,0076	0,007	0,0068
Coefficient de traînée aérodynamique du véhicule (C^D)	0,275	0,27	0,26	0,25
Énergie demandée par les accessoires (Ω - en kWh)	210	230	250	270
Efficacité de la transmission (η^{trans} - en %)	97,5	97,5	98	98
Efficacité du moteur électrique (η^{mot} - en %)	95,5	96	97	97
Efficacité de l'électronique de puissance (η^{elec} - en %)	95,5	96	97	97
Coût fixe de la transmission (γ^{trans} - en US\$)	840	840	840	840
Coût variable du moteur électrique (β^{mot} - en US\$.kW ⁻¹)	13	8	7	7
Coût variable de l'électronique de puissance (β^{elec} - en US\$.kW ⁻¹)	12	5,7	5	5
Coût variable de la batterie électrique (β^{batt} - en US\$.kWh ⁻¹)	500	250	125	100
Puissance spécifique du moteur électrique (ξ^{mot} - en kW.kg ⁻¹)	1,25	1,25	1,4	1,56
Puissance spécifique de l'électronique de puissance (ξ^{elec} - en kW.kg ⁻¹)	5,9	10,6	11,9	12,8
Masse fixe du véhicule (m^{fix} - en kg)	946,2	921,3	846,6	826,7
Coût fixe du véhicule (c^{fix} - en US\$)	25 785	20 879	17 155	15 540

Tableau 6.5 – Paramètres utilisés pour la validation de TVSim provenant de l'ANL (2011)

paramètre	2010	2015	2030	2045
Efficacité due la batterie électrique (η^{batt} - en %)	95	95,5	96,5	96,5
Efficacité du système de freinage (η^{frein} - en %)	60	60	60	60
Puissance spécifique de la transmission (ξ^{trans} - en kW.kg ⁻¹)	1,625	1,625	1,625	1,625
Puissance spécifique de la batterie électrique (ξ^{batt} - en kW.kg ⁻¹)	0,3	0,3	0,332	0,366
Énergie spécifique de la batterie électrique (ρ^{batt} - en kW.kg ⁻¹)	0,15	0,15	0,166	0,183

Tableau 6.6 – Paramètres utilisés pour la validation de TVSim provenant de Simpson (2005)